

TESIS DOCTORAL

AÑO 2021



**Optimización de los consumos de agua y energía
en la industria cerámica sanitaria y la
reducción de emisiones de CO₂**



CARLOS IGNACIO CUVIELLA SUÁREZ

PROGRAMA DE DOCTORADO EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

DIRECTOR: Dr. ANTONIO COLMENAR SANTOS



CODIRECTOR: Dr. DAVID BORGE DIEZ

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuvilla Suárez	10/03/2021	Página 2 de 231



 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 3 de 231

ÍNDICE



ÍNDICE	3
LISTA DE ILUSTRACIONES Y TABLAS	10
1 PREÁMBULO	26
2 INTRODUCCIÓN	31
2.1 CONSUMOS DE AGUA Y ENERGÍA EN EL SECTOR DE LA CERÁMICA SANITARIA	31
2.2 PRODUCCIÓN MUNDIAL DE CERÁMICA SANITARIA	33
2.3 PROCESO GENERAL DE PRODUCCIÓN DE LA CERÁMICA SANITARIA	36
2.4 TIPOS DE FABRICAS SEGÚN LA TECNOLOGÍA DE COLADO	39
2.4.1 Tecnología tradicional. Moldes de yeso	39
2.4.2 Tecnología moderna. Moldes de resina	40
2.5 CARACTERIZACIÓN DEL TIPO DE FÁBRICA	42
2.5.1 Diferencias en el consumo de agua de las dos fábricas tipo	43
2.5.1.1 Ósmosis inversa	44
2.5.2 Diferencias de consumo de energía de las dos fábricas tipo	44
2.5.2.1 Diferencias eléctricas	44
2.5.2.2 Diferencias térmicas	45
3 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS A ALCANZAR	46
3.1 SOBRE LA MODALIDAD DE PRESENTACIÓN DE LA TESIS	46
3.2 OBJETIVOS	47
3.3 PLANTEAMIENTO SECUENCIAL DE LA INVESTIGACION	49
3.4 HIPOTESIS PARA EL ANALISIS DE CONSUMOS	50
3.4.1 Caracterización de consumos y residuos	50
3.4.2 Cuantificación de demanda de energía y agua	55
3.4.2.1 Materias primas	57
3.4.2.2 Preparación de pasta	58
3.4.2.3 Preparación de esmalte	59
3.4.2.4 Modelado y moldes	61
3.4.2.5 Colado	62
3.4.2.6 Acondicionamiento de aire. Calefacción y ventilación	64

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 4 de 231



3.4.2.7	Secado.....	65
3.4.2.8	Esmaltado	65
3.4.2.9	Hornos	66
3.4.2.10	Control final.....	67
3.4.2.11	Oficinas.....	68
3.4.2.12	Almacén.....	68
3.4.2.13	Instalaciones y servicios	68
3.4.3	Vínculos existentes o potenciales entre consumos y residuos	69
3.4.4	Consumos globales en las dos fábricas tipo convencionales	71
3.4.5	Hipótesis para la recuperación de agua	76
3.4.5.1	Destilación térmica multi-efecto	76
3.4.5.2	Consumos estándar de ósmosis inversa.....	76
3.4.5.3	Ahorros por recuperación de agua mediante destilación.....	77
3.4.5.4	Condensación de vapor con máquina de absorción.....	77
3.4.6	Hipótesis para la cogeneración	86
3.4.7	Hipótesis para el análisis exergético.....	88
4	MARCO TEÓRICO EN EL QUE SE INSCRIBE EL TEMA DE LA TESIS Y HERRAMIENTAS METODOLÓGICAS. REMISIÓN A LAS PUBLICACIONES.....	96
4.1	PUBLICACION 1: “Management tool to optimize energy and water consumption in the sanitary-ware industry”	98
4.1.1	Modelo eléctrico.....	98
4.1.2	Modelo térmico	102
4.1.3	Modelo de horno túnel.....	103
4.1.3.1	Pérdidas	109
4.1.3.2	Evolución térmica de la carga	112
4.1.3.3	Calculo de flujos de gases y potencia de combustible.....	113
4.1.3.4	Resultados del modelo de horno.....	114
4.1.4	Modelo de horno intermitente	115
4.1.5	Modelo psicrométrico.....	118
4.1.6	Modelo de secadero de piezas y centrales de acondicionamiento	120
4.1.6.1	Cálculo de la demanda térmica.....	122
4.1.6.2	Cálculo la cantidad de agua evaporada.....	123

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 5 de 231



4.1.7	Modelo de secadero de moldes.....	125
4.1.8	Modelo de consumo de agua	126
4.2	PUBLICACION 2: “ <i>Heat recovery in sanitary-ware industry applied to water and energy saving by multi-effect distillation</i> ”	128
4.2.1	Destilación multi-efecto (MED)	128
4.2.2	Modelo destilación multi-efecto (MED)	128
4.2.3	Cascada de tres celdas de evaporación simples	129
4.2.4	Ecuaciones en el primer efecto.....	132
4.2.4.1	Evaporador	132
4.2.4.2	Pre-Calentador	132
4.2.5	Ecuaciones en un efecto i-genérico	133
4.2.5.1	Cámara flash.....	133
4.2.5.2	Evaporador	133
4.2.6	Pre-calentador	134
4.2.7	Condensador	134
4.3	PUBLICACION 3: “ <i>Reduction of Water and Energy Consumption in Sanitary-Ware industry by Absorption Machine Operated with Recovered Heat</i> ”	137
4.3.1	Modelo de sistema de condensación	137
4.3.2	Análisis de sensibilidad	142
4.4	PUBLICACION 4: “ <i>Sanitary-ware factories: heat recovery strategies to optimize energy and water consumption</i> ”	144
4.4.1	Metodología de cálculo	146
4.4.1.1	Energía primaria para una fábrica convencional	146
4.4.1.2	Medidas de ahorro de agua.....	147
4.4.1.3	Cálculo del calor necesario para pre-calentar el aire de combustión del horno.....	148
4.4.1.4	Energía primaria para una fábrica optimizada con potencia de cogeneración igual al promedio de potencia eléctrica anual	149
4.4.1.5	Optimización de la energía en función de la potencia de la cogeneración	151
4.4.1.6	Optimización económica en función de los precios de la energía.....	153
4.5	PUBLICACION 5: “ <i>Exergoeconomics in the sanitary-ware industry to reduce energy and water consumptions</i> ”	156
4.5.1	Análisis exergoeconómico avanzado.....	156
5	TRABAJOS PUBLICADOS.....	160

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 6 de 231



5.1	Publicación 1: “ <i>Management tool to optimize energy and water consumption in the sanitary-ware industry</i> ”	164
5.1.1	Resumen de la publicación en español	164
5.1.2	Resumen de la publicación en inglés.....	165
5.1.3	Conclusiones de la publicación	165
5.2	Publicación 2: “ <i>Heat recovery in sanitary-ware industry applied to water and energy saving by multi-effect distillation</i> ”	167
5.2.1	Resumen de la publicación en español.....	167
5.2.2	Resumen de la publicación en inglés.....	168
5.2.3	Conclusiones de la publicación	170
5.3	Publicación 3: “ <i>Reduction of Water and Energy Consumption in Sanitary-Ware industry by Absorption Machine Operated with Recovered Heat</i> ”	170
5.3.1	Resumen de la publicación en español	170
5.3.2	Resumen de la publicación en inglés.....	172
5.3.3	Conclusiones de la publicación	173
6	OTRAS APORTACIONES CIENTÍFICAS DERIVADAS DIRECTAMENTE DE LA TESIS DOCTORAL	175
6.1	Artículo “ <i>Sanitary-ware factories: heat recovery strategies to optimize energy and water consumption</i> ”	175
6.1.1	Datos de la publicación.....	175
6.1.2	Resumen de la publicación	176
6.1.3	Conclusiones de la publicación	177
6.2	Artículo “ <i>Exergoeconomics in the sanitary-ware industry to reduce energy and water consumptions</i> ”	179
6.2.1	Datos de la publicación.....	179
6.2.2	Resumen de la publicación	180
6.2.3	Conclusiones de la publicación	180
6.3	Artículo “ <i>Tri-generation system to couple production to demand in a combined cycle</i> ”	181
6.3.1	Datos de la publicación.....	181
6.3.2	Resumen de la publicación	182
6.3.3	Conclusiones de la publicación	183
6.4	Publicación del libro “ <i>Water and Energy Use in Sanitary-ware Manufacturing - Process Modelling for Greater Efficiency</i> ”	184

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 7 de 231



6.5	Documentos de aplicación práctica de los conocimientos y conclusiones de la tesis en la industria cerámica de artículos sanitarios.....	185
6.5.1	Resumen del documento “Aplicación práctica de medidas de reducción de consumos en la industria de productos sanitarios cerámicos”	185
6.5.2	Resumen del documento “Optimización de los consumos de agua y energía en la Industria Cerámica Sanitaria y la Reducción de Emisiones de CO ₂ ”	187
7	CONCLUSIONES.....	189
7.1	CONCLUSIONES DIRECTAMENTE VINCULADAS A LA PRODUCCION DE ARTICULOS SANITARIOS CERAMICOS	189
7.1.1	Conclusiones respecto al calor residual de los hornos.....	190
7.1.2	Conclusiones respecto a la reducción de consumo de agua.....	191
7.1.3	Conclusiones respecto al acoplamiento de una cogeneración	193
7.1.4	Conclusiones respecto al análisis exergoeconómico	194
7.2	CONCLUSIONES VINCULADAS A LA SOSTENIBILIDAD Y MEDIOAMBIENTE	194
7.3	LIMITACIONES Y FUTURA INVESTIGACION	195
8	REFERENCIAS	197
9	“CURRICULUM VITAE” DEL DOCTORANDO	204
9.1	Titulaciones	204
9.2	Experiencia profesional	204
9.3	Publicaciones.....	205
ANEXO I: Mensaje informativo de la Editorial SPRINGER al Director de tesis del incremento del factor de impacto de la revista “ <i>Journal of Cleaner Production</i> ”		
		206
ANEXO II: “Management tool to optimize energy and water consumption in the sanitary-ware industry”. COPIA DE LA PUBLICACIÓN.....		
		207
ANEXO III: “Management tool to optimize energy and water consumption in the sanitary-ware industry”. CERTIFICADO DE PUBLICACIÓN.....		
		208
ANEXO IV: “Management tool to optimize energy and water consumption in the sanitary-ware industry”. FACTOR DE IMPACTO		
		209
ANEXO V: “Heat recovery in sanitary-ware industry applied to water and energy saving by multi-effect distillation” COPIA DE LA PUBLICACIÓN		
		210

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 8 de 231

ANEXO VI: "Heat recovery in sanitary-ware industry applied to water and energy saving by multi-effect distillation" CERTIFICADO DE PUBLICACIÓN	211
ANEXO VII: "Heat recovery in sanitary-ware industry applied to water and energy saving by multi-effect distillation" FACTOR DE IMPACTO.....	212
ANEXO VIII: "Reduction of Water and Energy Consumption in Sanitary-Ware industry by Absorption Machine Operated with Recovered Heat". COPIA DE LA PUBLICACIÓN.....	213
ANEXO IX: "Reduction of Water and Energy Consumption in Sanitary-Ware industry by Absorption Machine Operated with Recovered Heat". CERTIFICADO DE PUBLICACIÓN.....	214
ANEXO X: "Reduction of Water and Energy Consumption in Sanitary-Ware industry by Absorption Machine Operated with Recovered Heat". FACTOR DE IMPACTO	215
ANEXO XI: "Reduction of Water and Energy Consumption in Sanitary-Ware industry by Absorption Machine Operated with Recovered Heat". Invitación como ponente en congreso " <i>International Conference on Environmental Science and Green Energy</i> " en París	
ANEXO XII: "Sanitary-ware factories: heat recovery strategies to optimize energy and water consumption" COPIA DE LA PUBLICACIÓN	217
ANEXO XIII: "Sanitary-ware factories: heat recovery strategies to optimize energy and water consumption". CERTIFICADO DE PUBLICACIÓN	218
ANEXO XIV: "Exergoeconomics in the sanitary-ware industry to reduce energy and water consumptions" COPIA DE LA PUBLICACIÓN.....	219
ANEXO XV: "Exergoeconomics in the sanitary-ware industry to reduce energy and water consumptions". CERTIFICADO DE PUBLICACIÓN.....	220
ANEXO XVI: "Tri-generation system to couple production to demand in a combined cycle" COPIA DE LA PUBLICACIÓN.....	221
ANEXO XVII: "Tri-generation system to couple production to demand in a combined cycle". CERTIFICADO DE PUBLICACIÓN	222

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 9 de 231

ANEXO XVIII: “Water and Energy Use in Sanitary-ware Manufacturing - Process Modelling for Greater Efficiency” CONTRATO DE PUBLICACION.....	223
ANEXO XIX: “Water and Energy Use in Sanitary-ware Manufacturing - Process Modelling for Greater Efficiency” CERTIFICACION FIRMA ELECTRONICA DEL CONTRATO	224
ANEXO XX: “Water and Energy Use in Sanitary-ware Manufacturing - Process Modelling for Greater Efficiency” FORMULARIO DE PROPUESTA DEL LIBRO.....	225
ANEXO XXI: “Water and Energy Use in Sanitary-ware Manufacturing - Process Modelling for Greater Efficiency” TABLA PROPUESTA DE CONTENIDOS.....	226
ANEXO XXII: “Water and Energy Use in Sanitary-ware Manufacturing - Process Modelling for Greater Efficiency” PROPUESTA DE SINOPSIS	227
ANEXO XXIII: “Water and Energy Use in Sanitary-ware Manufacturing - Process Modelling for Greater Efficiency” FLYER DE LA PUBLICACION.....	228
ANEXO XXIV: “Aplicación práctica de medidas de reducción de consumos en la industria de productos sanitarios cerámicos” COPIA DEL DOCUMENTO	229
ANEXO XXV: “Optimización de los consumos de agua y energía en la Industria Cerámica Sanitaria y la Reducción de Emisiones de CO ₂ ” COPIA DEL DOCUMENTO	230
ANEXO XXVI: “Autorización de la Compañía ROCA SANITARIO S.A. a favor del doctorando para publicar en la tesis los documentos de aplicación de la misma en las fábricas del grupo ROCA” CORREO DEL DEPARTAMENTO DE R.R.H.H.....	231

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 10 de 231

LISTA DE ILUSTRACIONES Y TABLAS

ILUSTRACIONES

Figura 1. Distribución típica de consumos energéticos en una fábrica de cerámica Fuente (Cuviella-Suárez et al., 2018).....	32
Figura 2. Producción de cerámica sanitaria en la Unión Europea. Fuente: Competitiveness of the Ceramics Sector (“Growth - European Commission - Publications 2008,” 2008).....	34
Figura 3. Producción mundial de cerámica sanitaria por región. Fuente (“Ceramic World Review 114/2015,” 2015).....	35
Figura 4. Proceso general de producción de cerámica sanitaria. Fuente: (<i>Ceramic Technology Sanitary-ware</i> , 2010).....	37
Figura 5. Planta tipo de una fábrica de moldes de yeso Fuente: (Elaboración propia).	54
Figura 6. Planta tipo de una fábrica de moldes de resina Fuente: (Elaboración propia)	54
Figura 7. Modelo de consumidor eléctrico Fuente: (Elaboración propia).....	55
Figura 8: Esquema de consumidor térmico Fuente: (Elaboración propia).....	56
Figura 9. Esquema modelo de consumidor de agua Fuente: (Elaboración propia).....	56
Figura 10. Esquema de modelización de procesos. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2018).....	57
Figura 11. Equipos de la sección de primeras materias. Fuente: (Elaboración propia).....	58
Figura 12. Equipos de la sección de preparación pasta. Fuente: (Elaboración propia).....	59
Figura 13. Equipos sección de preparación de esmalte. Fuente: (Elaboración propia).	60
Figura 14. Equipos sección de modelado y fabricación de moldes. Fuente: (Elaboración propia).....	62
Figura 15. Equipos sección colado en una fábrica de moldes de yeso. Fuente: (Elaboración propia).....	63
Figura 16. Equipos sección colado en una fábrica de moldes de resina. Fuente: (Elaboración propia).....	64
Figura 17. Equipos sección acondicionamiento aire. Fuente: (Elaboración propia).	65
Figura 18. Equipos sección de secado. Fuente: (Elaboración propia).....	65
Figura 19. Equipos sección de esmaltado. Fuente: (Elaboración propia).....	66
Figura 20. Equipos sección de hornos. Fuente: (Elaboración propia).....	67



 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 11 de 231

Figura 21. Equipos sección de control final. Fuente: (Elaboración propia).	67
Figura 22. Conjunto tolva de pérdidas con machacadora. Fuente: (Elaboración propia).....	69
Figura 23. Consumos de una fábrica tipo convencional de moldes de yeso. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2018).....	72
Figura 24. Consumos de una fábrica tipo convencional de moldes de resina. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2018).....	73
Figura 25. Calor recuperable de los hornos vs. demanda térmica de receptores. Fuente: (Elaboración propia).	74
Figura 26. Calor residual vs. demanda cuando se precalientan los aires de horno. Fuente: (Elaboración propia).. ..	75
Figura 27. Esquema de recuperación térmica en máquina de absorción para condensar vapor residual. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).	78
Figura 28. Esquema de modelo de la máquina de absorción. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).....	79
Figura 29. Promedio anual de condiciones ambientales Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).....	81
Figura 30. Potencia térmica de acondicionamiento de aire en una fábrica de moldes de yeso. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).	83
Figura 31: Potencia térmica de acondicionamiento de aire en una fábrica de moldes de resina. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).	84
Figura 32. (a) Demanda térmica [kW]. (b) Contenido de humedad [kg/s]. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021)	85
Figura 33. Coeficiente de carga tipo de un suministro eléctrico industrial. Fuente: (Cuviella-Suárez, Carlos et al., 2019).....	86
Figura 34. Rendimiento de un turbine de gas frente al grado de carga. Fuente: (Cuviella-Suárez, Carlos et al., 2019).....	87
Figura 35. Esquema de procedimiento de resolución. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019b).....	89
Figura 36. Necesidades térmica, eléctrica e hídrica de una fábrica optimizada. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019b).....	90



Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 12 de 231

Figura 37. Esquema de flujo de una fábrica convencional. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019b).....	93
Figura 38. Esquema de flujo de una fábrica optimizada. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019b)	94
Figura 39. Configuración de un horno túnel (Fuente: SACMI Catalogue)	104
Figura 40. Rango de especificaciones técnicas de un horno túnel. Fuente: (SACMI Catalogue)	104
Figura 41. Esquema del modelo de horno túnel. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2018).	105
Figura 42. Distribución de temperatura en un horno túnel. Fuente: (SACMI – Technical specifications).	106
Figura 43. Sección transversal de un horno túnel. Fuente: (SACMI Catalogue)	107
Figura 44. Esquema de balance de masa y energía en un módulo genérico. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019a).	108
Figura 45. Esquema de transferencia térmica a través de los cerramientos del horno. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019a).	109
Figura 46. Modelo de flujo interior en conducto no circular. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019a)	110
Figura 47. Potencia térmica de pérdidas a través de las paredes [kW].	111
Figura 48. Gradiente transversal de temperatura en la carga a la salida del túnel. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019a).	112
Figura 49. Potencias de calentamiento-enfriamiento de las masas sólidas a lo largo del túnel [kW]. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).	113
Figura 50. Flujos de gases en cada módulo del túnel. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).	114
Figura 51. Esquema simplificado del modelo termodinámico de horno túnel. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2018).	115
Figura 52. Sección transversal de un horno intermitente. Fuente: (SACMI Catalogue).	116
Figura 53. Curva de distribución de temperatura en un horno intermitente. Fuente: (SACMI Specifications).	116
Figura 54. Esquema del modelo del secadero de piezas. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2018).	121
Figura 55. Esquema del modelo de central de acondicionamiento de aire. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2018).	122
Figura 56. Esquema de modelo de secadero de moldes. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2018).	125



 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 13 de 231

Figura 57. Esquema de consumo de agua en una fábrica tipo. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2018).....	126
Figura 58. Cascada simple de celdas de evaporación-condensación. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019a).	129
Figura 59. Esquema del sistema MED de destilación. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019a).	131
Figura 60. Esquema de configuración del primer efecto MED. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019a).	132
Figura 61. Esquema de cada efecto genérico del MED. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019a).....	133
Figura 62. Esquema de configuración del ultimo efecto y la alimentación del Sistema. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019a).	134
Figura 63. Esquema del condensador. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019a).	135
Figura 64. Esquema del economizador del MED. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019a).....	136
Figura 65. Cantidad de gas consumida según la configuración de fábrica. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).	139
Figura 66. Cantidad de agua condensable según la configuración de fábrica. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).....	140
Figura 67. Resultados para las diferentes configuraciones de planta. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).	141
Figura 68. Análisis de sensibilidad de Q_{NG} y $m_{condensable}$ frente a $T_{ambiente}$. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).	143
Figura 69. Análisis de sensibilidad de Q_{NG} y $m_{condensable}$ frente a I_{solar} . Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021)	144
Figura 70. Esquema fábrica convencional sin medidas de ahorro. Fuente: (Cuviella-Suárez, Carlos et al., 2019).	145
Figura 71. Esquema fábrica optimizada con recuperación de agua y de calor. Fuente: (Cuviella-Suárez, Carlos et al., 2019).....	145
Figura 72. Coste del consumo anual en una fábrica convencional en función de los precios de la energía. Fuente: Elaboración propia).	147
Figura 73. Coste del consumo anual en función de los precios de la energía para una fábrica con recuperación de agua, pero no de energía. Fuente: Elaboración propia).	148



Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 14 de 231

Figura 74. Coste del consumo anual en función de los precios de la energía para una fábrica con recuperación de agua, y cogeneración diseñada para la potencia media anual. Fuente: (Elaboración propia). 151

Figura 75. Energía primaria como función de la potencia de la TG $N_{elec GT}$. Fuente: (Cuviella-Suárez, Carlos et al., 2019). 153

Figura 76. Esquema de red neuronal para la correlación $C_{of} = f(P_{NG}, P_{elec})$. Fuente: (Cuviella-Suárez, Carlos et al., 2019). 153

Figura 77. Resumen de entradas-salidas en las fábricas convencional y optimizada. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019b). 158

TABLAS

“Nota: *Para la interpretación de las tablas, se ha mantenido el idioma y la puntuación de punto decimal en las referenciadas de diferentes publicaciones. Para las de elaboración propia se ha escogido idioma español y puntuación de coma decimal*”.

Tabla 1. Consumo energético específico en la industria cerámica en la Unión Europea. Fuente (“Reference Document on Best Available Techniques in the Ceramic Manufacturing Industry,” 2007) 32

Tabla 2. Consumo energético específico en tres plantas de cerámica sanitaria. Fuente: (“Reference Document on Best Available Techniques in the Ceramic Manufacturing Industry,” 2007). 33

Tabla 3. Consumos específicos de una fábrica de sanitario. Fuente: (Lv et al., 2019). 33

Tabla 4. Producción mundial de cerámica sanitaria por región. Fuente: (“Ceramic World Review 114/2015,” 2015). 35

Tabla 5. Parámetros ambientales en la sala de colado. Fuente: (Ceramic Technology Sanitary-ware, 2010) .. 40

Tabla 6. Consumo comparativo de energía y agua para las dos tecnologías estudiadas (Fuente: Elaboración propia) 40

Tabla 7. Comparación de resinas porosas habituales en la producción de cerámica sanitaria. Fuente: (SACMI resins specifications) 41

Tabla 8. Caracterización de la fábrica por áreas de producción. Fuente (Cuviella-Suárez et al., 2021). 42

Tabla 9. Formula and density of slip raw materials. Fuente (Ceramic Technology Sanitary-ware, 2010) 52

Tabla 10. Formula and density of glaze raw materials. Fuente (Ceramic Technology Sanitary-ware, 2010)... 52



 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 15 de 231

Tabla 11. Parámetros de producción de la fábrica tipo. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).	53
Tabla 12. Consumo de energía y agua comparado para ambas tecnologías. Fuente: (Elaboración propia).....	77
Tabla 13. Contenido de agua en la cerámica durante la secuencia de procesos. Fuente: (Ceramic Technology Sanitary-ware, 2010)	80
Tabla 14. Agua diaria a eliminar de la pieza durante los diferentes procesos. Fuente (Cuviella-Suárez et al., 2021).....	80
Tabla 15. Parámetros higrométricos en la sala de colado en una fábrica de moldes de yeso. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).	82
Tabla 16. Parámetros higrométricos en la sala de colado en una fábrica de moldes de resina. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).	82
Tabla 17. Parámetros de la curva de secado de las piezas cerámicas. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021)..	84
Tabla 18. Parámetros constructivos de un secadero de piezas cerámicas. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).	85
Tabla 19. Condiciones inevitables de las diferencias de eficiencia. Fuente: (Tsatsaronis et al., 2003)	94
Tabla 20. Consumo eléctrico en una fábrica de moldes de yeso. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).....	98
Tabla 21. Consumo eléctrico en una fábrica de moldes de resina. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).....	100
Tabla 22. Consumo eléctrico comparado para ambas tecnologías. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021)	101
Tabla 23. Consumo térmico en una fábrica de moldes de yeso. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).....	102
Tabla 24. Consumo térmico en una fábrica de moldes de resina. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).	102
Tabla 25. Consumo térmico comparado para ambas tecnologías. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).....	103
Tabla 26. Principales características de un horno túnel de 84 m. Fuente: (SACMI – Technical specifications).	105
Tabla 27. Características térmicas de carga y vagoneta. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).	112
Tabla 28. Balance de masa y energía a través del horno túnel. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2018).....	114
Tabla 29. Calor recuperable de las chimeneas del horno. Fuente (Elaboración propia).	115
Tabla 30. Consumo de energía para un ciclo completo de secado. Fuente: (Elaboración propia).	125



Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 16 de 231

Tabla 31. Flujos de agua y aire para un ciclo completo de secado. Fuente: (Elaboración propia).....	125
Tabla 32. Consumo de agua. Fuente: (Elaboración propia).	127
Tabla 33. Transferencia de energía en una cascada simple de evaporador-condensador. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019a).	130
Tabla 34. Rendimientos con diferentes valores de parámetros. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019a).....	136
Tabla 35. Coste y consumo anuales en una fábrica convencional para diferentes escenarios de precios de energía. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).	146
Tabla 36. Necesidades para la destilación MED. Fuente:(Cuviella-Suárez, Carlos et al., 2019).	147
Tabla 37. Coste anual y energía primaria en una fábrica optimizada con un MED para ahorrar agua para diferentes escenarios de precios de energía. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).	148
Tabla 38. Condiciones termodinámicas del calor recuperado. Fuente:(Cuviella-Suárez, Carlos et al., 2019).	148
Tabla 39. Características termodinámicas del aire pre-calentado. Fuente:(Cuviella-Suárez, Carlos et al., 2019).	149
Tabla 40. Coste anual y energía primaria en una fábrica mejorada con un tamaño de GT como potencia eléctrica promedio durante un año para diferentes escenarios de precios de la energía. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).	150
Tabla 41. Energía primaria en función de la potencia GT (valores reales y correlacionados. Fuente:(Cuviella-Suárez, Carlos et al., 2019)).	152
Tabla 42. Coeficientes de la función polinómica por un LSA. Fuente:(Cuviella-Suárez, Carlos et al., 2019)	152
Tabla 43. Energía primaria para diferentes potencias GT (real y LSA). Fuente:(Cuviella-Suárez, Carlos et al., 2019).....	153
Tabla 44. Coste anual y energía primaria en una fábrica mejorada con un GT de tamaño óptimo para minimizar el coste por el período de un año para diferentes escenarios de precios de energía. Fuente:(Cuviella-Suárez, Carlos et al., 2019).....	155
Tabla 45. Coeficientes de la ANN que representa la función bivalente $Co4f=f(PNG, Pelec)$. Fuente:(Cuviella-Suárez, Carlos et al., 2019).	155
Tabla 46. Resultados del análisis exergético. Fuente: (Elaboración propia).....	157







 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 17 de 231

Tabla 47. Datos del primer trabajo científico publicado: <i>“Management tool to optimize energy and wáter consumption in the sanitary-ware industry”</i>	161
Tabla 48. Datos del segundo trabajo científico publicado: <i>“Heat recovery in sanitary-ware industry applied to water and energy saving by multi-effect distillation”</i>	162
Tabla 49. Datos del tercer trabajo científico publicado: <i>“Reduction of Water and Energy Consumption in Sanitary-Ware industry by Absorption Machine Operated with Recovered Heat”</i>	163
Tabla 50. Datos del segundo trabajo científico publicado: <i>“Sanitary-ware factories: heat recovery strategies to optimize energy and water consumption”</i>	175
Tabla 51. Datos del segundo trabajo científico publicado: <i>“Exergoeconomics in the sanitary-ware industry to reduce energy and water consumptions”</i>	179
Tabla 52. Datos del segundo trabajo científico publicado: <i>“Tri-generation system to couple production to demand in a combined cycle”</i>	182
Tabla 53. Portada y metadatos del libro <i>“Water and Energy Use in Sanitary-ware Manufacturing”</i>	185
Tabla 54. Consumos y emisiones estimados en la fabricación de cerámica sanitaria. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2018).....	195



Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 18 de 231

NOMENCLATURA



\dot{m}_{IN}	Flujo másico entrante [kg/s]
\dot{m}_{OUT}	Flujo másico saliente [kg/s]
$W_{electrical}$	Potencia eléctrica [kW]
$W_{physical}$	Potencia mecánica [kW]
W_{fuel}	Potencia calorífica del combustible [kW]
$W_{products}$	Potencia termodinámica de los productos del proceso [kW]
W_{losses}	Potencia de las pérdidas [kW]
$\dot{m}_{g_{in}}$	Flujo másico de reactantes gaseosos [kg/s]
$\dot{m}_{g_{out}}$	Flujo másico de productos gaseosos [kg/s]
$\dot{m}_{g_{exh}}$	Flujo másico de productos de combustión [kg/s]
$h_{g_{in}}$	Entalpía específica de reactantes gaseosos [kJ/kg]
$h_{g_{exh}}$	Entalpía específica de productos de combustión [kJ/kg]
\dot{H}_{losses}	Flujo de entalpía de pérdidas [kW]
q_{icv}	Calor específico de transferencia interna por convección [kW]
h_i	Coficiente de transmisión térmica por convección en el interior del horno [kW/m ² /K]
S	Superficie de transmisión de calor [m ²]
T_i	Temperatura interna [°C]
T_1	Temperatura externa [°C]
q_{ir}	Calor específico de transferencia interna por radiación [kW]
σ	Constante de radiación [kW/m ² /K ⁴]
ϵ	Emisividad de radiación interna [adimensional]
q_c	Calor transferido [kW]
k_n	Coficiente de conductividad de cada capa de aislamiento [kW/m ² /K]
T_{n-1}	Temperatura del lado frío de cada capa de aislamiento [°C]
T_n	Temperatura del lado caliente de cada capa de aislamiento [°C]
q_{ecv}	Calor específico de transferencia externa por convección [kW]
q_{er}	Calor específico de transferencia externa por radiación [kW]
h_e	Coficiente de transmisión térmica por convección en el exterior del horno [kW/m ² /K]
T_0	Temperatura del ambiente exterior [°C]
T_e	Temperatura del entorno exterior del horno [°C]
h	Coficiente de transmisión térmica por convección [kW/m ² /K]
Nu	Número de Nusselt [adimensional]
k	Coficiente de conductividad térmica [kW/m ² /K]
L	Longitud característica [m]
D_h	Diámetro hidráulico [m]
A_{cs}	Área de paso de flujo de fluido [m ²]
P_{wet}	Perímetro mojado del paso de flujo de fluido [m]
Re	Número de Reynolds [adimensional]
ρ	Densidad [kg/m ³]

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 19 de 231



v	Velocidad del flujo de fluido [m/s]
μ	Viscosidad dinámica [Pa·s]
Pr	Número de Prandtl [Adimensional]
C_p	Calor específico [kJ/kg/K]
k_{air}	Conductividad térmica del aire [kW/m/K]
Gr	Número de Grassof [Adimensional]
g	Aceleración de la gravedad [m/s ²]
β	Coefficiente de expansión térmica [°C ⁻¹]
Δt	Diferencia de temperatura [°C]
μ_0	Viscosidad dinámica del aire en condiciones normales [Pa·s]
T_0	Temperatura en condiciones normales [°C]
ρ_0	Densidad de condiciones normales [kg/m ³]
$C_{p,air}$	Calor específico del aire [kJ/kg/K]
\dot{m}_{ra}	Flujo másico de aire de techo en el horno [kg/s]
\dot{m}_{ca}	Flujo másico de aire de combustión en el horno [kg/s]
\dot{m}_{ea}	Flujo másico de exceso de aire para la combustión perfecta en el horno [kg/s]
\dot{m}_{rc}	Flujo másico de aire de enfriamiento rápido en el horno [kg/s]
\dot{m}_{sc}	Flujo másico de aire de enfriamiento lento en el horno [kg/s]
\dot{m}_{cv}	Flujo másico de aire de techo en el horno [kg/s]
\dot{m}_{ng}	Flujo másico de gas natural consumido en el horno [kg/s]
\dot{m}_{ex}	Flujo másico de gases de combustión en el horno [kg/s]
\dot{m}_{exrc}	Flujo másico de aire residual de enfriamiento rápido en el horno [kg/s]
\dot{m}_{exsc}	Flujo másico de aire residual de enfriamiento lento en el horno [kg/s]
W_{losses}	Potencia térmica de pérdidas [kW]
$Q_{TKrecoverable}$	Calor recuperable del horno túnel [kW]
Q_{ex}	Calor de gases residuales [kW]
Q_{rc}	Calor residual del aire de enfriamiento rápido [kW]
Q_{sc}	Calor residual del aire de enfriamiento lento [kW]
Q_{TKca}	Calor de precalentamiento para el aire de combustión en el horno túnel [kW]
T_{ca}	Temperatura necesaria para el aire de combustión precalentado [°C]
T_{rc}	Temperatura del aire residual de enfriamiento rápido [°C]
T_{ex}	Temperatura de los gases residuales de combustión [°C]
$Q_{SKrecoverable}$	Calor recuperable del horno intermitente [kW]
Q_{ex}	Calor residual en los gases de combustión [kW]
Q_{SKca}	Calor de precalentamiento para el aire de combustión en el horno intermitente [kW]
$Q_{recovered}$	Calor recuperado [kW]
Q_{demand}	Demanda térmica [kW]
$Q_{HVU/s}$	Demanda térmica de centrales de calefacción [kW]
$Q_{ware-dryers}$	Demanda térmica de secaderos de piezas [kW]
$Q_{mold-dryers}$	Demanda térmica de secaderos de moldes [kW]
$Q_{boilers}$	Demanda térmica de caldearas de agua [kW]
$Q_{NGdemand}$	Demanda térmica de gas natural [kW]

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 20 de 231



$Q_{NG_{factory}}$	Demanda final de gas natural para el suministro de la fábrica [kW]
$Q_{NG_{kilns}}$	Demanda térmica de gas natural para los hornos [kW]
p_s	Presión de saturación [Pa]
x	Contenido de humedad del aire [kg/kg]
m_v	Masa de vapor en el aire húmedo [kg]
m_a	Masa de aire en el aire húmedo [kg]
M_w	Masa molecular del agua [kg/kmol]
p_v	Presión parcial del vapor [Pa]
V	Volumen del aire húmedo [m ³]
R_0	Constante de los gases ideales [kJ/K/kmol]
M_a	Masa molecular del aire [kg/kmol]
p_a	Presión parcial del aire [Pa]
ϕ	Humedad relativa [tanto por uno]
p	Presión del aire húmedo [Pa]
x_s	Contenido de humedad del aire saturado [kg/kg]
$Q_{carts \& \text{ware}}$	Demanda térmica de las vagonetas y las piezas en el secadero [kW]
m_{ware}	Flujo de masa de piezas en el secadero [kg/s]
m_{carts}	Flujo de masa de vagonetas en el secadero [kg/s]
$C_{e_{carts}}$	Calor específico medio de las vagonetas [kJ/kg/K]
$Q_{ventilation}$	Demanda térmica de ventilación en el secadero [kW]
$m_{\text{fresh air}}$	Flujo másico de aire para evaporación en el secadero [kg/s]
$m_{\text{evaporation}}$	Flujo másico de agua evaporada en el secadero [kg/s]
$x_{S_{IN}}$	Contenido de humedad del aire del secadero en condiciones de saturación [kg/kg]
x_{IN}	Contenido de humedad del aire del secadero [kg/kg]
Q_{losses}	Pérdidas térmicas en el secadero [kW]
U	Coefficiente global de transmisión térmica en el secadero [kW/m ² /K]
$Q_{\text{evaporation}}$	Demanda térmica para la evaporación en el secadero [kW]
h_{vapor}	Entalpía específica del vapor [kJ/kg]
h_{water}	Entalpía específica del agua [kJ/kg]
Q_{thermal}	Demanda térmica [kW]
$m_{\text{moisture from fresh air}}$	Cantidad de agua en el flujo de aire húmedo del exterior [kg/s]
x_{OUT}	Contenido de humedad del aire exterior [kg/kg]
$m_{\text{moisture combustion air}}$	Cantidad de agua en el flujo de aire húmedo para combustión [kg/s]
m_{RH}	Flujo másico de calor residual recuperado [kg/s]
h_{RH}	Entalpía específica del calor recuperado [kJ/kg]
$m_{\text{moisture flow}}$	Flujo másico de humedad en el aire [kg/s]
Q_e	Calor intercambiado en el evaporador del destilador [kW]
\dot{m}_g	Flujo másico de gases de combustión para destilación [kg/s]
Δh_g	Salto entálpico de los gases de combustión en el destilador [kJ/s]
\dot{m}_v	Flujo másico de vapor en el destilador [kg/s]
Δh_v	Salto entálpico de vaporización en el destilador [kJ/s]
Q_c	Calor intercambiado en el condensador del destilador [kW]
\dot{m}_w	Flujo másico de agua para destilación [kg/s]
Δh_w	Salto entálpico de calentamiento de agua en el destilador [kJ/s]

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 21 de 231



\dot{m}_c	Flujo másico de condensado en el destilador [kg/s]
Δh_c	Salto entálpico de condensación de agua en el destilador [kJ/s]
Q_1	Demanda térmica de la destilación [kW]
$h_{g_in_1}$	Entalpía específica de entrada del calor recuperado en el evaporador del destilador [kJ/kg]
$h_{g_out_1}$	Entalpía específica de salida del calor recuperado en el evaporador del destilador [kJ/kg]
\dot{m}_{ve1}	Flujo másico de vapor hacia el precalentador en celda 1 del destilador [kg/s]
h_{v1}	Entalpía específica de vapor en celda 1 del destilador [kJ/kg]
h_{l1}	Entalpía específica de agua en celda 1 del destilador [kJ/kg]
\dot{m}_{re1}	Flujo másico de agua de celda 1 hacia celda 2 del destilador [kg/s]
\dot{m}_{dp1}	Flujo másico de destilado en el precalentador de la celda 1 del destilador [kg/s]
$h_{w_out_1}$	Entalpía específica de salida del agua de alimentación en el precalentador de la celda 1 del destilador [kJ/kg]
$h_{w_in_1}$	Entalpía específica de entrada del agua de alimentación en el precalentador de la celda 1 del destilador [kJ/kg]
\dot{m}_{vp1}	Flujo másico de vapor en el precalentador de la celda 1 del destilador [kg/s]
\dot{m}_{dp1}	Flujo másico de destilado en el precalentador de la celda 1 del destilador [kg/s]
\dot{m}_{rfi-1}	Flujo másico de agua procedente de la celda anterior del destilador [kg/s]
h_{rfi-1}	Entalpía del agua procedente de la celda anterior del destilador [kJ/kg]
\dot{m}_{vfi}	Flujo másico evaporado en la cámara flash de la celda i del destilador [kg/s]
h_{vfi}	Entalpía de vapor en la cámara flash de la celda i del destilador [kJ/kg]
\dot{m}_{rfi}	Flujo másico agua saliente de la cámara flash de la celda i del destilador [kg/s]
h_{rfi}	Entalpía de agua saliente de la cámara flash de la celda i del destilador [kJ/kg]
\dot{m}_{vi}	Flujo másico de agua evaporada en la celda i del destilador [kg/s]
\dot{m}_{vpi-1}	Flujo másico de vapor procedente del precalentador de la celda anterior del destilador [kg/s]
\dot{m}_{ci}	Flujo másico de agua condensada en el evaporador de la celda i del destilador [kg/s]
Q_i	Calor transferido en la celda i del destilador [kW]
$h_{v_in_i}$	Entalpía específica de vapor en el evaporador de la celda i del destilador [kJ/kg]
$h_{c_out_i}$	Entalpía específica de condensado en el evaporador de la celda i del destilador [kJ/kg]
\dot{m}_{rei}	Flujo másico de condensado en el evaporador de la celda i del destilador [kg/s]
h_{rei}	Entalpía del condensado en el evaporador de evaporador [kJ/kg]
\dot{m}_{vei}	Flujo másico evaporado en el evaporador de la celda i del destilador [kg/s]
h_{vei}	Entalpía del vapor producido en el evaporador de la celda i del destilador [kJ/kg]
\dot{m}_{ci}	Flujo másico de condensado en el evaporador de la celda i del destilador
$h_{w_in_i}$	Entalpía específica de entrada del agua de alimentación en el precalentador de la celda i del destilador [kJ/kg]
\dot{m}_{vpi}	Flujo másico de vapor en el precalentador de la celda i del destilador [kg/s]
h_{vpi}	Entalpía específica del vapor en el precalentador de la celda i del destilador [kJ/kg]
\dot{m}_{dpi}	Flujo másico de destilado en el precalentador de la celda i del destilador [kg/s]
h_{dpi}	Entalpía del destilado en el precalentador de la celda i del destilador [kJ/kg]

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 22 de 231

$h_{w\ out\ i}$	Entalpía del agua de alimentación saliente de la celda i del destilador [kJ/kg]
Q_c	Calor transferido en el condensador del destilador [kW]
$h_{w\ out\ c}$	Entalpía del agua de alimentación saliente del condensador del destilador [kJ/kg]
$h_{w\ in\ c}$	Entalpía del agua de alimentación entrante del condensador del destilador [kJ/kg]
$\dot{m}_{v\ c}$	Flujo másico de vapor entrante al condensador del destilador [kg/s]
$h_{v\ in\ c}$	Entalpía del vapor entrante en el condensador del destilador [kJ/kg]
$\dot{m}_{d\ c}$	Flujo másico de destilado saliente del condensador del destilador
$h_{d\ out\ c}$	Entalpía del destilado saliente del condensador del destilador [kJ/kg]
Q_e	Calor transferido en el economizador del destilador [kW]
$h_{w\ out\ e}$	Entalpía del agua de alimentación saliente del economizador del destilador [kJ/kg]
$h_{w\ in\ e}$	Entalpía del agua de alimentación entrante del economizador del destilador [kJ/kg]
\dot{m}_{ge}	Flujo másico de calor recuperado a través del economizador [kg/s]
$h_{ge\ in\ e}$	Entalpía del destilado en el precalentador de la celda i del destilador [kJ/kg]
$h_{ge\ out\ e}$	Entalpía del destilado en el precalentador de la celda i del destilador [kJ/kg]
$Q_{NG\ total}$	Calor de combustible total [kW]
$Q_{NG\ kiln}$	Potencia de combustible para el horno [kW]
$Q_{NG\ WD}$	Potencia de combustible para el secadero [kW]
$Q_{NG\ HVU}$	Potencia de combustible para la central de calefacción [kW]
$Q_{NG\ abs}$	Potencia de combustible para la máquina de absorción [kW]
$Q_{NG\ lack}$	Defecto de combustible cuando no hay suficiente calor recuperado [kW]
$m_{condensable}$	Flujo másico de agua recuperable [kg/s]
$m_{evaporate\ dryer}$	Flujo másico de vapor a través del secadero [kg/s]
$m_{evaporate\ HVU}$	Flujo másico de vapor de la calefacción de sala [kg/s]
$m_{cond\ NG/RH}$	Flujo másico de vapor de agua en el calor recuperado [kg/s]
$m_{cond\ fresh\ air}$	Flujo másico de vapor en el aire de secado [kg/s]
$m_{process\ water}$	Flujo másico del agua evaporada en los procesos de fabricación [kg/s]
X_{sim}	Variable climatológica escalada con factor de aleatoriedad [kg/kg]
X_{real}	Variable climatológica real [kg/kg]
f_{scale}	Factor de escala entre 0.7 y 1.3 para similar climas más frescos o cálidos
f_{random}	Número aleatorio entre 0 y 1. Afectado de -0.5 y dividido por 10
C_{cf}	Coste de energía en una instalación convencional [€/año]
p_{ng}	Precio del gas natural [€/kWh]
$Q_{tunnel\ kiln}$	Potencia térmica del horno túnel [kW]
$Q_{shuttle\ kiln}$	Potencia térmica del horno intermitente [kW]
$Q_{boilers}$	Potencia térmica de las calderas [kW]
$Q_{HVU's}$	Potencia térmica de las centrales de calefacción [kW]
Q_{dryers}	Potencia térmica de los secaderos [kW]
P_{elec}	Precio de la electricidad [€/kWh]
N_{elec}	Potencia eléctrica [kW]
W_{cf}	Energía primaria consumida en una instalación convencional [kWh/año]
η_{MED}	Rendimiento de la destilación [Adimensional]
Q_{MED}	Potencia térmica de la destilación [kW]
\dot{m}_w	Flujo másico de destilado en la destilación [kg/s]

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez		10/03/2021
		Página 23 de 231



C_{o1f}	Coste de energía en una instalación optimizada con una destilación [€/año]
W_{o1f}	Energía primaria consumida en una instalación optimizada con una destilación [kWh/año]
\dot{m}_a	Flujo másico de aire precalentado para el horno túnel [kg/s]
h_{ap}	Entalpía específica del aire precalentado [kJ/kg]
\dot{m}_{rc}	Flujo másico de aire de enfriamiento rápido en el horno túnel [kg/s]
h_{rc}	Entalpía específica del aire de enfriamiento rápido [kJ/kg]
h_{GTex}	Entalpía específica del gas residual de la turbina [kJ/kg]
Q_{ap}	Potencia térmica de precalentar aire de combustión [kW]
N_{GT}	Potencia eléctrica de la turbina de gas [kW]
$N_{network}$	Potencia eléctrica suministrada por la red eléctrica [kW]
G_{GT}	Consumo térmico de la turbina de gas [kW]
η_{GT}	Rendimiento de la turbina de gas [kW]
$heat_{ratio}$	Relación entre la potencia térmica necesario en la turbina y la electricidad producida [kW]
C_{o2f}	Coste de energía en una instalación optimizada mediante una cogeneración dimensionada por la media eléctrica anual [€/año]
W_{o2f}	Energía primaria necesaria en una instalación optimizada mediante una cogeneración dimensionada por la media eléctrica anual [kWh/año]
C_{o3f}	Coste de energía en una instalación optimizada mediante una cogeneración dimensionada por la mínima energía primaria anual [€/año]
W_{o3f}	Energía primaria necesaria en una instalación optimizada mediante una cogeneración dimensionada por la mínima energía primaria anual [kWh/año]
$V0(i)$	Valores resultantes de la primera capa de la red neuronal
$a0(i)$	Valores de entrada en la primera capa de la red neuronal
$a1(j)$	Valores de entrada en la segunda capa de la red neuronal
$b1(j)$	Componente de sesgo en la segunda capa de la red neuronal
$W1(i,j)$	Coefficientes de correlación en tre la primera y segunda capas de la red neuronal
$V1(j)$	Valor resultante en la segunda capa de la red neuronal
$W2(j)$	Coefficientes de correlación entre la segunda capa y la capa de salida de la red neuronal
$a2$	Valor de entrada en la capa de salida de la red neuronal
$V2$	Valor de salida de la red neuronal
$b2$	Componente de sesgo en la capa de salida de salida de la red neuronal
C_{o4f}	Coste de energía en una instalación optimizada mediante una cogeneración dimensionada por el mínimo coste anualtrica anual [€/año]
Q_{in}	Demanda térmica del sistema exergético [kW]
W_{out}	Potencia eléctrica [kW]
\dot{m}_{in}	Flujo másico de entrada [kg/s]
h_{in}	Entalpía del flujo entrante [kJ/kg]
\dot{m}_{out}	Flujo másico de salida [kg/s]
h_{out}	Entalpía del flujo saliente [kJ/kg]
Ex_f	Exergía del combustible [kW]
Ex_{in}	Exergía de entrada al sistema exergético [kW]
Ex_p	Exergía del producto [kW]
Ex_{out}	Exergía de salida del sistema exergético [kW]

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 24 de 231



Ex_l	Exergía de las pérdidas [kW]
Ex_d	Exergía destruida [kW]
Ex_{gas}	Exergía del combustible [kW]
q_p	Capacidad calorífica específica [kJ/kg/K]
$Ex_{liquid,solid}$	Exergía de flujos líquidos o sólidos [kW]
Ex_{NG}^{ch}	Exergía química del combustible [kW]
LHV_{NG}	Poder calorífico inferior del combustible [kJ/kg]
n_H	Relación molar de H en el combustible [mol]
n_C	Relación molar de C en el combustible [mol]
η_{en}	Rendimiento energético [Adimensional]
E_i	Energía de cada flujo i [kW]
η_{ex}	Rendimiento exergético [Adimensional]
Ex_i	Exergía de cada flujo i [kW]
C_{in}	Coste de la exergía entrante [kW]
C_{out}	Coste de la exergía saliente [kW]
c_{in}	Coste específico de la exergía entrante [€/kW]
c_{out}	Coste específico de la exergía saliente [€/kW]
γ_d	Relación de destrucción de exergía [tanto por unidad]
Ex_{ft}	Exergía total de combustible [kW]
r	Diferencia de coste relativo de exergía [Tanto por unidad]
c_p	Coste específico de los productos [€/kW]
c_f	Coste específico del combustible [€/kW]

ABREVIATURAS

NASA	National Aeronautics and Space Administration
ONU	Organización de Naciones Unidas
EU	European Union
ETS	Emissions Trading System
EASME	Executive Agency for Small and Medium-sized Enterprises
IEE	Intelligent Energy Europe
ISO	International Organization for Standardization
ACIMAC	Association of Italian Manufacturers of Machinery and Equipment of Ceramics
TLCAN	Tratado de Libre Comercio de América del Norte
BRIC	Brasil Rusia India y China
NAFTA	North American Free Trade Agreement
SDEWES	Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems
EIDUNED	Escuela Internacional de Doctorado de la UNED
UNED	Universidad de Educación a Distancia
SCI	Science Citation Index
SSCI	Social Science Citation Index
FECYT	Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología
MED	Multieffect Distiller
OMS	Organización Mundial de la Salud
TDS	Total Dissolved Salts
M1	Mixer 1

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 25 de 231

WD	Ware Dryer
HVU	Heating and Ventilation Unit
AB	Aborption Machine
M2	Mixer 2
M5	Mixer 5
M3	Mixer 3
M6	Mixer 6
M4	Mixer 4
PP	Power Plant
GN	Gas Natural
BO	Boiler
TK	Tunnel Kiln
SK	Shuttle kiln
GT	Gas Turbine
FL	Molds Flushing
JANAF	Joint Army, Navy, Air Force
R.O.	Reverse Osmosis
GRG	Generalized Reduced Gradient
LSA	Least Sqare Adjustment
ANN	Artificial Neural Network
D.O.I.	Digital Object Identifier
AIP	American Institute of Physics
LED	Light Emission Diode
PMF	Plaster Mold Factory
RMF	Resine Mold Factory
ORC	Organic Rankine Cycle
WHO	World Health Organization

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 26 de 231

1 PREÁMBULO



Las diferencias observadas en el clima de la Tierra desde principios del siglo XX demuestran que está cambiando a un ritmo sin precedentes durante décadas o milenios. Entre otros factores naturales, parece ser el resultado de la actividad humana (más del 95% de probabilidad) como afirma la NASA (“NASA Climate Change,” 2019).

El nivel de concentración de CO₂ en la atmósfera es hoy en día el más alto en 650.000 años. Nunca había superado las 300 ppm antes del año 1950. En 2005 era de 378 ppm y ha estado creciendo hasta ahora a una tasa de 2,8 ppm / año. Por otro lado, la temperatura está subiendo 0.2 grados centígrados por década desde 1950. Como consecuencia, el hielo marino ártico se está reduciendo 12,8% por década y las capas de hielo pierden más de 100 Gigatoneladas por año. Por lo tanto, el nivel del mar ha aumentado 178 mm en los últimos 100 años y ha estado creciendo a una tasa de 3,3 mm por año desde 1993. Estos hechos proporcionan parte de los datos científicos necesarios para comprender el cambio climático y evaluar el impacto de los esfuerzos para combatir eso. Depende de la comunidad global: el público, los encargados de la toma de decisiones y las políticas y las agencias científicas y de planificación de todo el mundo decidir la forma de llevarlo a cabo.

En 1992, la ONU adoptó la Convención Marco sobre el Cambio Climático para estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que evitaría interferencias antropogénicas peligrosas con el sistema climático. Este tratado se extendió a Kioto en 1997. En 2015, el Acuerdo de París estableció el objetivo a largo plazo de mantener el aumento de la temperatura media global muy por debajo de 2 °C por encima de los niveles preindustriales; y limitar el aumento a 1,5 °C, ya que esto reduciría sustancialmente los riesgos y efectos del cambio climático.

En este contexto, la Unión Europea (UE) se ha fijado objetivos para reducir progresivamente sus emisiones de gases de efecto invernadero hasta 2050 (“European Commission - PRESS RELEASES - Press release - Sustainable Development: EU sets out its priorities,” 2016). Los objetivos clave de clima y energía se establecen en tres etapas o paquetes (“European Commission - PRESS RELEASES - Press release - 2030 climate and energy goals for a competitive, secure and low-carbon EU economy,” 2016):

- Paquete de clima y energía 2020. El paquete establece tres objetivos clave:
 - Reducción del 20% en las emisiones de gases de efecto invernadero (desde los niveles de 1990)
 - 20% de la energía de la UE procedente de energías renovables.
 - Mejora del 20% en la eficiencia energética.



 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 27 de 231

Estos objetivos generalizados, se instrumentalizan mediante diferentes acciones enmarcadas en diferentes áreas de actuación entre las que se incluyen:

- Sistema de comercio de emisiones (ETS). Esta es una herramienta clave para cumplir el objetivo, ya que cubre el 45% de las emisiones totales de efecto invernadero. Se ha establecido que será un 21% más bajo que en 2005
- Objetivos nacionales de reducción de emisiones. Cubren el 55% de las emisiones y difieren según la riqueza nacional.
- Energía renovable - objetivos nacionales. Los países miembros de la UE también han asumido objetivos nacionales vinculantes para aumentar la participación de las energías renovables en su consumo de energía para 2020, en virtud de la Directiva sobre energías renovables
- Innovación y financiación. La UE apoya el desarrollo de tecnologías bajas en carbono
- La eficiencia energética se incrementará mediante un Plan y una Directiva.
- Beneficios Al cumplir los objetivos, se mejorará la competitividad, la seguridad laboral del suministro de energía y un crecimiento verde adecuado
- Marco climático y energético para 2030. Los objetivos clave para 2030 son:
 - Al menos un 40% de reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero (desde los niveles de 1990)
 - Al menos 32% de cuota para energía renovable. Este valor fue revisado del 27%
 - Al menos 32.5% de mejora en eficiencia energética
- Estrategia a largo plazo para 2050. El objetivo final es ser un área climáticamente neutral donde las emisiones de efecto invernadero estén en niveles antes del desarrollo industrial en 1950.

En este sentido, EASME creó la IEE para crear un futuro inteligente en cuanto a energía para todos nosotros. Apoyó las políticas de eficiencia energética y energías renovables de la UE, con miras a alcanzar los objetivos de la UE 2020.

Dentro de este marco legal, las empresas productivas deben abordar su modernización en términos de consumo de recursos (Bonacina et al., 2015). No es ya sólo el ahorro de energía, agua y su coste sino más bien un asunto legal o normativo (Bigerna et al., 2016). El término "*gestión de energía*" se está convirtiendo en una herramienta muy prometedora para reducir los costes directos de energía y otros relacionados (Schulze et al., 2016). Aunque la gestión de la energía es crucial en la red industrial actual, algunos autores consideran una perspectiva más amplia del concepto que incluye otros recursos, materias primas y reducción de emisiones de CO₂, por ejemplo. Se pueden aplicar indicadores para cuantificar la sostenibilidad ambiental de la sustitución de materias primas (Bontempi, 2017). La energía incorporada y la huella de CO₂ son indicadores adecuados

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 28 de 231



para evaluar la sostenibilidad de las materias primas. En esta investigación, el agua se incluye como un recurso valioso a tener en cuenta como plantean las publicaciones 2 “Heat recovery in sanitary-ware industry applied to water and energy saving by multi-effect distillation” y 3 “Reduction of Water and Energy Consumption in Sanitary-Ware industry by Absorption Machine Operated with Recovered Heat”.

Debido al aumento del precio de la energía y al interés mundial en la sostenibilidad, el desarrollo de la gestión de recursos está desempeñando un papel importante como función de apoyo en las empresas industriales. El impacto de la energía en el coste final determina una creciente relevancia a la gestión de costes. Hay algunos factores clave de los que depende el plan de gestión (Sa et al., 2017). A tal efecto se han creado muchas empresas nuevas que abordan cuestiones relacionadas con la energía durante los últimos años. De hecho, ISO lanzó en junio de 2011 la norma ISO 50001, derivada de ISO 9001 que se refiere a los sistemas de gestión de energía. La norma tiene como objetivo ayudar a las organizaciones a reducir continuamente su uso de energía y, por tanto, sus costes y sus emisiones de gases de efecto invernadero asociados (Giacone and Mancò, 2012).

En la fabricación de cerámica, la energía puede representar hasta el 30% del coste total de producción. Debido a gran demanda de recursos, su precio y la regulación de las emisiones de CO₂, los fabricantes de cerámica se enfrentan a barreras económicas y legales para poder desarrollar su actividad con un modelo de negocio sostenible. Actualmente, el programa Horizonte 2020 de la UE apoya la investigación, la demostración y la adopción de tecnologías eficientes en el mercado. CERAMIN ha sido el proyecto particular dirigido a la industria cerámica dentro de este programa (“CERAMIN PROJECT: Energy saving concepts for the European ceramic industry,” 2009). En esta línea, la presente tesis tiene como objetivo colaborar en la aportación de conocimiento tecnológico dedicado a tal fin.

Como conclusión, se puede decir que la gestión y operación del sistema energético de una empresa es de gran importancia para posicionarse como líder en el mercado, proporcionando una vida de la empresa a largo plazo sostenible y reduciendo los costes de producción, con la consiguiente reducción del impacto ambiental.

Otros factores importantes que afectan el cambio climático son el consumo de agua (“Sequía y consumo excesivo de agua en Europa — Agencia Europea de Medio Ambiente,” n.d.), la falta de agua (“Escasez de agua en la union europea,” 2010) y las descargas de efluentes. En un futuro cercano, el agua podría convertirse en un recurso escaso, por lo que muchas regiones podrían comenzar a experimentar su suministro como un problema. La UE se está concienciando especialmente sobre este asunto, dedicando programas de apoyo específicos para el desarrollo de tecnologías y la protección del medio ambiente (“LIFE_ENVIP.pdf,” 2012). Aunque se están dedicando esfuerzos de investigación a este tema (Colmenar-Santos et al., 2016b), dentro de este marco de reformas energéticas y ambientales, surge la necesidad de que los países comiencen el desarrollo legal y

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 29 de 231

normativo para facilitar el cumplimiento de su compromiso (Thollander et al., 2015). Es de conocimiento común que el agua se está convirtiendo en un recurso escaso. Durante las últimas décadas, la demanda de agua aumentó significativamente debido a muchas razones, y tanto los gobiernos como los ciudadanos deberían tomar conciencia y empezar a aplicar medidas estrictas para superar esta escasez global.



El Blueprint describe acciones que se concentran en una mejor implementación de la legislación vigente sobre el agua, la integración de los objetivos de la política del agua en otras políticas y en llenar los vacíos en particular en lo que respecta a la cantidad y la eficiencia del agua. El objetivo es garantizar que haya una cantidad suficiente de agua de buena calidad disponible para las necesidades de las personas, la economía y el medio ambiente en toda la UE.

El horizonte temporal del Blueprint del agua está estrechamente relacionado con la Estrategia 2020 de la UE y, en particular, con la Hoja de ruta de eficiencia de recursos de 2011, de la cual el Blueprint es el hito del agua. Sin embargo, el análisis que sustenta el Plan abarca un período de tiempo más largo, hasta 2050, y se espera que impulse la política de agua de la UE a largo plazo.

El 25 de abril de 2014, un artículo publicado por “*Scientific American Review*” se refería a la escasez de agua como un desafío para el desarrollo empresarial mundial con el titular; “La creciente escasez de agua dulce debido a la creciente demanda de agua y un clima cambiante se considera cada vez más como un riesgo importante para la economía global. La sensibilización del consumidor, las iniciativas del sector privado, la regulación gubernamental y las inversiones específicas son urgentes para avanzar hacia el uso sostenible del agua (Arjen Y. Hoekst, 2014)”.



Después de estas consideraciones, se puede concluir que los consejos de administración de las corporaciones deberían reflexionar profundamente sobre la gestión del agua tan profundamente como se hace respecto a la energía desde el punto de vista teórico (Roberts, 1978) o desde el punto de vista del consumo real (Owen et al., 2017). Una contabilidad de gestión ambiental es un medio por el cual la empresa puede administrar más fácilmente su desempeño ambiental y económico (Christ and Burrirt, 2017) y debería tener en cuenta la huella hídrica del proceso en el que se basa su producción. La contabilidad de gestión de agua corporativa es una extensión recientemente propuesta a la contabilidad de gestión ambiental diseñada para apoyar las decisiones de gestión corporativa y mejorar los resultados comerciales tanto económicos como ambientales relacionados con el agua (Christ and Burrirt, 2017).

Se debe desarrollar un modelo adecuado para promover el consumo y la producción sostenibles que fomenten una industria más rentable y más limpia. Como se indica en (Shao et al., 2016), cada sector industrial tiene su propio conjunto de atributos de sostenibilidad que lo hacen más limpio. Cuando los combustibles fósiles

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 30 de 231

se utilizan para generar electricidad, una parte importante de la energía primaria se entrega al medio ambiente como energía térmica residual. Esta energía residual podría reutilizarse para el tratamiento del agua ya sea de microplantas (Cioccolanti et al., 2015) o macroplantas (Cuviella-Suárez et al., 2012).

Dentro de este contexto normativo, esta tesis aporta una herramienta de gestión medioambiental en un sector industrial intensivo en consumo de recursos energéticos e hídricos cuya contribución a las emisiones globales es relevante. Trata, asimismo de dotar a las instalaciones de producción de cerámica sanitaria con una metodología específica para la mejora continua de la eficiencia y sostenibilidad.

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 31 de 231

2 INTRODUCCIÓN

En esta sección se analiza el estado del arte en el campo de la fabricación de artículos sanitarios, así como el impacto global de este sector industrial en todo el mundo. La fabricación de la industria cerámica requiere una gran cantidad de energía y agua. Su sostenibilidad e impacto ambiental exige un esfuerzo para desarrollar tecnologías más eficientes que posibiliten la reducción del consumo de recursos. La industria cerámica general ha sido tratada desde el punto de vista energético. Existe mucha investigación sobre la fabricación de cerámica plana, pero pocos artículos o documentos sobre sanitarios desde la perspectiva de la gestión del nexo entre el agua y la energía. En este sentido, el sector de producción de artículos sanitarios presenta unas características especiales de consumo en su proceso de fabricación caracterizadas por los niveles de demanda de térmica a través de los diferentes subprocesos de modo que los residuos de calor de algunos de son muy adecuados para ser aprovechados en otros permitiendo una fácil reutilización de recursos. La presente tesis parte de la coyuntura de esta caracterización tan adecuada para integrar una serie de acciones complementarias e interrelacionadas con un objetivo final de aumentar la eficiencia de los recursos y disminuir el impacto ambiental. Estas acciones son abordadas individualmente en cada una de las publicaciones en las que se basa la tesis conformando un agregado de soluciones intrínsecamente ligadas entre sí dentro de un esquema general de integración para optimizar el desempeño de la sostenibilidad en un sector industrial cuya investigación en este campo es muy limitada o casi inexistente.

2.1 CONSUMOS DE AGUA Y ENERGÍA EN EL SECTOR DE LA CERÁMICA SANITARIA

La energía se consume esencialmente tanto en forma térmica como eléctrica. La energía térmica se consume principalmente durante la cocción en el horno, el secado de productos y ambientación psicrométrica. Actualmente, la demanda térmica en fábricas modernas se basa en el gas natural (Akinbode, 1995). La electricidad se consume en toda la secuencia de procesos para transportar, mezclar, dosificar, y manipular material y producto. Los sistemas de iluminación también requieren electricidad.

La figura 1 muestra una distribución típica del consumo de energía en una fábrica de cerámica.

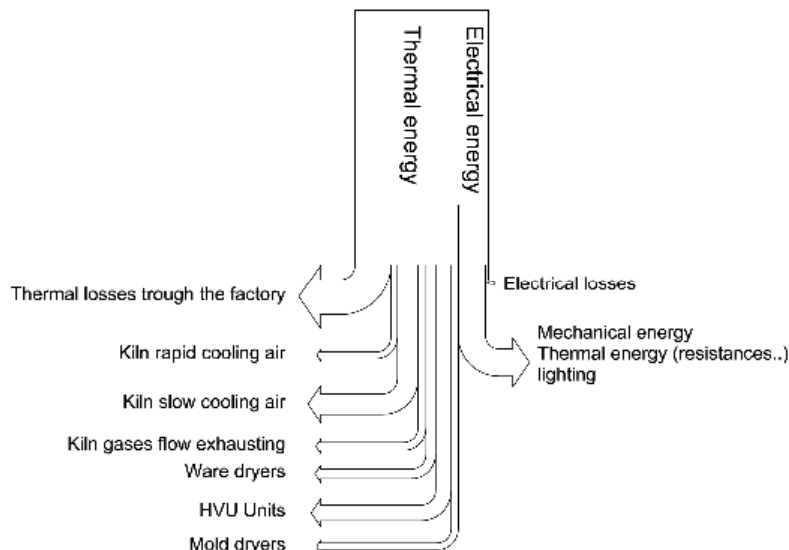


Figura 1. Distribución típica de consumos energéticos en una fábrica de cerámica Fuente (Cuviella-Suárez et al., 2018).



La calidad del agua es esencial para la preparación de arcillas y esmaltes. Además, se utiliza como medio de lavado y de enfriamiento. Las técnicas de reutilización de aguas residuales procesadas tienen en cuenta diferentes calidades de agua para cada proceso. Es decir, de acuerdo al fin del agua reciclada, se trata con más o menos intensidad.

A pesar de los nuevos avances técnicos que mejoran el consumo específico de energía, todavía queda un largo camino por recorrer para alcanzar proporciones admisibles de consumo (Weisser, 2007).

La tabla 1 muestra la mejora del consumo específico de energía en la industria cerámica en Europa destacando la relevancia de la cerámica sanitaria en el conjunto. En la actualidad está revisándose el documento de referencia de las mejores técnicas disponibles del que se espera una actualización para final del año 2021.

Tabla 1. Consumo energético específico en la industria cerámica en la Unión Europea. Fuente (“Reference Document on Best Available Techniques in the Ceramic Manufacturing Industry,” 2007)

SECTOR	UNIT	1980	1985	1990	1995	2000	2003
Bricks and roof tiles	GJ/t	2.65	2.45	2.19	2.06	2.38	2.31
Walls and floor tiles	GJ/t	11.78	9.16	6.76	5.45	5.74	5.60
Refractory products	GJ/t	4.88	4.96	6.51	4.91	5.41	5.57
Sanitary-ware	GJ/t	26.56	24.21	22.27	22.76	20.88	21.87
Vitrified clay pipes	GJ/t			5.75	5.77	6.10	5.23
Tabla and ornamental ware	GJ/t			47.56	38.91	43.46	45.18
Technical ceramics	GJ/t					34.72	50.39

 	Tesis Doctoral		
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂			
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez		10/03/2021	Página 33 de 231

Asumiendo que los accesorios sanitarios tengan un peso promedio de más de 10 kg, la energía total para producir estas piezas es lo suficientemente grande como para ser tenida en cuenta a nivel global. La tabla 2 muestra el consumo de energía para tres fábricas de artículos sanitarios con ciertas variaciones debidas a las diferentes tecnologías aplicadas.

Tabla 2. Consumo energético específico en tres plantas de cerámica sanitaria. Fuente: (“Reference Document on Best Available Techniques in the Ceramic Manufacturing Industry,” 2007)

PARAMETER	UNIT	PLANT 1	PLANT 2	PLANT 3
Production capacity	t/yr	10,000	5,120	2,900
Raw material use	t/yr	17,000	7,801	3,500
Electrical energy consumption	MJ/kg product	0.36	3.32	3.16
Thermal energy consumption	MJ/kg product	30	22	28

Desde un punto de vista ambiental, una fábrica de artículos sanitarios puede consumir hasta 130.000 m³ de agua por año para producir alrededor de 500.000 piezas (“LIFE_ENVIP.pdf,” 2012). Los cálculos de energía y emisiones suponen 360 MJ y 27 kg de CO₂ por pieza, lo que muestra cuán importante puede ser el impacto ambiental de la producción de artículos sanitarios.

(Lv et al., 2019) analiza el ciclo de vida útil y su coste para una fábrica de productos sanitarios cerámicos en China con los siguientes resultados que se muestran en la tabla 3:



Tabla 3. Consumos específicos de una fábrica de sanitario. Fuente: (Lv et al., 2019).

	Electricity MJ/kg product	Thermal MJ/kg product	Water kg/kg product
Consumption	1.56	13.06	15.60

De acuerdo con el documento sobre las mejores técnicas disponibles en la industria de fabricación de cerámica revisado en agosto de 2007 (“Reference Document on Best Available Techniques in the Ceramic Manufacturing Industry,” 2007) en su apartado 2.2.4.5., el proceso más utilizado en la fabricación de productos sanitarios cerámicos es el colado de barbotina, ya sea convencional en moldes de yeso o más modernamente a presión elevada en moldes de resina.

2.2 PRODUCCIÓN MUNDIAL DE CERÁMICA SANITARIA

Actualmente, en Europa, la industria de la cerámica emplea a 338,000 personas y proporciona un volumen de negocio de 27,8 mil millones de euros (“Ceramics - Growth - European Commission,” 2017). En 2008, el negocio cerámico europeo alcanzó un valor de 28 mil millones de euros y el mercado mundial de la cerámica tiene un valor de 120 mil millones de euros (“Growth - European Commission - Publications 2008,” 2008). Las cifras apenas han cambiado.

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 34 de 231

En 2002, la facturación de la industria sanitaria europea era de 2.000 millones de euros (“Bulletin of Ceramic Spanish Society,” 2004). Hoy en día, es de alrededor de 1.670 mil millones de euros (“ceramic-industry-roadmap-paving-the-way-to-2050.pdf,” 2012) y representa el 9% del empleo en cerámica.

La producción está liderada por cinco países productores principalmente (figura 2):

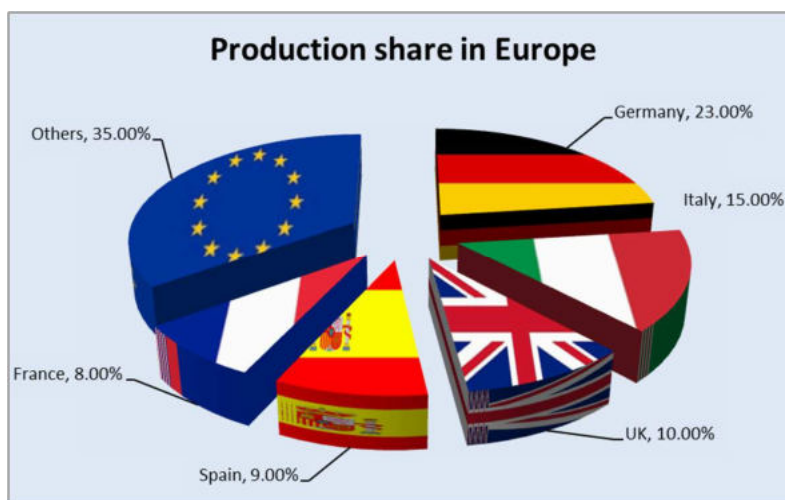




Figura 2. Producción de cerámica sanitaria en la Unión Europea. Fuente: Competitiveness of the Ceramics Sector (“Growth - European Commission - Publications 2008,” 2008)

Según ACIMAC (“Ceramic World Review 114/2015,” 2015), la Unión Europea produjo 44,6 millones de piezas en 2004 y 41,5 en 2014. Aunque la crisis de 2008 ha reducido el ritmo de producción en Europa, éste aún sigue siendo muy relevante. El estudio muestra que 216,6 millones de piezas fueron producidas mundialmente en 2004, aumentando a 349,3 millones en 2014.

La producción mundial de artículos sanitarios aumentó 61,3% de 2004 a 2014, a una tasa creciente de 4,9% por año.

Asia ha sido la mayor área de producción. Actualmente representa aproximadamente el 50% de la producción mundial. Casi el 70% de esta cuota corresponde a China, que es el mayor productor mundial. Sin embargo, los mayores crecimientos corresponden a África, Medio Oriente y América del Sur, donde Brasil es el productor más relevante.

Estas cifras justifican las disminuciones en la UE (Unión Europea) y el TLCAN (Tratado de Libre Comercio de América del Norte, NAFTA según el acrónimo en inglés) debido a los desplazamientos de la globalización y las regiones de producción. Hay que destacar que el TLCAN disminuya a pesar del crecimiento del importante crecimiento de México que casi ha triplicado su producción.

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 35 de 231

Por otro lado, las regiones BRIC (Brasil, Rusia, India y China) y al Next-11 (Bangladesh, Egipto, Indonesia, Irán, México, Nigeria, Pakistán, Filipinas, South Korea, Turquía y Vietnam) tienen tasas de crecimiento relativamente importantes durante la década (74 y 108%) respecto a un moderado aumento de 27% en los anteriores.

La producción mundial de artículos sanitarios también se concentra cada vez más en manos de unos pocos grupos multinacionales muy grandes. Se estima que actualmente, los 20 grupos principales (excluyendo aquellos en China) producen más del 43% de la producción mundial total.

Tabla 4. Producción mundial de cerámica sanitaria por región. Fuente: (“Ceramic World Review 114/2015,” 2015)

AREA	2004	2014	% on total	% on total
	Piezas (million)	Piezas (million)	2004	2014
Asia	93.1	172	42.98%	49.24%
EU	44.6	41.5	20.59%	11.88%
South America	14.6	38.5	6.74%	11.02%
Middle East	12	33.8	5.54%	9.68%
NAFTA	33.9	28	15.65%	8.02%
Other Europe	12.1	17.5	5.59%	5.01%
Africa	4.4	16	2.03%	4.58%
Oceania	1.9	2	0.88%	0.57%
WORLD	216.6	349.3	100.00%	100.00%

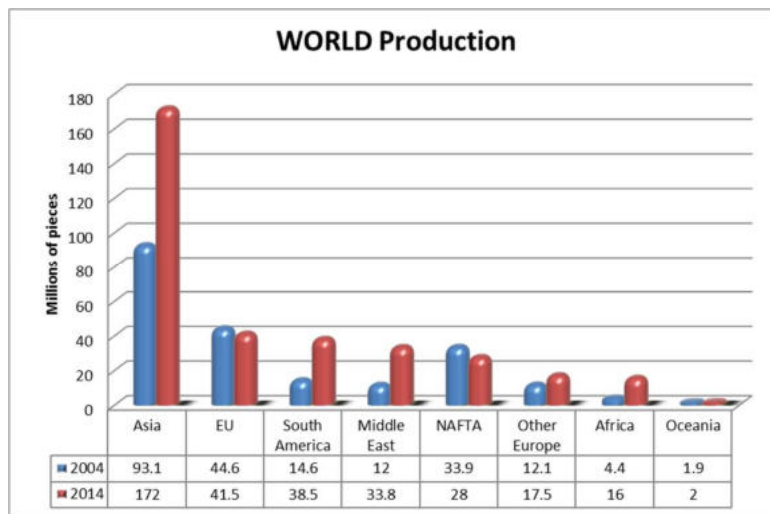




Figura 3. Producción mundial de cerámica sanitaria por región. Fuente: (“Ceramic World Review 114/2015,” 2015)

En este escenario de producción industrial para el sector sanitario y suponiendo un promedio de 10 kg por pieza, se puede deducir de las tabla 3 y tabla 4 que se necesitan alrededor de 54 Mm³ de agua, 51 PJ en todo el mundo para producir sanitarios generando 8,36 Mt CO₂. Estas cifras deberían llamar la atención de cualquiera sobre este sector industrial, tan sensible al impacto del precio de la energía.

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 36 de 231

La industria cerámica en general ha sido objeto de mucha investigación (Ciacco et al., 2017). Sin embargo, no se dedica mucha investigación específicamente a la fabricación de artículos sanitarios. Este sector industrial es particularmente interesante desde el punto de vista térmico. La gran potencia térmica requerida para fabricar artículos sanitarios se requiere en diferentes subprocesos de la fábrica a diferentes niveles térmicos. De hecho, la temperatura y la cantidad de calor residual de la cocción es muy adecuada para suministrar otros procesos de calentamiento como el secado o el calentamiento. (Christos, Agrafiotis and Theocharis, Tsoutsos, 2001). Como se sugiere en (Rehfeldt et al., 2018), la demanda térmica es requerida en diferente grado de temperatura en la industria europea en general. In 2012, 1035 TWh fueron consumidos por encima de los 500 °C, 706 TWh en el rango de 100-500 °C and 228 TWh por debajo de 100 °C.

2.3 PROCESO GENERAL DE PRODUCCIÓN DE LA CERÁMICA SANITARIA

El proceso general de producción de la industria cerámica sanitaria consiste en múltiples sub-procesos u operaciones básicas industriales como se muestra en la figura 4.

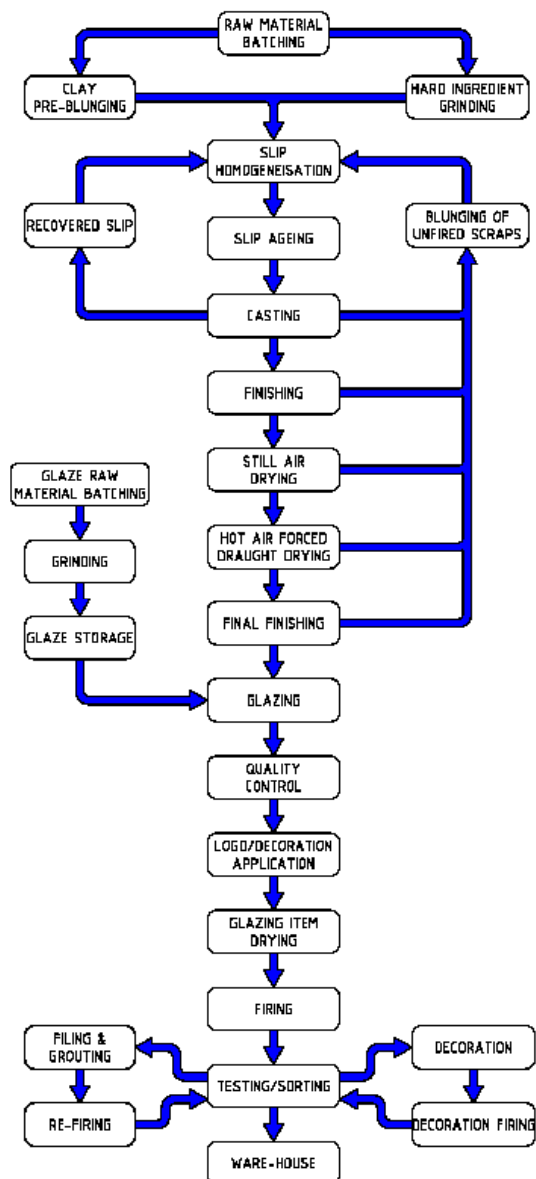






Figura 4. Proceso general de producción de cerámica sanitaria. Fuente: (*Ceramic Technology Sanitary-ware*, 2010)

La producción de cerámica no es el objeto de esta tesis, sino el análisis de las necesidades de energía y agua, así como su reducción. A este respecto, (King, Alan G., 2001) presenta un tratado muy apropiado orientado a la producción y sus operaciones. A continuación, se describen brevemente estas operaciones básicas:

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 38 de 231

- Las materias primas no plásticas se muelen y mezclan con material plástico en un molino de bolas donde se homogenizan en medio acuoso. A veces, la calidad requerida del agua exige un tratamiento de eliminación de sales disueltas, generalmente por ósmosis inversa.
- Posteriormente, la fórmula predefinida se ajusta y homogeniza en un turbo agitador hasta obtener las condiciones reológicas adecuadas.
- La barbotina resultante se cuele en moldes de yeso o resina, donde parte del agua se elimina por filtración a través del yeso o resina. Este molde debe lavarse con agua tibia y sin sales para limpiarlo. Por lo general, esta agua se pre-trata, generalmente por ósmosis inversa desde dónde es suministrada a las calderas donde se calienta.
- La pieza moldeada se extrae y se deja dentro de la sala de colado para liberar una pequeña parte de humedad y asentar la consistencia de las paredes antes de poder moverse o trabajar sobre la pieza previo a la entrada en secadero. El entorno higrotérmico de la sala debe mantenerse dentro del rango establecido por medio de unidades de calefacción y humectación.
- Posteriormente, las piezas son trasladadas a los secaderos donde el ambiente higrotérmico se mantiene nuevamente dentro de un rango preestablecido. En los secaderos se ha de eliminar toda la humedad contenida en la pieza verde antes de pasar al proceso de cocción en el horno para evitar problemas de ebullición que afectan gravemente a la calidad de producción.
- Finalmente, las piezas son introducidas en el horno para ser cocidas después de rociar una fina capa de esmalte que posteriormente les conferirá el habitual aspecto vitrificado. El propósito del horno es aumentar la temperatura de la cerámica hasta 1.250 °C para producir la sinterización de la cerámica y la vitrificación del esmalte. Inmediatamente después de obtenida esta temperatura comienza el proceso de enfriamiento en una sucesión de etapas de manera controlada para permitir los procesos químicos dentro de la cerámica. El proceso de cocción puede resultar en general exotérmico.

El proceso general es esencialmente el mismo en todas las tecnologías diferentes. La única diferencia notable que se puede encontrar se refiere al colado de la barbotina. En particular, el material del que están hechos los moldes. Tanto el yeso como las resinas son los dos medios de filtración comunes para moldear la barbotina. En relación a este último aspecto, esta tesis define los dos modelos de producción acorde a las dos tecnologías que representan prácticamente la totalidad del espectro de aplicaciones para la fabricación sanitaria cerámica.

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 39 de 231



2.4 TIPOS DE FABRICAS SEGÚN LA TECNOLOGÍA DE COLADO

Cuando se inicia una planificación para administrar la gestión del consumo de recursos, se debe entender el proceso global desde la perspectiva que corresponde. La línea de producción puede parecer bastante diferente según el observador y la finalidad del análisis. Cuando se observa desde el punto de vista del consumo, los parámetros y las variables no son los mismo que los que corresponderían a una perspectiva financiera o de producción. En este sentido, la imagen de la fábrica debe dibujarse con una localización y cuantificación adecuada de puntos los puntos de consumo. Las cantidades, la forma en que éstas han de ser suministradas, los residuos, los flujos de masa y energía, etc., son magnitudes que deben tenerse en cuenta con precisión. Por lo tanto, para el propósito de esta tesis, la fábrica se ha enfocado como una secuencia de consumos de agua y energía en cada uno de los procesos individuales y las posibles conexiones energéticas o hídricas tanto existentes como potenciales entre ellos.

Inicialmente se ha descrito el proceso general se para, posteriormente, analizar pos separado los diferentes procesos individuales y finalmente se evaluarán desde un punto de vista energético para integrar la eficiencia en la totalidad del sistema como sugiere (Petek et al., 2016). Como los artículos sanitarios son un producto con elevado consumo de calor y agua en varias etapas sucesivas de producción, el consumo se calculará para cada paso y luego se estudiará la forma de vincular los residuos de calor de un proceso a otro cuyos requisitos de calor sean menores y así reducir el consumo global. En (Zhang, 1997), como ejemplo de producción cerámica, se ha realizado un análisis similar para una fábrica de ladrillos en China.

2.4.1 Tecnología tradicional. Moldes de yeso

Antes de la aparición de los moldes de resina, la tecnología más habitual era la de colado en moldes de yeso de la cual aún quedan muchas instalaciones activas. El yeso extrae el agua de la barbotina, lo que reduce los niveles de humedad desde un 48% en base seca hasta un 22-24% después del tiempo de colado, que puede variar desde unos minutos hasta una hora, dependiendo del tamaño de la pieza. Pasado este tiempo, el molde se abre y la pieza se retira a la humedad deseada. Este es un proceso cíclico en el que el molde tiene que liberar el agua absorbida, lo que hace que este paso del proceso sea el punto más débil de esta tecnología, ya que dependiendo de la forma en que se seque el molde, su capacidad para eliminar agua nuevamente variará. En el caso de que no se seque adecuadamente, el molde no será capaz de actuar eficientemente en el siguiente ciclo. Pero la curva de secado del molde debe ser cuidadosamente seleccionada. Si el secado es rápido, la corriente de capilaridad a través de las paredes del molde podría cortarse y el agua no podrá alcanzar la superficie del molde de yeso evitando el secado completo. Por otro

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 40 de 231

lado, si el secado es demasiado lento, el molde no se secará lo suficiente para el próximo ciclo. El secado del molde de yeso es, en consecuencia, un factor limitante crítico para obtener una alta productividad que en la actualidad raramente supera los dos ciclos por molde y día. La exigencia de requisitos de secado supone un control del entorno psicrométrico de la sala de colado que debe mantenerse dentro de condiciones específicas de temperatura y humedad para lograr el ciclo de secado adecuado. Las principales diferencias en este ambiente para las dos tecnologías analizadas se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Parámetros ambientales en la sala de colado. Fuente: (Ceramic Technology Sanitary-ware, 2010)

	Temperature °C	Humidity %	Water flushing dm ³ /(mold·cast)
PLASTER	40	50	5
RESIN	25	75	180



2.4.2 Tecnología moderna. Moldes de resina

A medida que el estado del arte de los materiales sintéticos ha evolucionado y las resinas, en concreto se han desarrollado, se ha favorecido la implantación de una tecnología alternativa para aumentar la productividad. Cuando el molde de yeso se reemplaza por un molde de resina, la productividad aumenta en gran medida ya que este molde puede liberar el agua capilar simplemente soplando aire comprimido. Por lo tanto, la productividad de un molde de resina puede alcanzar hasta 80 piezas por día, dependiendo del tamaño. El punto débil de esta tecnología es el desperdicio de agua producido durante el lavado del molde. Para cada ciclo, el molde debe lavarse permitiendo que fluya agua limpia a través de él, de modo que toda la sal retenida a lo largo de los capilares se elimine para evitar la acumulación de sales que terminaría bloqueando la succión de capilaridad. El agua necesaria para lavar el molde puede alcanzar 180 dm³ por ciclo y por molde, dependiendo del tamaño del molde. Además, esta agua debe estar libre de sales, por lo que debe tratarse previamente mediante ósmosis inversa o destilación. Como resultado de esto, la fabricación con moldes de resina exige menos energía que la de yeso, pero más agua como puede apreciarse en la tabla 6 donde se reflejan los diferentes equilibrios de recursos para ambas tecnologías.

Tabla 6. Consumo comparativo de energía y agua para las dos tecnologías estudiadas (Fuente: Elaboración propia)

Nº Piezas	500,000 piezas/año		
	Eléctrico	Térmico	Agua
Consumo	GJ/año	GJ/año	m ³ /año
Colado yeso	34.077	132.692	30.329
Colado presión	27.360	115.117	240.201

Las resinas porosas se han utilizado como material alternativo para la fabricación de moldes durante varias décadas, y su uso ha coincidido con la introducción de presiones de colado cada vez más altas. Hoy, las

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 41 de 231

presiones de 1,3-1,5 MPa son comunes. Las resinas funcionan como filtros, reteniendo el contenido sólido de la barbotina mientras extraen el agua. El colado a presión con moldes de resina ha permitido tiempos de ciclo de colado más cortos, superficies de áreas de producción más compactas y requisitos de mano de obra significativamente menores. Sin embargo, las altas presiones y la complejidad de estos ciclos controlados automáticamente han llevado al desarrollo de máquinas que requieren una inversión económica considerable. Por lo tanto, su uso solo puede justificarse cuando el rendimiento es particularmente alto y la combinación de productos no es demasiado amplia. La eficiencia requiere un mínimo de repetitividad de producto con el mismo molde.

En la mayoría de los casos, las resinas mismas dictan el uso de altas presiones. Se utilizan dos tipos de resinas para el colado a presión: microporosas y macroporosas. Las primeras tienen un diámetro de poro promedio de no más de 10 micras, mientras que las segundas normalmente tienen diámetros de poro promedio de alrededor de 20 micras. Sin embargo, ambos tipos de resina tienen una capacidad de formación de espesor muy baja o inexistente (en el caso de las resinas macroporosas), es decir, una capacidad muy baja para eliminar el agua contenida en el deslizamiento, como se muestra en la tabla 7 salvo que la presión sea elevada.



Tabla 7. Comparación de resinas porosas habituales en la producción de cerámica sanitaria. Fuente: (SACMI resins specifications)

Porous resin type	Working pressure	Avg. Pore diameter	Open porosity	Outflow rate ¹	Thickness forming power (atmospheric pressure) ²
	10 ⁵ Pas	µm	%	dm ³ /min	60 min
Low pressure	0-1	0.5	45-50	0	120-130 %
		1.0	45-50	0	100-110 %
		1.5	45-50	0.17	75-85 %
Microporous resin 1 (SACMI-POR)	6-13	5-7	27-37	25	40%
Microporous resin 2 (Other)	13	5-10	27-28	33.3	30%
Macroporous resin 1 (SACMI-POR)	13	20-25	28-29	250	<7 %
Macroporous resin 2 (Other)	13	20-26	30-32	250	<7 %

1 – Refers to a resin thickness of 2 cm with filtration cross-section of 40 cm² at a dynamic water pressure of 4•10⁵ Pa

2 – Calculated by casting at atmospheric pressure and comparing data with plaster performance (which was assigned a value of 100)

En la última columna de la tabla, la capacidad de formación de espesor (a presión atmosférica) para varias resinas se compara con la del yeso durante un período de 60 minutos. El espesor formado por el yeso se define como 100 y actúa como el número de referencia para los valores asignados a los otros materiales. De la tabla se desprende que la capacidad de formación de espesor de las resinas microporosas es del 30-40% de la capacidad del yeso, mientras que las resinas macroporosas no alcanzan ni siquiera la marca del 10%. En consecuencia, si se produce un artículo sanitario utilizando un molde de resina, es absolutamente

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 42 de 231

necesario aplicar una cierta presión (de 0,6-0,7 MPa hacia arriba) en la alimentación de barbotina. A presiones más bajas, los tiempos de formación serán inaceptablemente largos.

Las técnicas de colado a presión actuales han alcanzado niveles de fiabilidad y calidad que hacen que su aplicación sea imperativa donde las condiciones de fabricación, los volúmenes de producción y el “*mix*” del producto lo permitan. Cuando no se dan estas condiciones o se han logrado solo parcialmente, la tecnología de colado a presión no proporciona rendimientos adecuados que justifiquen la gran inversión inicial. Este problema es particularmente evidente en la producción de inodoros y bidés, artículos complejos que solo pueden producirse en moldes de cuatro o cinco partes. Los fabricantes, a menudo no logran el volumen de producción o los umbrales de “*mix*” de producto que justifiquen el uso de moldes de resina.



En (Matsumoto, 2015) se explican algunos de los diversos beneficios del uso de la tecnología de resina frente al moldeo convencional. No obstante, y como ya se ha mencionad, esta tecnología es intensivamente consumidora de agua para lavado. De lo contrario, la eficiencia de los medios de filtrado se reduciría drásticamente.

2.5 CARACTERIZACIÓN DEL TIPO DE FÁBRICA

Basándose en las dos tecnologías estudiadas, se modelarán dos tipos diferentes de fábricas donde solo los procesos relacionados con la fabricación de moldes y el colado se diferencian entre ambas. Para compararlas, se aplicará una estructura única de la fábrica a ambos tipos, en función de las diferentes secciones a lo largo de la línea de fabricación de acuerdo con el diagrama de flujo del proceso global de la figura 4. Con los dos modelos, se compararán las diferencias de consumo en estas secciones dependiendo de los procesos y los equipos correspondientes. La tabla 8 muestra la estructura definida a efectos de comparar las dos fábricas tipo **Tabla 8**. Caracterización de la fábrica por áreas de producción. Fuente (Cuviella-Suárez et al., 2021).

Tabla 8. Caracterización de la fábrica por áreas de producción. Fuente (Cuviella-Suárez et al., 2021).

SECTION	PROCESS
01 Raw materials	Raw material stock and conveying
02 Slip preparation	Milling of hard materials and blunging of soft materials, so as dosing proper formula for slip
03 Glaze preparation	Milling of hard materials and blunging of soft materials, so as dosing proper formula for glaze
04 Modelling & molds	Production of matrixes for molds and molds, either from plaster or resin, so as to plaster mold drying
05 Casting	Casting of slip into molds
06 Heating & ventilation	Temperature and moist control of the casting hall
07 Drying	Ware drying by controlled air heating ventilation
08 Glazing	Application of glaze to ware by humid spraying
09 Kilns	Ware firing for sintering of ceramics in a first fire and occasionally, second fire upon minor failures of first fire
10 Sorting	Quality control and sorting. Packaging.
11 Offices	Administrative section
12 Ware-house	General store and final product ware-house
13 Facilities	Facilities to operate the factory: compressed air, boiling, electrical, pumping, etc.

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 43 de 231

Sección por sección, los consumos se analizarán según las necesidades de los procesos y el equipo utilizado en ellos, así como los ciclos de trabajo de producción. Los resultados permitirán evaluar posibles mejoras y cuantificarlas. Para calcular los análisis de consumos, se diseñarán modelos matemáticos termodinámicos para cada proceso requerido según el equipo común disponible.



2.5.1 Diferencias en el consumo de agua de las dos fábricas tipo

Según la descripción de las principales tecnologías, la principal diferencia en el consumo de agua está directamente relacionada con los procesos de fabricación y moldeo de moldes. Por otro lado, se ha afirmado que el agua debe proporcionarse sin sal. La diferencia del consumo de agua entre tecnologías se muestra en la tabla 6, donde se ha dividido por secciones.

La fabricación de moldes de yeso implica una cantidad relevante de agua para colar yeso, mientras que los moldes de resina no requieren agua dentro de su proceso de fabricación. No obstante, su función posterior para colar barbotina requerirá hasta 180 litros de agua tratada para lavarlos después de cada ciclo de colado. Teniendo en cuenta que esta agua se obtiene por ósmosis inversa, la cantidad bruta de agua total para este propósito es aproximadamente el doble si se asume una eficiencia aproximada de 0,5 litros de agua osmotizada por cada litro de agua con sal (Fritzmán et al., 2007).

El centro internacional para el desarrollo sostenible de los sistemas de energía, agua y medio ambiente (SDEWES) celebra una serie de conferencias con el objetivo de mejorar la eficiencia mediante la integración de los diferentes procesos de la fábrica, utilizando los residuos de uno, como recurso en otro, y en el momento exacto en que es beneficioso para todos, integrando los sistemas de electricidad, calefacción, refrigeración, transporte, agua, edificios, residuos, aguas residuales, etc. (Urbaniec et al., 2016).

Este representa uno de los puntos clave de esta tesis desde la perspectiva del ahorro de agua. Sustituyendo el actual tratamiento de agua mediante ósmosis inversa por la tecnología de destilación, el agua puede reutilizarse y el calor residual del horno se aprovecha como recurso energético para el tratamiento del agua. Existe un gran potencial en la recuperación de calor para mejorar la eficiencia energética (Miró et al., 2016) o los aspectos económicos (Brückner et al., 2015) independientemente del nivel de temperatura (Taylor and Wadkin, 1986), por lo que esta tesis proporciona una aplicación específica dentro de ese enfoque general.

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 44 de 231

2.5.1.1 Ósmosis inversa

Actualmente, hay muchas aplicaciones de ósmosis inversa dentro de diferentes áreas industriales con el único propósito de tratar el agua para reducir el contenido de sal que afecta la eficiencia del proceso o el ciclo de vida de las máquinas (Colla et al., 2016).



Este es el caso de la industria de artículos sanitarios donde ambos efectos están presentes en el mantenimiento de los moldes y la eficiencia del proceso de colado. Los fabricantes de máquinas de colado a presión recomiendan lavarlos después de cada ciclo con agua limpia y tibia. La forma habitual en las fábricas hoy en día de producir esta agua es mediante ósmosis inversa. Por este procedimiento, el agua producida es adecuada para la producción, así como para el lavado de los moldes. El punto débil es que el agua de lavado se rechaza después de limpiar el molde por el contenido de sales disueltas. En estas circunstancias esta agua no sirve para un nuevo ciclo de colado. Por otro lado, un nuevo tratamiento de ósmosis sobre esta agua suele acortar en gran medida la vida de las membranas debido al contenido de partículas en suspensión procedentes de la barbotina por lo que no es habitual desde un punto de vista productivo la reutilización de agua mediante tratamiento por ósmosis inversa.

2.5.2 Diferencias de consumo de energía de las dos fábricas tipo

2.5.2.1 Diferencias eléctricas

Las diferencias eléctricas entre ambas tecnologías se encuentran principalmente en la sección de colado. El proceso de fabricación de moldes es esencialmente el mismo desde el punto de vista eléctrico. Mezcla de componentes, colado y secado o curado. Puede haber una ligera diferencia relacionada con el secadero para moldes de yeso donde se encuentran ventiladores y extractores para eliminar el agua del yeso. En cambio, para moldes de resina es más un proceso de curado que un proceso de secado. Otra diferencia importante es la instalación de ósmosis inversa en el caso de fábrica de moldes de resina, que ha de ser de capacidad notablemente mayor que en la de yeso. Las bombas para esta planta representan otra diferencia eléctrica.

En cuanto al proceso de colado, es notable el tamaño diferente del área para ambas tecnologías dada la gran diferencia de productividad de ambos tipos de molde. El área requerida de la sección de colado por molde es bastante similar para ambas tecnologías. Por el contrario, la relación de producción varía hasta 30 dependiendo del ciclo de trabajo. La relación de área es inversamente proporcional.

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 45 de 231



Si bien la tecnología de resina requiere mucha agua para lavar los moldes, el yeso requiere un ambiente controlado para secar los moldes mediante unidades de ventilación térmica provistas de ventiladores potentes. Esta es una diferencia considerable desde el punto de vista eléctrico

2.5.2.2 Diferencias térmicas

Los secaderos de moldes en las fábricas de moldes de yeso son consumidores de calor que no existen en las fábricas de moldes de resina.

En cuanto a las áreas de colado, se requieren condiciones higrométricas para evitar la formación de grietas. Por lo tanto, el calentamiento del aire no es una diferencia térmica desde la perspectiva de cantidad de piezas cerámicas. La diferencia real e importante radica en el secado de moldes de yeso. Tras el colado, la barbotina deja más del 50% del agua contenida dentro de los capilares del molde. Esta agua tiene que evaporarse posteriormente para permitir un nuevo ciclo de colado mediante la aportación de aire relativamente caliente y seco durante el período de secado.

En el colado con resina, se requiere que el agua para lavar los moldes se utilice aproximadamente a 45 °C. Esto se consigue generalmente, con calderas de agua caliente convencionales que suponen otra diferencia en cuanto a consumo térmico entre ambas tecnologías.

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 46 de 231

3 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS A ALCANZAR

A partir de una revisión bibliográfica basada en la literatura científica en el campo de la gestión de recursos en la fabricación, se ha podido comprobar que no hay apenas investigación en este campo relacionada con la producción de artículos sanitarios. En (May et al., 2017) se ha estudiado ampliamente este tema en más de 365 artículos publicados de 1995 a 2018. En su estudio se concluye que la integración de la eficiencia energética en la fabricación representa un medio para fomentar el desempeño económico y ambiental, aumentar la competitividad y estimular la innovación en el sector. Como ya se ha mencionado, el consumo de energía y recursos constituye un enfoque importante para la industria y un desafío para la sostenibilidad. Los responsables políticos y la sociedad en general juegan un papel fundamental para lograr estos objetivos. En este sentido, esta tesis pretende aportar luz al conocimiento del estado del arte en este ámbito para fomentar, innovar y desarrollar nuevas técnicas en la línea del consumo de recursos del sector.



3.1 SOBRE LA MODALIDAD DE PRESENTACIÓN DE LA TESIS

La presente tesis doctoral se presenta bajo la modalidad de Tesis por compendio de publicaciones.

Esta modalidad de presentación de la tesis doctoral está regulada por el documento aprobado por el Comité de Dirección de la Escuela Internacional de Doctorado de la Universidad Nacional de educación a Distancia (EIDUNED), en su reunión de 16 de enero de 2017, y por la Comisión de Investigación y Doctorado de la UNED, con fecha 21 de febrero de 2017.

Conforme lo determinado en dicha regulación, la tesis doctoral presentada por compendio de publicaciones deberá estar constituida por un conjunto de trabajos publicados y/o aceptados, justificados por su unidad temática, de acuerdo con la siguiente estructura:

- Introducción, en la que se justifique la unidad temática de la tesis.
- Hipótesis y objetivos a alcanzar, indicando en qué publicación o publicaciones se abordan.
- Marco teórico en el que se inscribe el tema de la tesis y herramientas metodológicas o remisión a las publicaciones.
- Copia completa de las publicaciones, ya sean publicadas o aceptadas para publicación, donde conste el nombre y adscripción de la autoría y coautoría, en su caso, así como la referencia completa de la revista o editorial en la que los trabajos hayan sido publicados aceptados para su publicación, en cuyo caso se aportará justificante de la aceptación de la revista o editorial. En todos estos casos siempre deberá constar de forma explícita la filiación del doctorando o doctoranda a la UNED.
- Conclusiones, indicando de qué publicación o publicaciones se desprenden.

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 47 de 231



- Resúmenes en español y en inglés o, en su defecto, en el idioma habitual para la comunicación científica en su campo de conocimiento científico, técnico o artístico.
- Otras aportaciones científicas derivadas directamente de la tesis doctoral.
- Informe con el factor de impacto y cuartil del Journal Citation Reports (SCI y/o SSCI), SCOPUS, Sello de Calidad FECYT o de toda base de datos selectiva y con factor de impacto de referencia del área en el que se encuentran las publicaciones presentadas.
- - Fuentes y/o Bibliografía.

La regulación determina tres opciones para la clase y número de publicaciones que deben formar el compendio. Para la presentación de esta tesis doctoral se ha optado por la primera de las opciones, según la cual: *“..el compendio de publicaciones estará formado por un mínimo de 3 artículos (al menos, dos ya publicados y el tercero aceptado) en revistas de índices de impacto en los dos primeros cuartiles de la relación de revistas del ámbito de la especialidad del Programa en el que está inscrita dicha tesis y referenciadas en la última relación publicada por el Journal Citation Reports (SCI y/o SSCI) y de SCOPUS. Todos los artículos deben estar publicados con fecha posterior a la primera matrícula de tutela académica en la EIDUNED. El doctorando o doctoranda debe ser primer firmante o segundo, en este último caso, el primero debe ser el director o directora de la tesis”*.

3.2 OBJETIVOS

El objetivo de esta investigación es proporcionar una herramienta de gestión empresarial que:

- Analice y cuantifique cómo y dónde se consume energía y agua mediante el mapeo de todo el proceso.
- Una vez que se localizan los puntos elementos y las cantidades de consumo, establezca un mapa global de flujos individuales modelando termodinámicamente cada subproceso relevante como un equilibrio de masa y energía.
- Proporcione un modelo numérico del proceso industrial global desde una perspectiva de consumo de energía y agua.
- Encuentre la forma óptima de desviar los residuos de calor para reutilizarlos y reducir el consumo de energía del agua y las emisiones de CO₂.
- Introduzca la cogeneración como técnica de reducción de energía. La implementación de energía fotovoltaica, la energía solar térmica, también serían prácticas aconsejables, pero no se han considerado en el alcance de la investigación.
- Cuantifique el alcance del ahorro por medio de un análisis exergoeconómico avanzado.
- Con el conocimiento global del consumo, demuestre la posibilidad de lograr:



Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 48 de 231

- Mejoras desde el punto de vista ambiental y económico de esta industria.
- Cuantificación de la posible reducción del consumo de combustible dentro de una fábrica estándar de artículos sanitarios. Su alcance abarca los principales consumidores de gas; hornos, secaderos, calefacción o calderas.
- Reducir drásticamente el consumo de agua mediante la recuperación del calor residual en un sistema de tratamiento de agua para reutilizar la mayor parte del agua de proceso.
- Cuantificar el mejor rendimiento posible con respecto al consumo de energía y agua de una fábrica estándar en la industria de sanitarios mediante análisis térmico de cada elemento consumidor de energía a lo largo de toda la línea de fabricación.
- Contribuya a mejorar la competitividad de este sector industrial proporcionando una herramienta para lograr un mayor rendimiento y sostenibilidad. Es un instrumento básico para evaluar el consumo de agua y energía en el campo de la fabricación de artículos sanitarios que a su vez ayuda a diseñar mejor y optimizar las nuevas instalaciones.
- Sirva para proporcionar una metodología generalizada capaz de cuantificar los ahorros a través de una secuencia de técnicas de recuperación de calor que mejoren progresivamente el consumo de energía y de agua de la fábrica (Goldemberg, 1994).

En este sentido, el objetivo de esta tesis es proporcionar una metodología generalizada para cuantificar los ahorros a través de una secuencia de técnicas de recuperación de calor que mejoran progresivamente el consumo de energía térmica de la fábrica (Goldemberg, 1994) a fin de reducir el consumo mundial de combustibles, electricidad y agua mediante diferentes estrategias. La simulación de la fábrica desde la perspectiva del consumo es una forma novedosa de abordar la industria de la cerámica sanitaria y su sostenibilidad. Algunos otros campos de fabricación se han abordado de una manera similar (Seferlis et al., 2015) y (Wang et al., 2017).

Esta metodología, extensible a cualquier instalación industrial donde esté presente el consumo térmico a diferentes niveles térmicos, se aplica particularmente a la industria de artículos sanitarios en esta tesis. Una gestión energética adecuada debería considerar esta técnica en cualquier campo donde se demanda y desperdicia energía térmica (Johansson, 2015).

De una forma inequívoca, cualquier reducción de consumo de combustible se transforma automáticamente en su equivalente de emisiones de CO₂, por lo que el objetivo final es la consecución de una reducción global de impacto medioambiental en un sector industrial con gran influencia a nivel mundial dentro del marco actual de “*cambio climático*” y carente de investigación efectiva en este campo.

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 49 de 231

3.3 PLANTEAMIENTO SECUENCIAL DE LA INVESTIGACION



De acuerdo con el ANEXO (aprobado por la Comisión Académica en reunión celebrada el 20-II-17) de la regulación aplicable a la presentación de tesis por compendio de artículos, han de tener un hilo común y las conclusiones de la tesis, desprenderse de cada una de las publicaciones aportadas. En este sentido y con el fin de dejar bien claro este hilo común de continuidad, antes de definir las hipótesis o punto de partida se presenta el esquema secuencial de la tesis según las fases de estudio que se han seguido durante la investigación y su correspondencia con los artículos.

Mediante análisis matemático por modelización físicomatemática a partir del estado actual del arte en la fabricación de productos cerámicos sanitarios, se calculan los consumos energéticos y los residuos térmicos de una fábrica convencional en cualquiera de los dos tipos según tecnología y se establece el mapa de consumos además de cuantificarlos. Los resultados de esta fase de estudio se presentan en la publicación 1: “*Management tool to optimize energy and water consumption in the sanitary-ware industry*”.

Una vez caracterizados los dos tipos de fabricación y establecido el mapa de consumo de recursos, se añade al problema de optimización la variable de consumo de agua. Los resultados de esta fase de estudio se presentan en la publicación 2, “*Heat recovery in sanitary-ware industry applied to water and energy saving by multi-effect distillation*” y 3, “*Reduction of Water and Energy Consumption in Sanitary-Ware industry by Absorption Machine Operated with Recovered Heat*”.

A la luz de los resultados de las fases previas, se realiza un análisis de las posibilidades de combinar todos los residuos térmicos del proceso a fin de minimizar los recursos externos mediante la caracterización de necesidades hídricas y energéticas de las fábricas tipo. Esta fase se aborda en los dos artículos presentados en la sección 6 como “*Otras aportaciones científicas derivadas directamente de la tesis doctoral*”. En la publicación “*Sanitary-ware factories: heat recovery strategies to optimize energy and water consumption*” se estudia la posibilidad de añadir a la reingeniería de recuperación térmica de procesos, la integración de una planta de cogeneración para cubrir toda la necesidad eléctrica y térmica incluyendo la reutilización del agua. En la publicación se analiza y demuestra la posibilidad de reutilizar agua líquida de proceso a partir de calor residual del horno mediante el acoplamiento de una cogeneración dimensionada para optimizar los consumos.

En la publicación “*Exergoeconomics in the sanitary-ware industry to reduce energy and water consumptions*”, se establece un mapa de exergías mediante un análisis exergoeconómico avanzado en el que se define el nivel de exergía inevitable cuyo valor determina el máximo de optimización alcanzable. Este artículo pretende poner de manifiesto el grado de optimización relativo a la exergía frente al energético con el objeto de marcar la diferencia de lo que es teóricamente posible versus lo prácticamente alcanzable.

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 50 de 231



3.4 HIPOTESIS PARA EL ANALISIS DE CONSUMOS

Una vez establecida la línea principal del proceso de fabricación para los tipos de producción analizados, es necesario establecer y caracterizar mediante un modelo específico cada uno de los sub-procesos individuales secuenciales a lo largo del proceso general. Antes de organizar cualquier acción encaminada a mejorar el rendimiento del sistema, debe analizarse en detalle para cada paso individual sin perder de vista los vínculos globales entre ellos. Solo con una perspectiva adecuada de la imagen del conjunto es posible comprender los puntos donde se consumen los recursos y el nivel de impacto que representa cada uno en el total de las necesidades generales de la planta. En este sentido, esta sección tiene como objetivo describir cómo organizar la recopilación de datos y la forma de cuantificar las variables que afectan el rendimiento global mediante la adición de sistemas parciales. Se desarrollan modelos físicos y termodinámicos para evaluar los requisitos de energía y agua, así como los residuos correspondientes.

3.4.1 Caracterización de consumos y residuos

Desde el punto de vista eléctrico, una fábrica de artículos sanitarios no tiene ninguna característica particular que la identifique. Los requisitos eléctricos son como cualquier otro tipo de fábrica. Por otro lado, la configuración de los requisitos de calor de energía y los niveles de temperatura a través de los diferentes subprocesos en la secuencia de fabricación se distribuyen de tal manera que una red adecuada de calor recuperado puede ahorrar hasta un tercio del consumo de energía primaria de la fábrica. La mitad de la demanda térmica total se destina a la cocción de la cerámica en un horno túnel cuyos gases residuales constituyen más de dos tercios de este calor que se emite a la atmósfera a través de las diferentes chimeneas a un nivel de temperatura adecuado para ser recuperado en el resto de los procesos térmicos comunes, como el secado o el acondicionamiento y calefacción de las salas. Por otro lado, el gran consumo de agua involucrado en la fabricación de cerámica podría reciclarse mediante un tratamiento adecuado alimentado con calor recuperado. Debido a este característico mapa de consumo térmico. Otra posibilidad inherente a esta distribución de demanda térmica es la implantación de una cogeneración.



El punto de partida de una planificación para la gestión de recursos es trazar el mapa de los mismos para el proceso y establecer el patrón de consumos (Sathitbun-anan et al., 2014). Tal análisis se llevará a cabo explicando la forma en que se producen los consumos como hace Habib en su artículo sobre la industria de la confección en Bangladesh (Habib et al., 2016). La idea principal es mapear todo el proceso y caracterizarlo mediante un modelo matemático que pueda utilizarse fácilmente para optimizar los recursos globales. El modelo global consta de sub-modelos individuales que pueden interactuar entre sí intercambiando flujos de masa o

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 51 de 231

energía. La investigación matemática del sistema demuestra que se pueden intercambiar cantidades relevantes de energía entre hornos, secaderos y unidades de calefacción para reducir la demanda global de energía primaria. De este hecho se deriva una importante reducción de emisiones de CO₂ (Colmenar-Santos et al., 2016b). Por otro lado, el estado termodinámico de algunos residuos térmicos puede resultar apropiado para ser reutilizado en algún otro subproceso con menos exigencia térmica permitiendo que el calor recuperable de un consumidor térmico pueda aprovecharse para otro consumidor. Algunos procesos industriales exigen un nivel térmico medio que puede ser provisto con calor recuperado de otro con un nivel térmico más alto (Delpech et al., 2017). El flujo de calor recuperado se caracteriza por su caudal másico, componentes, temperatura y en su caso. Una de las novedades de esta investigación reside en la metodología que, gradualmente; aplicada a un proceso industrial con un escalonamiento térmico permita la reutilización progresiva con el resultado de una mejor eficiencia. Con este fin se ha realizado una caracterización del proceso, que ha sido posible gracias al modelado matemático y termodinámico del proceso, que es donde radica el núcleo central de esta investigación. A partir de este punto; se establecen las diferentes etapas para reducir progresivamente el consumo de recursos, se cuantifica la reducción de los mismos en cada una de esas etapas, y finalmente, se prueba que los ahorros globales potenciales están por encima del 50%.

Como ya se ha mencionado, se considerarán los tipos de fábrica basados en molde de yeso versus molde de resina como principales tecnologías actuales desarrolladas (“Reference Document on Best Available Techniques in the Ceramic Manufacturing Industry,” 2007). Estableciendo esta base como punto de partida y modelando numéricamente el consumo de cada proceso que se describirá en términos de consumo de energía y agua, se calcularán como las emisiones de CO₂. A partir de estos resultados, se construirá la herramienta principal para diseñar la fábrica más eficiente en ambos tipos con la que se cuantificará el ahorro potencial de energía y agua (“Communication Environmental Website | GREEN STORY | TOTO,” n.d.). Algunos autores han investigado esta línea de acción para la eficiencia en el uso de energía y recursos en otros sectores industriales como G. Ingarao lo ha hecho para la conformación de metales (Giuseppe Ingarao, 2017). Ingarao sugiere reducir las emisiones globales de CO₂ en la industria como una contribución relevante desde el punto de vista estratégico. Describe el papel de los procesos de conformación de metales en la reducción del impacto ambiental en las diferentes etapas de la vida útil de los componentes metálicos.

Si bien la reducción de recursos es una práctica muy común y se investiga ampliamente (Roldán-Blay et al., 2017), no lo es tanto la forma de abordarlo mediante la reutilización escalonada de residuos entre subprocesos dentro de la industria de artículos sanitarios desde un punto de vista científico. Después de una revisión bibliográfica exhaustiva, no se ha encontrado ninguna investigación sobre este tema dentro de la fabricación de artículos sanitarios, aunque se han encontrado algunas aplicaciones que se refieren a otros campos de

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 52 de 231

fabricación (Galati et al., 2017) o Madan et al. para el sector industrial de moldeo por inyección (Jatinder Madan et al., 2014). Otros por el contrario, no se centran en ningún un sector en particular (Effenberger and Hilbert, 2016), aunque en todos los casos se pone de manifiesto la preocupación por la escasez futura de recursos y la sostenibilidad (Grubbström, 2015). Es necesario tener en cuenta los valores de mejora relevantes y estudiarlos con gran detalle para descubrir las formas de reducir los diferentes consumos de energía involucrados a lo largo del proceso global. Algunos autores han sugerido integrar indicadores de sostenibilidad y “*Lean Manufacturing*” para evaluar los procesos de fabricación (André Lluís Helleno et al., 2016).

En la introducción, los dos tipos de fábrica a analizar se definieron desde un punto de vista cualitativo. Para evaluar los consumos y poder compararse entre sí, debe establecerse una definición cuantitativa. En otras palabras, se debe establecer un tamaño de fábrica. Un tamaño bastante estándar de la fábrica de cerámica sanitaria es la que puede producir medio millón de piezas por año, lo que es consistente con la producción de un horno túnel estándar. Para calcular los requisitos de recursos, también debe establecerse la cantidad de producto a fabricar, así como la naturaleza y cantidad de materias primas.



Los componentes comunes en la formulación de artículos sanitarios son: arcillas y caolín como materiales plásticos y cuarzo, feldespato y chamotas como materiales áridos. Estos materiales generalmente se proporcionan como una mezcla de diferentes componentes dependiendo del suministrador. Para calcular las magnitudes térmicas, es importante evaluar algunas variables fundamentales relacionadas con las materias primas, como la densidad, que se calcula según las fórmulas para los materiales sólidos como se muestra en la tabla 9 para la barbotina y en la tabla 10 para esmalte.

Tabla 9. Formula and density of slip raw materials. Fuente (Ceramic Technology Sanitary-ware, 2010)

SLIP FORMULA		rho kg/m ³
PLASTIC MATERIALS	Ball clay	26.0% 2,871
	Kaolin	27.5% 2,948
	sub-Total=	53.5% 2,910
ARID MATERIALS	Quartz	9.5% 3
	Feldspar	29.5% 2,848
	Chamotte	7.5% 3,118
	sub-Total=	46.5% 2,903
TOTAL=		100.0% 2,907

Tabla 10. Formula and density of glaze raw materials. Fuente (Ceramic Technology Sanitary-ware, 2010)

GLAZE FORMULA		rho kg/m ³
PLASTIC MATERIALS	Kaolin	10.0% 2,948
	Feldspar	29.0% 2,848
	Nepheline	5.0% 2,600
ARID MATERIALS	Quartz	20.0% 2,650
	Calcium carbonate	9.0% 2,710
	Wollastonite	7.0% 2,950
	Dolomite	5.0% 2,840

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 53 de 231

Magnesium carbonate	2.0%	2,960
Barium carbonate	1.0%	4,290
Talcum	2.0%	2,750
Zinc oxide	2.0%	5,610
Zirconium silicate	8.0%	4,560
TOTAL=	100.0%	3,007

Una vez que se caracteriza la composición del material sólido, se debe calcular la cantidad de agua necesaria para producir el deslizamiento que se debe moldear en moldes de yeso o resina. La variable que establece el contenido relativo de agua es la densidad del deslizamiento requerido. Esta investigación lo calculó como 1.795 kg/m³ y las variables para establecer el contenido absoluto de agua dependen de la fábrica y del tipo de producto.

Para modelar ambos tipos de fábrica, la tabla 11 establece los parámetros de producción que se han considerado en los cálculos de esta tesis de acuerdo al calendario típico de la industria del sector.

Tabla 11. Parámetros de producción de la fábrica tipo. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).

PRODUCTION PARAMETER		
Product=	Toilet seats	
Working days=	232	Days/year
Kiln days=	330	Days/year
Shifts=	1	Shift/day
Hours/shift=	8	Hour/shift
Averaged weigh=	20	kg
Production=	500,000	pieces/year
Global yield=	80.0%	
Casting yield=	95.0%	
Kiln yield=	84.2%	
Electricity price=	0.10	€/kWh
Gas price=	0.03	€/kWh
Water price=	2.00	€/m ³

Estos parámetros representan el punto de partida para calcular los requisitos de agua y energía en cada proceso de acuerdo con el modelo físico adoptado en cada caso.

Las figura 5 y figura 6 muestran el diseño típico de una fábrica estándar en ambas configuraciones. Es notable que la única diferencia radica en la sección de fabricación de moldes y en la de colado.

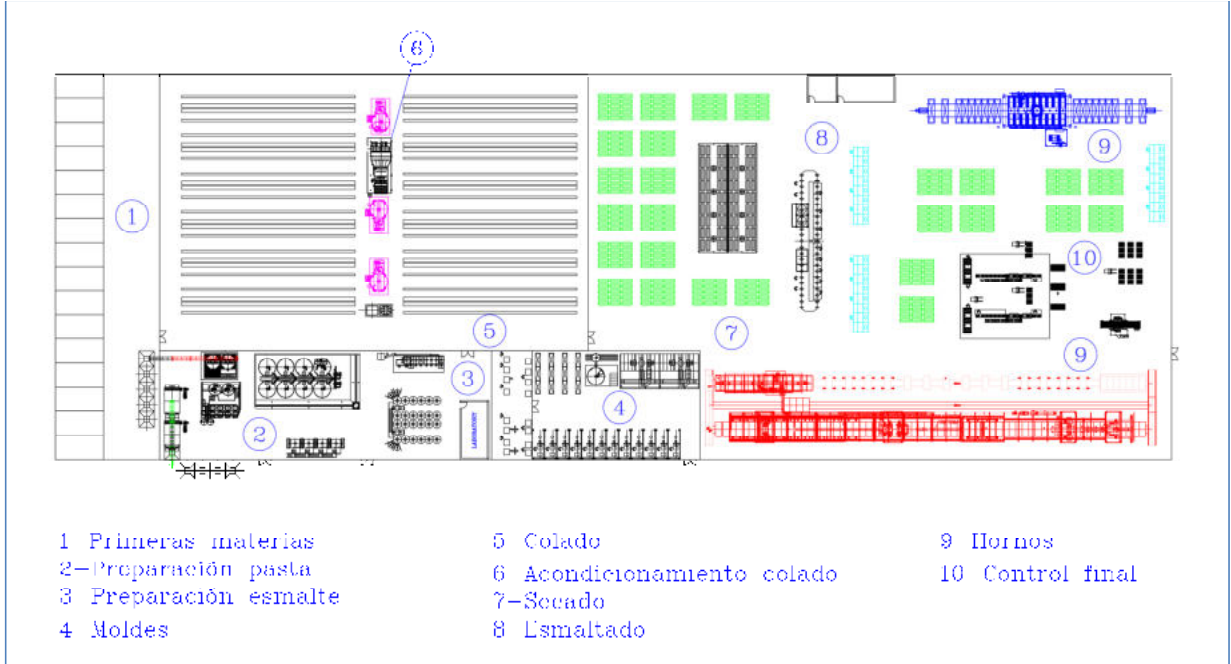


Figura 5. Planta tipo de una fábrica de moldes de yeso Fuente: (Elaboración propia).

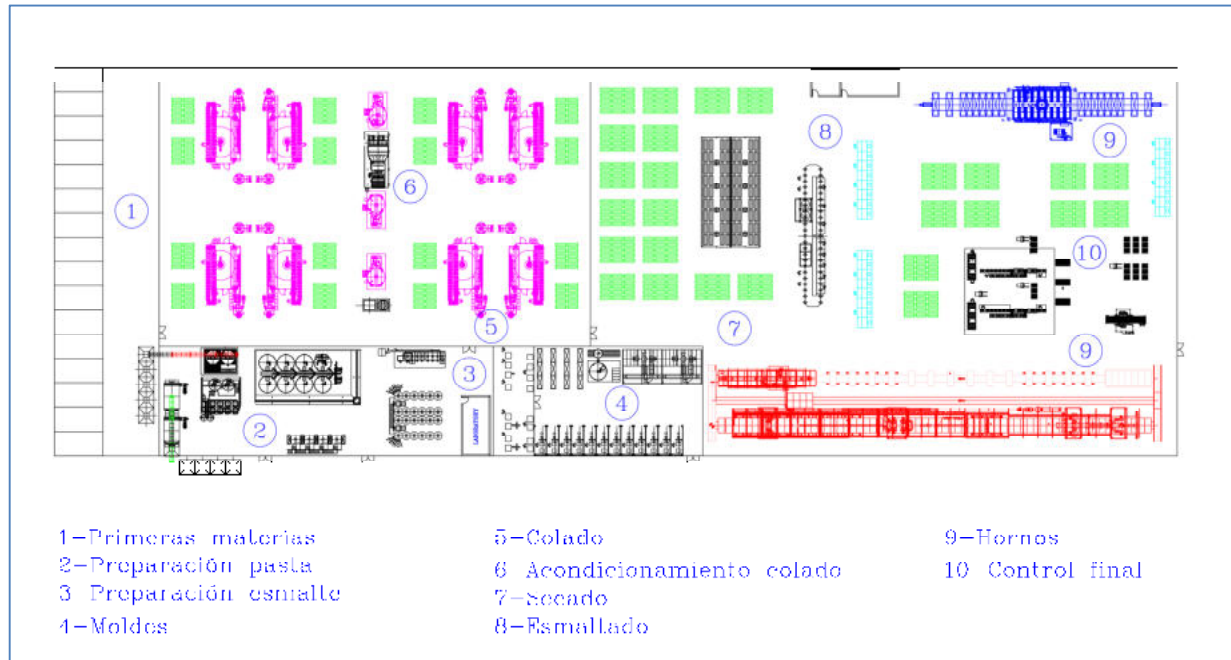




Figura 6. Planta tipo de una fábrica de moldes de resina Fuente: (Elaboración propia) .

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 55 de 231

3.4.2 Cuantificación de demanda de energía y agua

El punto de partida para cuantificar la reducción potencial es la evaluación de los consumos actuales de recursos en las fábricas convencionales. Los consumos se calculan modelando cada proceso a lo largo de toda la línea de producción para las dos tecnologías estándar y de ahí, calculando los recursos involucrados.

La electricidad se consume esencialmente como:

- Potencia mecánica a través de motores eléctricos.
- Iluminación en toda la fábrica.
- Calentamiento para algunos procesos simples.

El modelo físico eléctrico planteado responde al esquema de la figura 7:

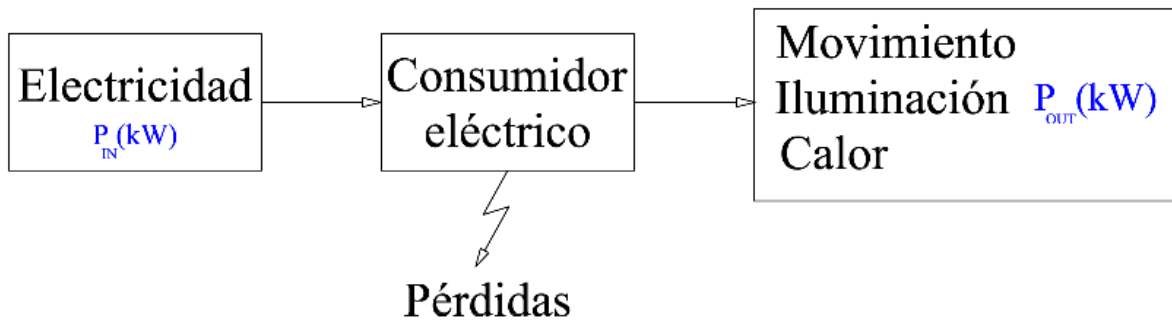


Figura 7. Modelo de consumidor eléctrico Fuente: (Elaboración propia)

La energía térmica es suministrada en la mayor parte de instalaciones actuales a partir de combustibles fósiles, generalmente gas natural. Su aplicación está definida por los procesos:

- Calentamiento de la cerámica en el horno para obtener la sinterización
- Calefacción de las salas para obtener las condiciones higrométricas necesarias
- Calefacción de los secaderos para reducir el grado de humedad de las piezas.
- Calentamiento de agua en general para proceso o servicios.

El modelo fundamental del proceso responde al esquema de la figura 8.

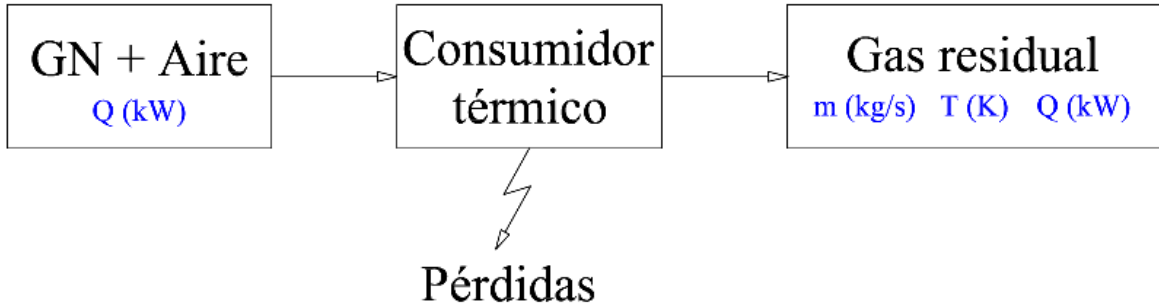


Figura 8: Esquema de consumidor térmico Fuente: (Elaboración propia)

Este modelo se adapta a la combinación de otros fluidos según las circunstancias del proceso en cada caso. Tal es el ejemplo de calentamiento mediante gases calientes recuperados en los que el gas natural es sustituido por una mezcla de gases de combustión más o menos calientes.

Respecto al consumo de agua el esquema a considerar será el de la figura 9 donde el sistema recibe agua en estado líquido y tras un proceso con determinadas pérdidas másicas o energéticas, produce un flujo de salida de agua en estado líquido o gaseoso.

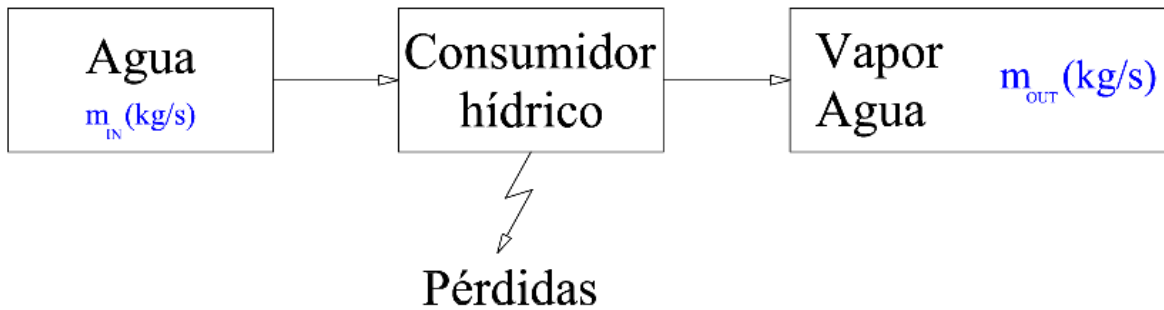




Figura 9. Esquema modelo de consumidor de agua Fuente: (Elaboración propia)

Los modelos considerados se han confeccionado a partir de los balances de masa y energía en cada uno de los sistemas individuales para cada proceso proporcionando un Sistema de ecuaciones en cada caso que una vez resuelto define las condiciones de cada flujo de entrada y salida como se muestra en las ecuaciones 1 y 2

$$\sum \dot{m}_{IN} = \sum \dot{m}_{OUT} \dots\dots\dots (1)$$

$$W_{electrical} + W_{physical} + W_{fuel} = W_{products} + W_{losses} \dots\dots\dots (2)$$

Donde:

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 57 de 231

- \dot{m}_{IN} , son los flujos másicos en kg/s de los diferentes fluidos entrantes; aire, agua, vapor, gas natural, etc.
- \dot{m}_{OUT} , son los flujos másicos en kg/s de los diferentes fluidos de salida; CO₂, vapor, agua, aire, etc.
- $W_{electrical}$, $W_{physical}$, W_{fuel} , $W_{products}$, W_{losses} , Sn las potencias eléctricas, físicas de cada fluido a la entrada del sistema, térmicas del combustible, físicas de los productos a la salida del sistema y las pérdidas respectivamente.

Las ecuaciones son establecidas considerando los distintos estados termodinámicos de los fluidos tanto a la entrada como a la salida incluyendo pérdidas e ineficiencias. La figura 10 muestra la metodología para el proceso de cálculo de modelización.

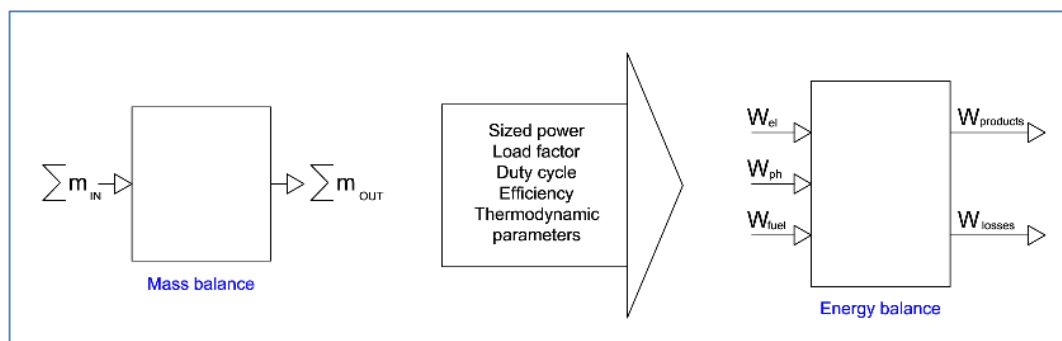


Figura 10. Esquema de modelización de procesos. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2018).

Los requisitos de recursos para los diferentes procesos en cada sección de acuerdo con la estructura propuesta de la línea de fabricación y el proceso general de fabricación de artículos sanitarios de cerámica definidos en la introducción se explican brevemente de la siguiente manera:

3.4.2.1 Materias primas

- Cintas transportadoras para la manutención de materias primas entre silos y molinos, desleidores, tolvas, tamices, etc. Se requieren motores eléctricos para alimentarlos.
- Tolvas para dosificar y almacenar materiales. Se requieren dispositivos eléctricos o neumáticos para alimentar las válvulas automáticas de accionamiento, vibradores de agitación, etc.
- Imanes para separar partículas férricas. Suelen ser electroimanes.





Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 58 de 231



Figura 11. Equipos de la sección de primeras materias. Fuente: (Elaboración propia)

3.4.2.2 *Preparación de pasta*

- La posterior preparación de la barbotina requiere tamaño de grano muy fino, en el orden de las micras. Para este fin se utilizan los molinos de bolas cuyo objeto es generar la micronización de los materiales duros (sílice, cuarzo, feldespato). Se requieren potentes motores eléctricos para hacer funcionar estos pesados cilindros. Se pueden concebir por vía húmeda o seca. Por lo general, es en ellos donde comienza la etapa de dosificación agregando una parte de agua de la correspondiente según fórmula.
- Cintas para transportar materias primas blandas desde los silos o tolvas hasta los desleidores. Para su movimiento se precisan motores eléctricos.

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 59 de 231



- La etapa de dosificación se completa en los desleidores capaces de mezclar componentes y homogeneizar la barbotina. Se requieren potentes motores eléctricos para la agitación a alta velocidad de la barbotina cuya densidad y viscosidad son relativamente altas.
- Al efecto de homogeneizar el tamaño de partícula de la barbotina y eliminar posibles contaminaciones, se utilizan vibrotamices. Suelen estar equipados con vibradores eléctricos.
- Para el trasiego de fluidos entre molinos, desleidores o tanques en toda la fábrica se precisan bombas. Cuando la distancia es relativamente corta, no se requiere mucha presión y se utilizan bombas neumáticas. Por el contrario, cuando se requiere una presión más alta, se usan comúnmente bombas peristálticas de accionamiento eléctrico.
- Antes de ser suministrada a la sala de colado, la barbotina debe ser madurada en agitación suave durante unas 36 horas. La barbotina debe estar en agitación para evitar la decantación y mantener una correcta homogeneización y tixotropía. Para este fin, se requieren motores eléctricos. No son tan potentes como los de los desleidores pues la velocidad es mucho más moderada.



Figura 12. Equipos de la sección de preparación pasta. Fuente: (Elaboración propia)

3.4.2.3 Preparación de esmalte

El proceso para preparar el esmalte, así como los materiales utilizados son muy similares a los de pastas, y solo difiere en fórmula y cantidades, que en este caso son mucho menores. El equipo es notablemente menor y menos



Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 60 de 231

potente, pero similar conceptualmente. En una sección de preparación de esmaltes es común encontrar los siguientes elementos cuya definición es como la ya expuesta en el apartado anterior

- Molinos
- Cintas transportadoras
- Desleidores
- Vibrotamices
- Bombas
- Tanques de almacenamiento



Figura 13. Equipos sección de preparación de esmalte. Fuente: (Elaboración propia).

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 61 de 231

3.4.2.4 Modelado y moldes

Para la elaboración de matrices y posteriormente de los moldes, en una fábrica con moldes de yeso, se requiere:

- Tolva para recoger yeso equipada con dispositivos eléctricos o neumáticos para alimentar la agitación, así como válvulas y otros dispositivos de dosificación automática.
- Transportador de tornillo para suministrar el yeso desde la tolva al mezclador. Se requiere motor eléctrico para moverlo.
- Mezclador de yeso para la mezcla de agua y yeso equipado con motor eléctrico.
- Secaderos para secar los moldes una vez colados en la matriz. Estos secaderos están equipados con ventiladores eléctricos para el desplazamiento de aire y ventilación además de calefacción para aumentar la capacidad psicrométrica del aire.
- Grúas o polipastos para mover moldes y matrices que pueden alcanzar pesos del orden de los cientos de kilogramos.
- Bombas de agua para facilitar la dosificación.
- En el caso de una fábrica de moldes de resina y por similitud, también para la fabricación de las matrices donde se preparan los moldes de yeso, los equipos serían:
 - Mezclador para organizar la mezcla de componentes de resina alimentados por un motor eléctrico.
 - Grúas o polipastos para mover moldes y matrices que pueden alcanzar pesos del orden de los cientos de kilogramos.
 - Unidad de calefacción/aire acondicionado para proporcionar la temperatura ambiental adecuada, para evitar la ignición de algunos componentes con bajo punto de auto inflamación y para regular el curado adecuado durante el endurecimiento de las resinas.
 - Bombas eléctricas para trasiego de agua.
 - Ventiladores eléctricos para proporcionar renovación de aire.
 - Estufas para calentar algunos componentes de resinas. Generalmente alimentado por resistencias eléctricas.



Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 62 de 231




Figura 14. Equipos sección de modelado y fabricación de moldes. Fuente: (Elaboración propia)

3.4.2.5 Colado

La sección de colado en una fábrica de moldes de yeso precisa los siguientes equipos:

- Bancos de colado donde se moldean las piezas. Esencialmente, consisten en un banco con moldes en la parte superior, pero se necesitan algunos requisitos adicionales para lograr el proceso.
 - iluminación local
 - Aire comprimido para soplar el molde después de desmoldar
 - Aire comprimido para mantener la presión durante el proceso de colado
 - Aire comprimido para el manejo neumático del manipulador de desmoldeo
 - Suministro eléctrico de bajo voltaje para manipulador de desmoldeo
 - Ventiladores eléctricos para soplar moldes durante el proceso de secado del yeso
 - Motores eléctricos para dispositivos de elevación de tapas de moldes durante la apertura de los mismos
- Balsa de recogida de excesos y retornos de barbotina post-colado. Están equipados con bombas eléctricas.
- Tanques de suministro de barbotina a los bancos de colar para suministrar a los moldes. Requieren motores eléctricos necesarios para mantener la agitación contra la decantación.
- Bombas eléctricas y neumáticas para trasiego de barbotina y agua.

 Escuela Internacional de Doctorado EIDUNED	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 63 de 231

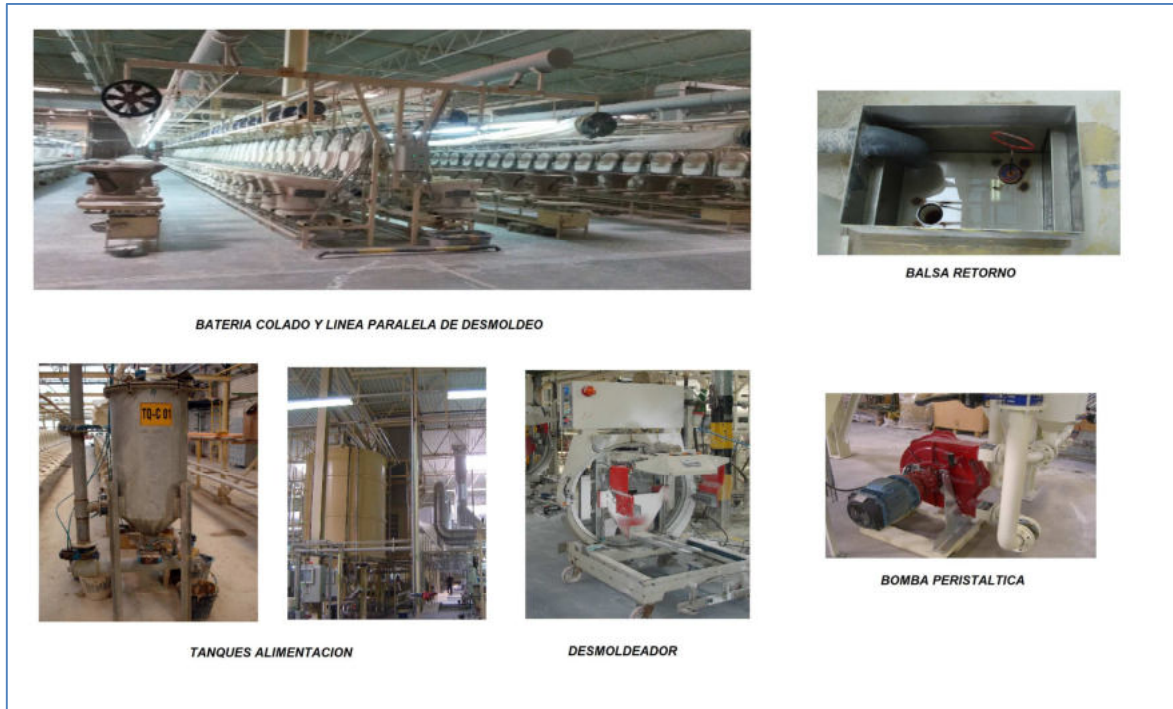




Figura 15. Equipos sección colado en una fábrica de moldes de yeso. Fuente: (Elaboración propia)

En una fábrica de moldes de resina los equipos necesarios pueden resumirse como:

- Las máquinas de colado a presión, que requieren:
 - Electricidad para el cierre de dispositivos motorizados.
 - Electricidad para sistema de presión hidráulica mediante soplante eléctrica
 - Aire comprimido para soplar moldes durante y después del ciclo de fundición
 - Agua libre de sales disueltas para lavar el molde después del ciclo de colado.
- Calderas para calentar el agua de lavado de los moldes después de cada ciclo de colado.
- Balsa de recogida de excesos y retornos de barbotina post-colado. Están equipados con bombas eléctricas.
- Tanques de suministro de barbotina a los bancos de colar para suministrar a los moldes. Requieren motores eléctricos necesarios para mantener la agitación contra la decantación.
- Bombas eléctricas y neumáticas para trasiego de barbotina y agua.

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 64 de 231

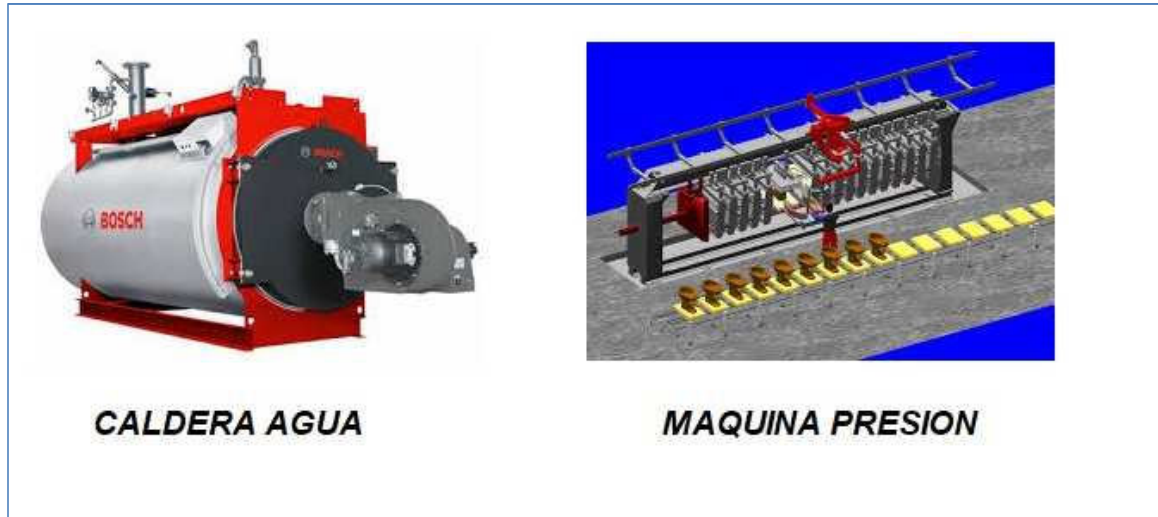


Figura 16. Equipos sección colado en una fábrica de moldes de resina. Fuente: (Elaboración propia)

3.4.2.6 Acondicionamiento de aire. Calefacción y ventilación

- Se requieren unidades de calefacción y ventilación para mantener las condiciones higrotérmicas apropiadas dentro de la sala de colado, donde la combinación de temperatura y humedad es crucial para la calidad de la fabricación. Los elementos del equipo para estas unidades incluyen:
 - Potentes ventiladores eléctricos para la impulsión del aire a través de la cámara
 - Quemadores de gas en línea para calentar el aire de entrada, ya sea desde la sala o desde el exterior
 - Boquillas de humectación cuando el aire de impulsión es más seco de lo que las condiciones de la sala requieren
- Ventiladores de extracción de aire para evacuarlo en el punto de saturación.


 Escuela Internacional de Doctorado EIDUNED	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 65 de 231



Figura 17. Equipos sección acondicionamiento aire. Fuente: (Elaboración propia).

3.4.2.7 *Secado*



- La operación de los secaderos es muy similar al de las centrales de acondicionamiento de aire. El aire se impulsa y recircula dentro de la cámara del secadero. Se requiere temperatura para aumentar el punto de rocío del aire y los ventiladores de extracción se encargan de evacuar el aire saturado.



Figura 18. Equipos sección de secado. Fuente: (Elaboración propia)

3.4.2.8 *Esmaltado*

- Un carrusel de esmaltado es un equipo complejo donde se requieren diversos motores eléctricos para mover cadenas, transportadores, ventiladores, etc. También se requiere aire comprimido y electricidad

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 66 de 231

para organizar la automatización de los múltiples dispositivos por medio de cilindros, válvulas, etc. Por otro lado, el aire comprimido también se consume masivamente en este proceso debido a la necesidad de soplar el producto después pulir todas las rebabas y defectos.

- Cabinas de esmaltado que actúan de manera similar a un carrusel, aunque de una forma estática, es decir las piezas no están en movimiento. Se requieren motores de rotación y ventiladores, así como aire comprimido para la automatización y soplado del producto ya pulido.

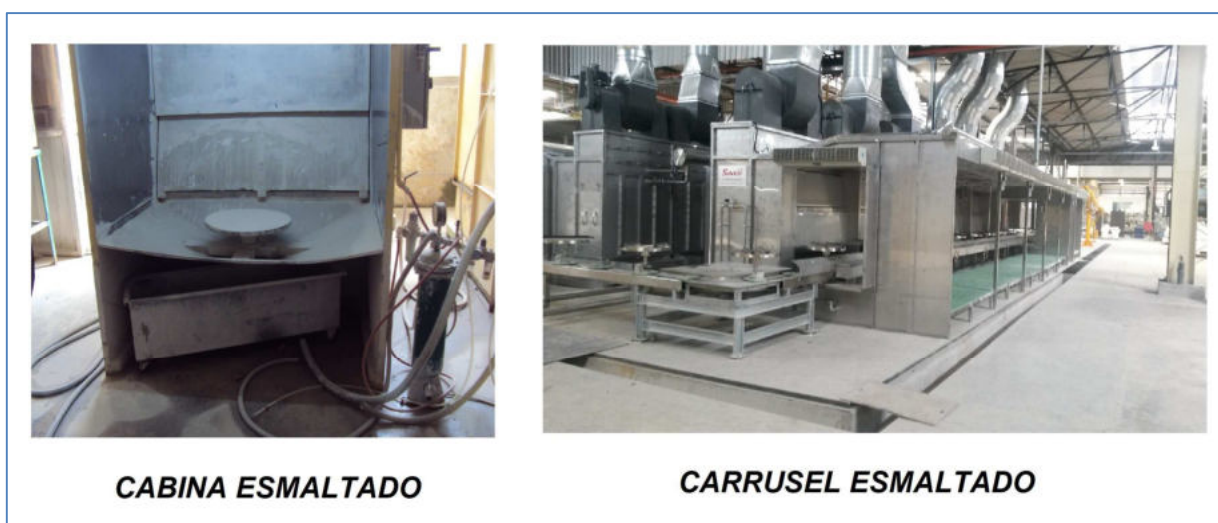



Figura 19. Equipos sección de esmaltado. Fuente: (Elaboración propia).

3.4.2.9 Hornos

- El horno túnel es el equipo más exigente desde el punto de vista térmico. Aproximadamente la mitad del consumo total de gas se dedica a aumentar la temperatura de la cerámica por encima de los 1.000 °C. Por otro lado, la electricidad es necesaria para; movimiento, ventiladores de impulsión de aire y extracción de gases, automatismos variados, etc. La automatización también requiere aire comprimido.
- El horno intermitente funciona de manera similar al túnel. Las principales diferencias radican en el ciclo de trabajo y la capacidad. El intermitente se dedica únicamente a la reparación de piezas defectuosas y trabaja, por lo general, a temperatura inferior. Dado que el horno intermitente trabaja desde temperatura ambiente hasta temperatura ambiente, su rendimiento es menor que en el túnel que trabaja en régimen permanente.

 Escuela Internacional de Doctorado EIDUNED	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 67 de 231

- Las piezas defectuosas de primer fuego (horno túnel) han de ser preparadas en cabinas de trabajo adecuadas antes de ser recocidas en un horno intermitente. Se requiere ventilación eléctrica en las mismas además de herramienta manual, tanto eléctrica como neumática.





Figura 20. Equipos sección de hornos. Fuente: (Elaboración propia).

3.4.2.10 Control final

- Las líneas de prueba y calidad requieren electricidad para mover cintas transportadoras, automatización, soplantes, etc. Se requiere aire comprimido para los dispositivos de automatización; cilindros, válvulas, estaciones de prueba, etc.
- El horno de retractilado para embalaje trabaja con gas para calentar la capa de plástico envoltorio de las paletas de producto. También se requiere electricidad para transportadores mecánicos y motores, así como automatización diversa, tanto neumática como eléctrica.
- Las mesas elevadoras de embalaje son alimentadas con electricidad y aire comprimido para motores y automatización. Con frecuencia, se dispone un manipulador neumático actuado por aire comprimido en esta etapa.



Figura 21. Equipos sección de control final. Fuente: (Elaboración propia).

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 68 de 231

3.4.2.11 Oficinas

El equipo habitual de oficinas incluye:

- Estaciones de trabajo consistentes en; terminal informática, impresora y otros equipos eléctricos similares en las oficinas.
- Unidad de servidor central con ventilación eléctrica y aire acondicionado.
- Unidades de aire acondicionado y/o calefacción.
- Fuente de agua, ventiladores, iluminación, etc.

3.4.2.12 Almacén

- Una oficina de almacén con terminal informático como en las oficinas generales, aire acondicionado y calefacción, etc.
- Se requieren cargadores de batería para las carretillas elevadoras eléctricas.

3.4.2.13 Instalaciones y servicios

Los equipos generales necesarios para el funcionamiento global de la fábrica incluyen:

- Compresores para suministrar aire comprimido en toda la fábrica para actuar toda la automatización y equipos neumáticos y proporcionar aire de soplado para el producto en diferentes procesos.
- Calderas de gas para calentamiento de agua. Se requiere agua tibia ya sea para fines de producción (calentamiento de barbotina, lavado de moldes, control de calidad, etc.) o para fines sanitarios (lavado de manos, duchas, cocina o cantina, etc.)
- El área de mantenimiento generalmente dispone de un taller con maquinaria variada para mecanizar y reparar equipos, tanto eléctrica como neumática.
- Una planta de ósmosis inversa es bastante común para eliminar sales del agua de red o pozo, tanto para agua de proceso como para agua de lavado de máquinas. Se requiere una gran cantidad de energía eléctrica para este proceso debido a las bombas que han de trabajar a una presión relativamente alta durante ciclos de larga duración.
- Para la destrucción de las pérdidas, se utiliza una tolva de pérdidas consistente en un elevador con posterior caída al vacío seguido de una machacadora-trituradora mecánica que reduce el tamaño del residuo. Se requiere energía eléctrica para mover motores y transportadores, así como para la automatización del equipo, etc. También se requiere aire comprimido en la automatización.



 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 69 de 231





Figura 22. Conjunto tolva de pérdidas con machacadora. Fuente: (Elaboración propia)

- Una sala de bombas, tanto para extinción de incendios como para la producción, con suministro de energía eléctrica, que a veces es relativamente alta debido a los requisitos de la red hidráulica de protección contra incendios.
- Una planta de tratamiento de aguas residuales que requiere energía eléctrica para bombas, motores, válvulas, amortiguadores, aletas, raspadores, etc.
- iluminación exterior
- Tomas de corriente para usos varios diseminadas por la fábrica.

3.4.3 Vínculos existentes o potenciales entre consumos y residuos



La experiencia industrial dentro del sector establece algunas conclusiones que esta tesis pretende demostrar:

- Hay una gran cantidad de energía involucrada
- La energía térmica es aproximadamente cuatro veces la energía eléctrica.
- El consumo de electricidad es ligeramente mayor en la fabricación de moldes de yeso.
- El consumo de agua es ocho veces mayor en la fabricación de moldes de resina.

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 70 de 231

La metodología para la aplicación progresiva de la reingeniería es la siguiente:

- El consumo de las fábricas convencionales se cuantifica cuando no se sin considerar medidas de optimización. Esto se establece como el punto de partida de referencia con el que comparar posteriormente la mejora obtenida en cada acción.
- Una vez declarados los recursos demandados por las fábricas convencionales, la siguiente acción es identificar las posibles reducciones. La clave fundamental para encontrarlos es mediante los sistemas de ecuaciones del modelo matemático tratando de eliminar la mayor cantidad posible de entradas de los procesos. Esto se puede lograr de diferentes maneras:
 - Mejorar la eficiencia de las máquinas mediante medidas generales o convencionales de ahorro eléctrico, térmico y de agua que se aplican actualmente en la industria.
 - Mejora de la eficiencia eléctrica mediante regulación, mejora de eficiencia de motores, control de presencia, etc. Esta acción podría alcanzar fácilmente hasta el 10% del consumo eléctrico para iluminación (Boharb et al., 2016), robots (Uhlmann et al., 2016) o compresores (Vittorini and Cipollone, 2016).
 - Aplicación de energías renovables
 - Intentar encontrar tecnologías alternativas para cada proceso cuya demanda de recursos sea menor que la convencional
- Además de las técnicas convencionales de ahorro, se analizan en este punto las específicas para el sector industrial estudiado y que no han sido vistas en la generalidad industrial, entre las que se encuentran:
 - El calor residual de los hornos se recupera para ser recirculado hacia consumidores de calor con un nivel térmico más bajo como secaderos, unidades de calefacción o calderas (Yin et al., 2016)
 - También se considera el precalentamiento del aire de combustión de los hornos, lo que reduce su consumo de gas natural (Mezquita et al., 2014). Por otro lado, se necesita menos aire para la combustión, lo que deriva en una mejor eficiencia (Shiralkar et al., 2014)
 - Aplicación de nuevos procesos térmicos alimentados con calor recuperado para reducir el consumo eléctrico y de agua, como la destilación multi-efecto o la refrigeración por absorción (Li et al., 2012)
 - Dado que una fábrica convencional funciona en turnos de 8 horas, se pierde la mayor parte del calor residual continuo de los hornos. Para hacer coincidir la recuperación de calor con los requisitos térmicos y nivelar la curva de demanda térmica, los ciclos de los consumidores se extienden más allá del turno estándar durante todo el día (24 horas). Así pues, una adecuada reestructuración operativa en la fábrica puede generar grandes ahorros potenciales

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 71 de 231

- Aunque el consumo se mejora al aplanar la curva de demanda térmica, se puede mejorar aún más almacenando calor de los períodos de exceso de calor que se utilizarán durante los períodos de defecto de calor residual (Wang et al., 2017)

El modelo matemático visto como una herramienta de optimización es un avance científico importante para diseñar nuevas fábricas más eficientes. Se demuestra que el residuo térmico del horno se puede reutilizar para:

- Precalear el aire para suministrar su alimentación de combustión, lo que resulta en un menor consumo de gas.
- Suministro de secaderos.
- Suministro de calefacción de la sala de colado.
- Suministro de calderas de agua
- Destilar agua de proceso para su reutilización
- Condensar agua de proceso previamente evaporada para su reutilización.

Por otro lado, las soluciones de plantas de cogeneración o de energía renovable pueden acoplarse y combinarse con las medidas mencionadas previamente para reducir la demanda de recursos (Ge et al., 2014).

3.4.4 Consumos globales en las dos fábricas tipo convencionales

En una fábrica convencional donde no se ha establecido una política de ahorro de recursos, éstos son obtenidos de las redes públicas; eléctrica, gas y agua. La fracción residual de los mismos se emite a la atmósfera o las aguas residuales. La figura 23 muestra los consumos anuales agregados de una fábrica convencional de moldes de yeso.

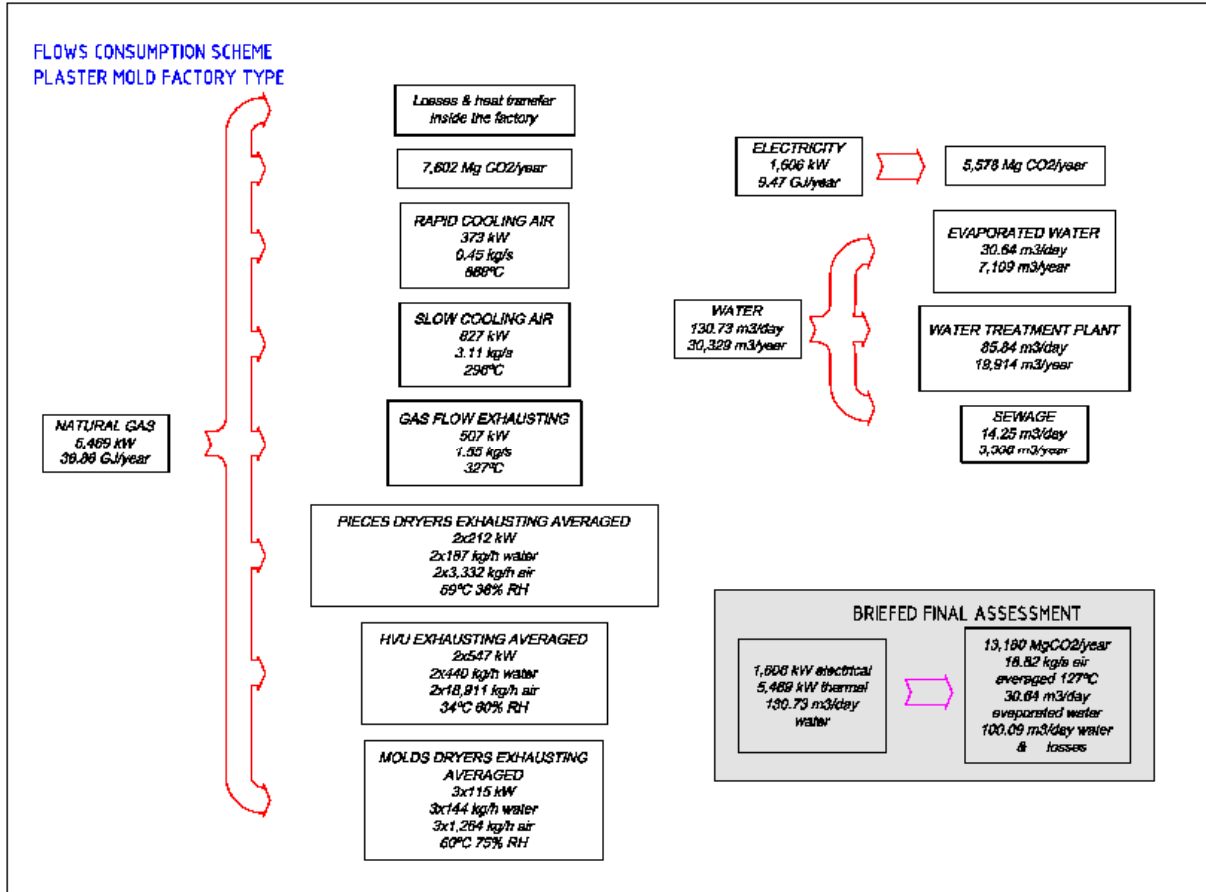


Figura 23. Consumos de una fábrica tipo convencional de moldes de yeso. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2018).

Para una fábrica convencional de moldes de resina, las necesidades eléctricas son muy similares. Las térmicas difieren básicamente en lo que se refiere a secaderos de moldes y a acondicionamiento de aire en el colado. En cambio, existe una gran diferencia en cuanto al consumo hídrico, debido a la ingente cantidad de agua del lavado de los moldes. En la figura 24 puede verse el resumen de estos consumos anuales:

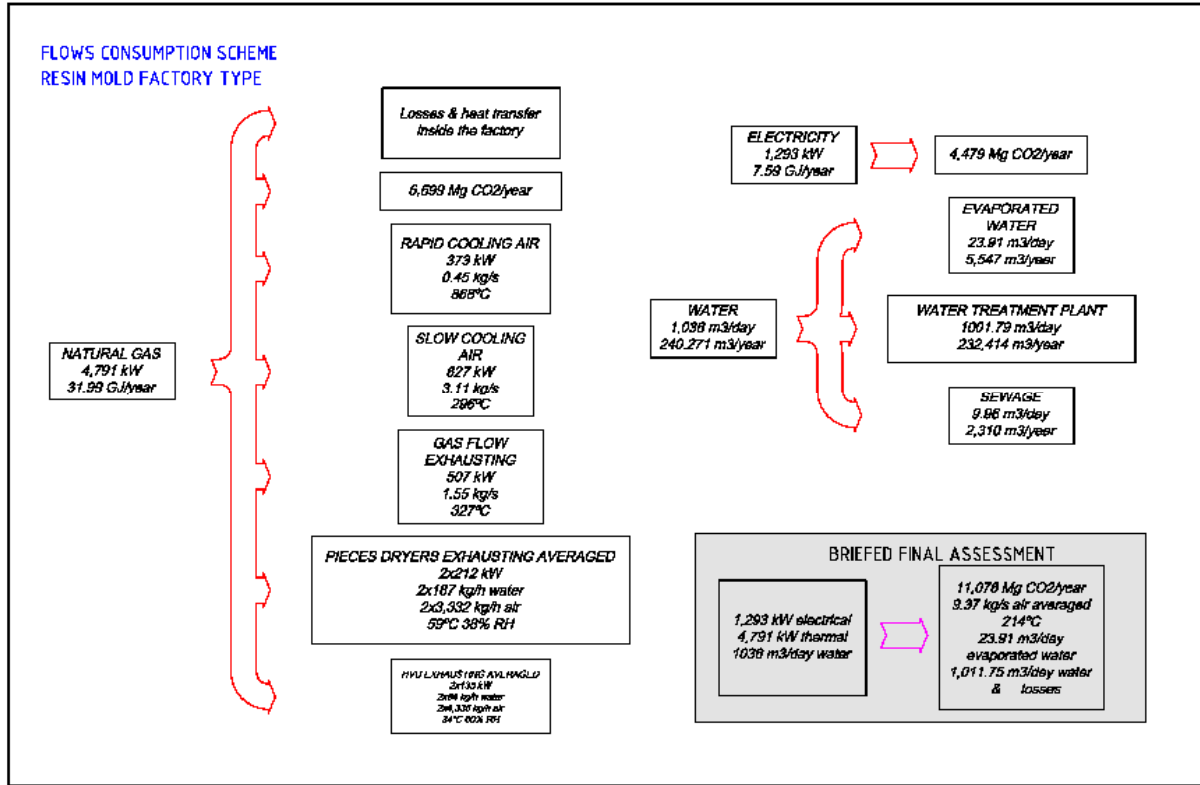




Figura 24. Consumos de una fábrica tipo convencional de moldes de resina. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2018)

En las figuras anteriores es fácil deducir que el calor residual de los hornos puede satisfacer prácticamente el resto de las demandas térmicas. Este hecho es el punto de partida de esta tesis. Si no se aspira a la reducción del consumo de agua, ésta sería la solución trivial. En cambio, el tratamiento de agua residual supone un incremento de consumo térmico. La solución que optimiza este nuevo planteamiento y donde reside la novedad de la tesis es combinar una red de calor recuperado del horno con una planta de cogeneración basada en un motor de turbina de gas. Con esta configuración se consigue simultáneamente la reducción de energía primaria ligada a la producción eléctrica (no hay pérdidas de transporte), la reducción de consumo de agua y el aprovechamiento del exceso de calor residual para el tratamiento de esta agua.

La figura 25 muestra las demandas térmicas de las fábricas tipo convencionales versus el calor residual sumado de los dos hornos, el túnel y el intermitente, a lo largo del ciclo de producción establecido de 24 horas.

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 74 de 231

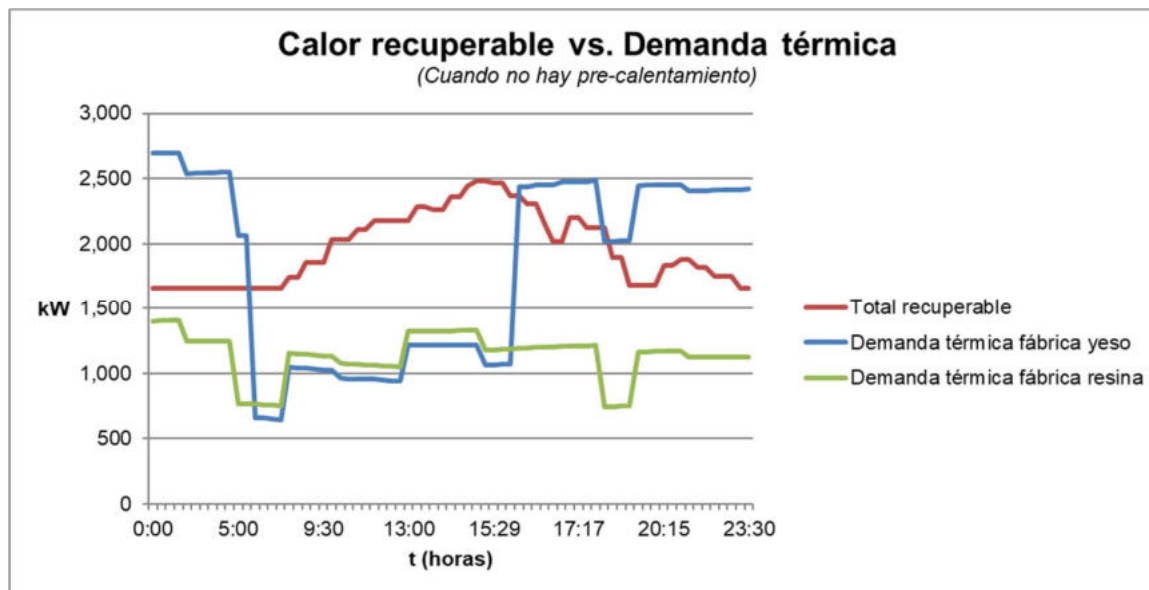




Figura 25. Calor recuperable de los hornos vs. demanda térmica de receptores. Fuente: (Elaboración propia).

Para la fábrica de moldes de resina (curva verde), los hornos (curva roja) pueden suministrar calor a cualquier otro consumidor en cualquier periodo por lo que siempre habría exceso de calor recuperable. Por otro lado, en la fábrica de moldes de yeso (curva azul), aproximadamente la mitad del día hay defecto de calor recuperable, mientras que la otra mitad hay un exceso que es aproximadamente igual. Esto se debe a la gran demanda de calor durante la noche para secar los moldes en la sala de colado, hecho que no tiene lugar en una fábrica con moldes de resina.

Debido a la variabilidad de las curvas de producción y demanda térmicas existe un desacople para recuperar el 100% de la energía. Durante algunos periodos, el calor recuperable es mayor que la necesidad térmica y se perdería la diferencia. Por el contrario, durante el resto de los periodos, el calor recuperable no podría satisfacer la demanda térmica y se necesitaría apoyo de gas natural.

Esta tesis aborda este problema mediante el desarrollo de un simulador que calcula el calor recuperable de los hornos, la demanda térmica de otros consumidores y el gasto de NG necesarios en caso de falta de calor durante cada período a lo largo del día completo considerado como ciclo fundamental de producción. Posteriormente se analiza la posibilidad de almacenar calor en los periodos de excedente para utilizarlo en los de déficit.

Otro hecho a considerar es la posibilidad de precalentar el aire de combustión del horno antes de entrar en la cámara de combustión con calor recuperado de sus chimeneas para reducir significativamente el consumo de

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 75 de 231

gas. Cuando el aire entra en el horno a la temperatura de los gases de escape, toda la energía necesaria para calentar el aire ambiente hasta esta temperatura se habrá ahorrado.

Por otro lado, hay un flujo de aire dentro del horno (aire del techo) que se utiliza para crear turbulencias que puede precalentarse junto con el aire de combustión para mejorar la eficiencia del horno.

La dificultad real del estudio es hacer coincidir la energía producida con la consumida en el tiempo. Mientras el horno túnel funciona de manera constante y continua, el horno intermitente y los diferentes consumidores térmicos de la fábrica de calor funcionan con ciclos variables. Por lo tanto, es necesario planificar los diferentes ciclos de operación de cada equipo para que se desfasen de tal manera que la curva de demanda de calor global se aplane lo más posible. Esto significa retrasar los ciclos de tiempo de inicio para combinar la demanda de pico térmico de algunos consumidores con la baja demanda de otros.

Se dedica una gran cantidad de calor para precalentar el aire de combustión a la temperatura más alta disponible, que se obtiene mediante mezcla de aire procedente de los enfriamientos, rápido y lento con los gases de combustión.

En este caso, la cantidad de calor recuperado disponible para el resto de los consumidores es menor, según se muestra en la figura 26.

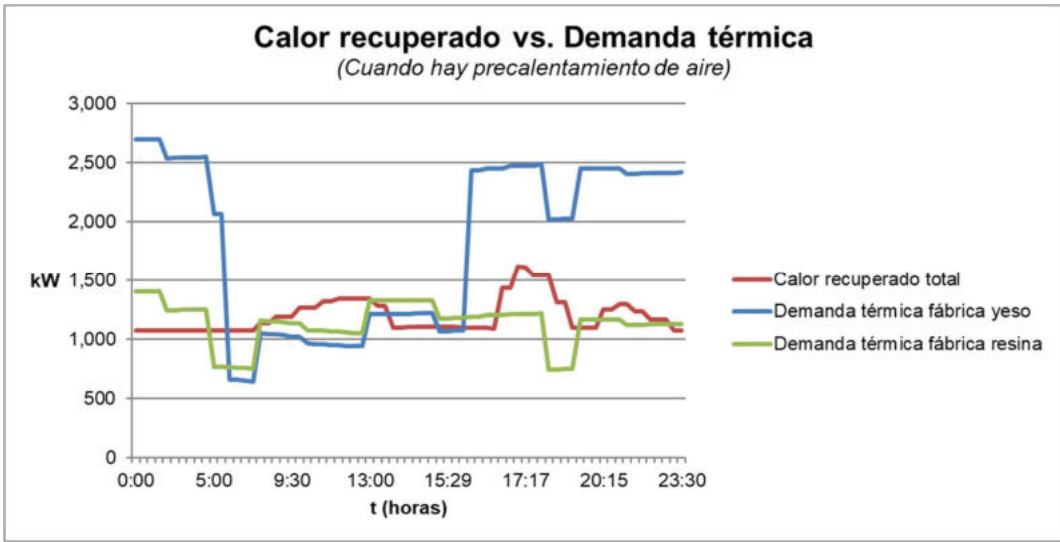




Figura 26. Calor residual vs. demanda cuando se precalientan los aires de horno. Fuente: (Elaboración propia)..

Para la fábrica de moldes de resina (curva verde), el calor recuperado y la demanda térmica son bastante similares, aunque en ambas se ven excesos y defectos de calor recuperable de los hornos. En cambio, para la de

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 76 de 231

yeso (curva azul), el calor residual sólo puede suministrar el conjunto de consumidores durante la franja horaria diurna, cuando no se requiere el calor necesario para el secado de moldes.

El almacenamiento de los excesos permite aprovechar una oportunidad más para mejorar la eficiencia (Merlin et al., 2016), transfiriendo excesos de calor de un período a otro. En la medida en que los excesos de calor acumulados puedan ser utilizados en los periodos de defecto, se ahorra el GN equivalente.

3.4.5 Hipótesis para la recuperación de agua



3.4.5.1 Destilación térmica multi-efecto

La destilación MED es la tercera tecnología de desalinización de agua con una participación del 7% en todo el mundo. Principalmente, el agua tratada está destinada al consumo humano, por lo que el nivel de calidad está ampliamente demostrado. Las plantas de destilación actuales pueden suministrar destilado con purezas de 5 a 1 ppm (Ophir and Gendel, 1994). Se han encontrado algunas investigaciones sobre la calidad del agua que cumple con los estándares establecidos por la OMS para el agua potable. Este es el nivel que las plantas de destilación pueden alcanzar (El Ebaidi, Saad K., 2013)

Las restricciones del agua de alimentación se refieren a los límites de solubilidad de las sales disueltas, especialmente CaSO₄, que pueden producir incrustaciones. Este es un factor a tener en cuenta al diseñar el sistema (Chernozubov et al., 1966). Sin embargo, una buena rutina de mantenimiento puede paliarlo mediante una limpieza regular con HCl. La salinidad que el sistema puede manejar alcanza 45.000 ppm de TDS (“*Total Dissolved Solids*”).

3.4.5.2 Consumos estándar de ósmosis inversa

Un sistema eficiente de ósmosis inversa, trabaja en un rango de consumo eléctrico de aproximadamente 7.200 kJ/m³ de agua destilada (Fritzmann et al., 2007) ,que es un valor relativamente realista según el estado actual de la técnica. La energía eléctrica para obtener la demanda de agua sería pues de 813,34 GJ / año. Por otro lado, cualquier sistema de ósmosis inversa tiene un rechazo relativamente alto de agua que, en el mejor de los casos, es de aproximadamente el 50% (Fritzmann et al., 2007). Esto significa que la demanda total de agua relativa al lavado de los moldes resulta aproximadamente el doble de la efectiva.

 	Tesis Doctoral		
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂			
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez		10/03/2021	Página 77 de 231

3.4.5.3 Ahorros por recuperación de agua mediante destilación

Después de todas estas consideraciones, los ahorros entre las dos tecnologías para tratar el agua se pueden resumir como se puede ver en la tabla 12:

Tabla 12. Consumo de energía y agua comparado para ambas tecnologías. Fuente: (Elaboración propia).

Consumos		MED	R.O.	AHORROS
Energía eléctrica	GJ/año	480	813	333
Potencia eléctrica	kW	24	41	17
Energía residual térmica	GJ/año	28.382	0	--
Potencia residual térmica	kW	1.416	0	--
Agua	m ³ /año	5.181	225.928	220.747

Se puede ver que hay importantes ahorros de electricidad y agua. Dado que la energía térmica se recupera del horno sin costes adicionales, la tecnología de destilación térmica es la más adecuada para la reducción de recursos.

3.4.5.4 Condensación de vapor con máquina de absorción

Como en otras aplicaciones industriales del concepto de absorción operado con calor residual (Lamine and Said, 2014), esta tesis propone una medida de reducción de consumo de agua que como al igual que con el caso de la destilación, se basa en el calor residual del horno. El modelo elegido es el que se muestra en el esquema de la figura 27.

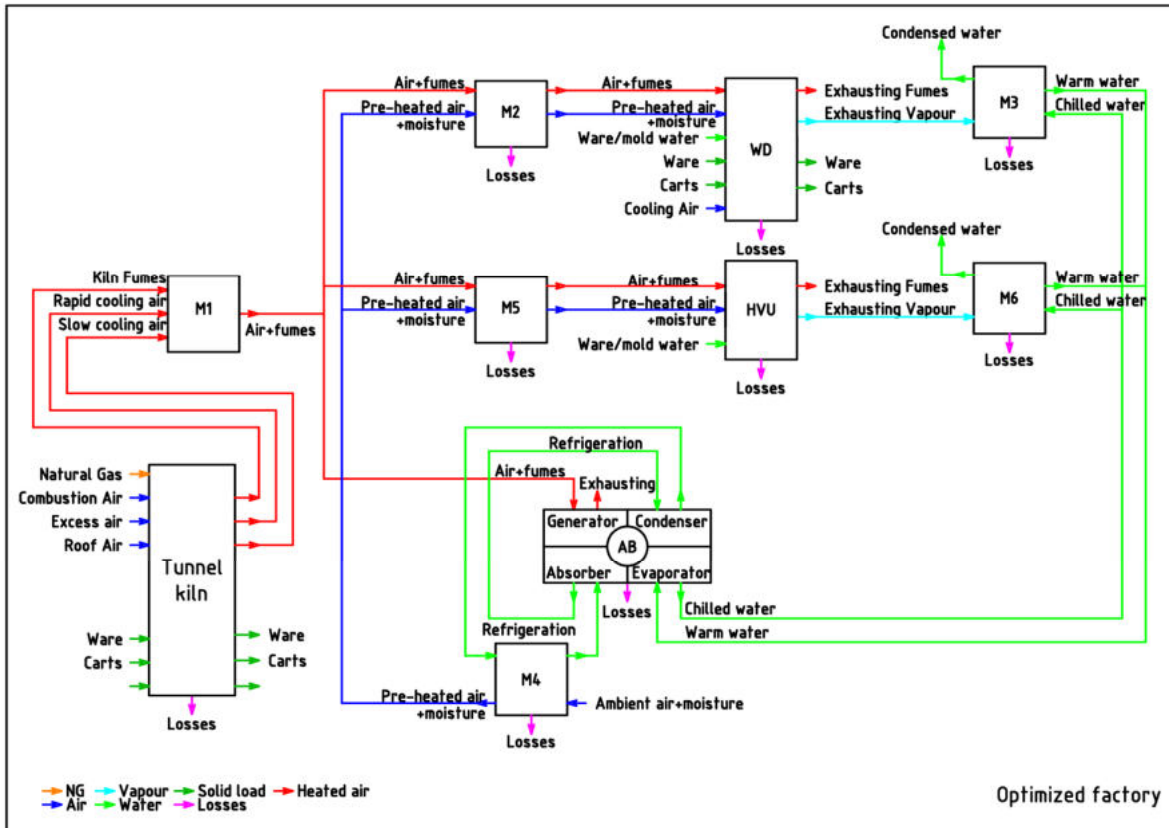



Figura 27. Esquema de recuperación térmica en máquina de absorción para condensar vapor residual. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).

Los tres flujos que salen del horno se mezclan en el mezclador M1, proporcionando un flujo relativamente seco y caliente para alimentar el secadero (WD), la central de acondicionamiento de aire (HVU) y eventualmente la máquina de absorción (AB) cuando hay un exceso de calor disponible.

El calor recuperado de un horno que tiene alto contenido de oxígeno y humedad, y está a una temperatura relativamente alta se mezcla con aire fresco adecuándose a las exigencias higrométricas de secadero o central. Este proceso lo lleva a cabo primero el mezclador M1, donde se mezclan diferentes flujos del horno. Posteriormente, los mezcladores M2 y M5 regulan el flujo de calentamiento a la temperatura requerida en secadero o central respectivamente. A continuación, la mezcla se impulsa a la cámara del secadero o a la sala de colado para absorber el agua de humedad de las piezas y moldes. Finalmente, el vapor obtenido es condensado en los condensadores M3 y M6, que básicamente son intercambiadores de calor donde se produce un cambio de fase, antes de descargarlo a la atmósfera exterior. Por otro lado, la refrigeración del ciclo de

 Escuela Internacional de Doctorado EIDUNED	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 79 de 231

absorción es proporcionada por aire fresco que a su vez es precalentado para actuar como aire de ventilación. Este efecto se realiza en el mezclador M4. El modelo de máquina de absorción seleccionado para esta investigación se basa en una máquina de bromuro de litio comercial convencional de una etapa como se muestra en la figura 28.

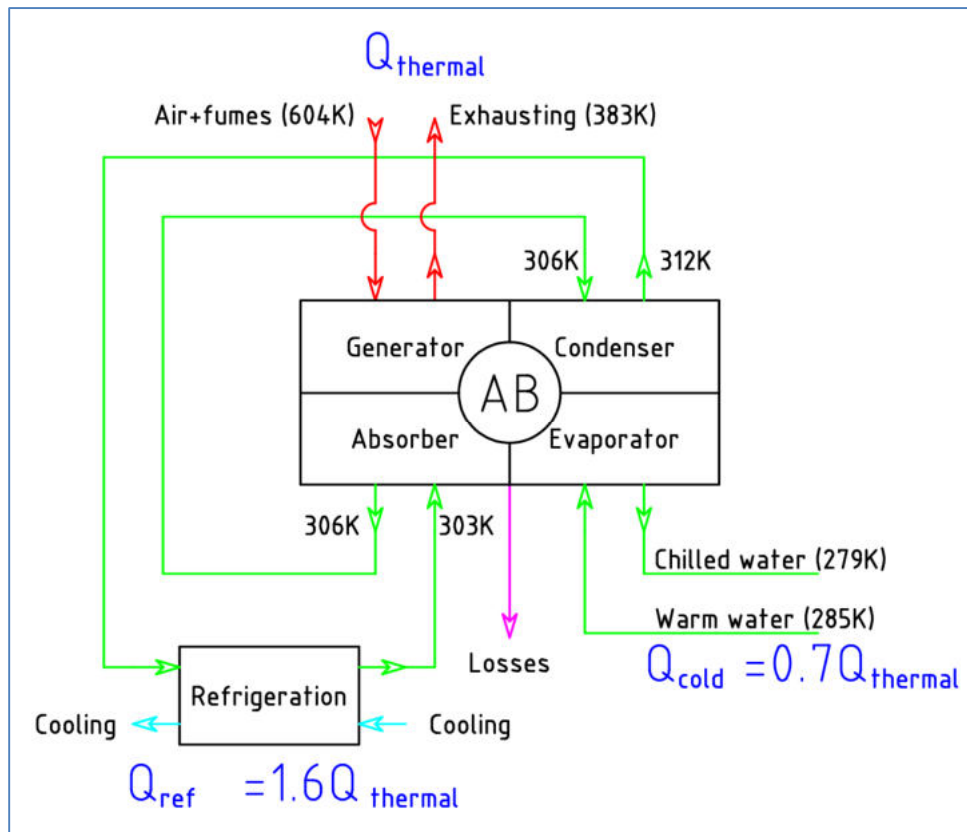




Figura 28. Esquema de modelo de la máquina de absorción. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).

Estos esquemas son válidos para diferentes tipos de tecnologías. Sin embargo, los requisitos térmicos y de agua varían según la naturaleza del molde.

Aunque no hay un tamaño estándar de fábrica, un horno de túnel estándar puede producir esta cantidad de asientos de inodoro por año. Por lo tanto, esta investigación toma esta referencia para el cálculo como la unidad de producción estándar. También se supone que la semana laboral regular es de 5/7 días con un mes de paro anual. Por otro lado, se ha establecido el peso promedio de 20 kg por pieza para un inodoro. Todos los cálculos se han llevado considerando estas hipótesis.

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 80 de 231

La tabla 13 muestra la cantidad de agua contenida en una barbotina o tras el colado, en la pieza verde, desde la preparación de la pasta hasta el secado para cada pieza cerámica.

Tabla 13. Contenido de agua en la cerámica durante la secuencia de procesos. Fuente: (Ceramic Technology Sanitary-ware, 2010)

WATER CONTENT/DRY WEIGH	%	Kg
Slip	48%	9.62
Demolding	21%	4.20
After casting period	20%	4.00
Entering the ware dryer	17%	3.40

El procedimiento para eliminar el agua de eliminar secuencialmente el agua de la barbotina se describe a continuación:

- En el colado, el agua pasa de la barbotina al molde.
- Tras el desmoldeo y hasta que comienza el calentamiento para secado de moldes, la pieza en la sala de colado, libera hasta un 1% de su contenido residual de agua.
- Durante el periodo de secado de moldes, las piezas remanentes en la sala de colado liberan hasta un 3% de agua.
- Finalmente, el 17% restante de contenido de agua es eliminado en el secadero.

De acuerdo a estos porcentajes y al peso de la pieza, puede calcularse la cantidad de agua que se eliminará durante cada proceso como se muestra en la tabla 14.

Tabla 14. Agua diaria a eliminar de la pieza durante los diferentes procesos. Fuente (Cuviella-Suárez et al., 2021).

WATER TO BE ELIMINATED	kg/piece	kg/day
Water in slip	9.62	20,742
Water retained in mold	5.42	11,690
Water evaporated in HVU in casting period	0.20	431
Water evaporated in HVU in drying period	0.60	1,293
Water evaporated in Ware-Dryer	3.40	7,328
TOTAL=	9.62	20,742

La capacidad de absorción de agua del aire depende de las características psicrométricas del mismo que son variables, en cada momento del día y a lo largo de todo el año. Para esta investigación, la temperatura, humedad y radiación solar provistas por el Servicio Meteorológico Nacional durante un año en períodos de 30 minutos se muestran en la figura 29.

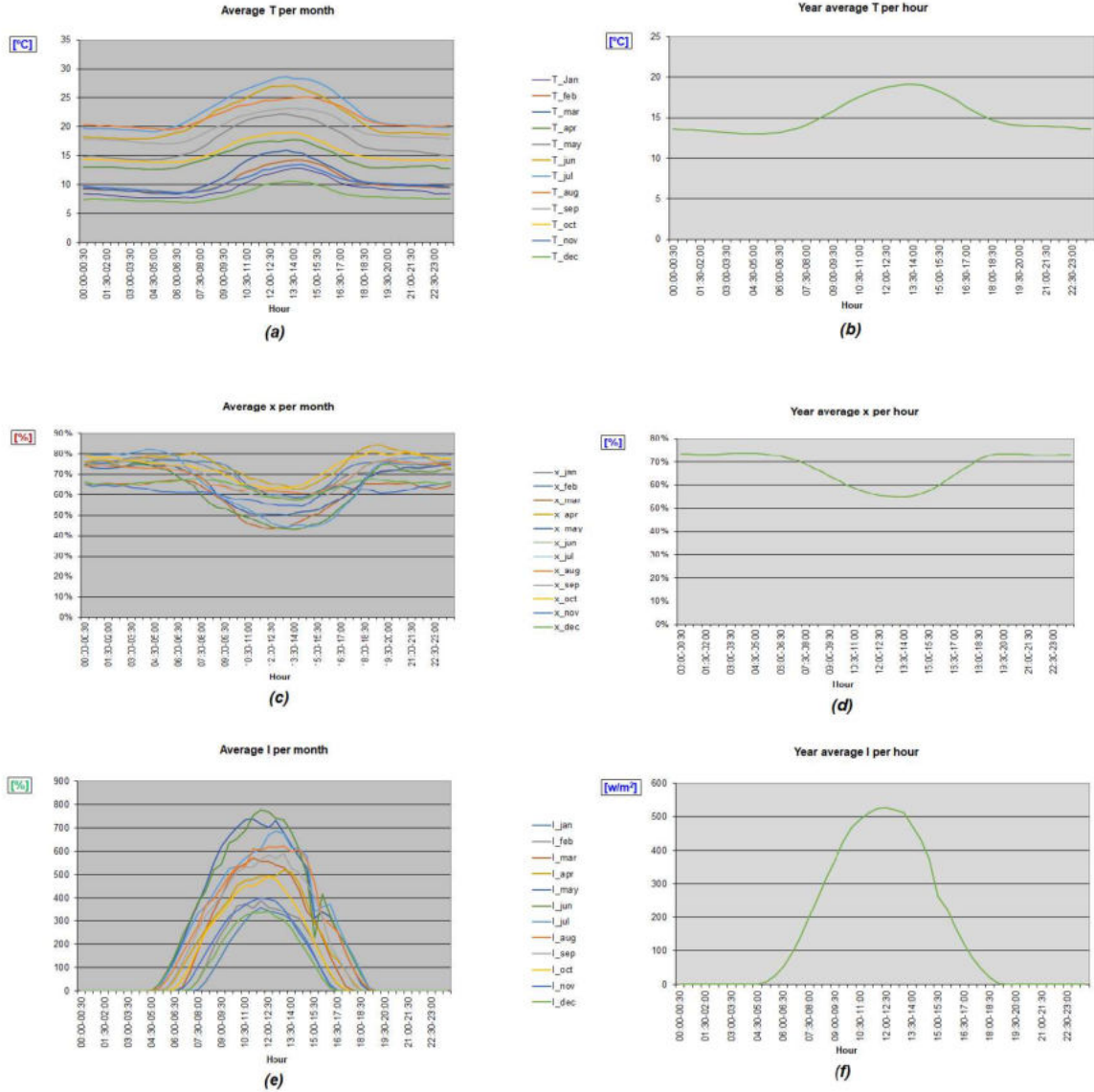




Figura 29. Promedio anual de condiciones ambientales Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).

La variabilidad climática afecta el rendimiento de la central de acondicionamiento de aire a lo largo el año debido a la temperatura, la humedad y la radiación solar. Esta tesis tiene en cuenta este efecto al calcular el rendimiento de los recursos cada media hora.

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 82 de 231

Para absorber el agua de la cerámica y el molde, el aire tiene que estar insaturado, pero dentro de la temperatura y humedad que se muestran en las tabla 15 y tabla 16 para ambos tipos de fábrica dependiendo de la naturaleza del molde.

Tabla 15. Parámetros higrométricos en la sala de colado en una fábrica de moldes de yeso. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).

States		CASTING DRYING	
		1	2
Time	h	10	14
T _{hall}	°C	25	40
T _{hall}	K	298	313
X _{hall}	%	75%	50%
e _{w hall}	Pa	3,169	7,377
X _{s hall}	g/kg	20.08	48.86
X _{hall}	g/kg	15.06	24.43
T _{external}	°C	17	14
T _{external}	K	290	287
X _{external}	%	61%	72%
e _{w external}	Pa	1,921	1,595
X _{s external}	g/kg	12.02	9.95
X _{external}	g/kg	7.37	7.17
Inlet ware water content	kg	20,742	8,621
Water to mold	kg	11,690	0
Water to evaporate from ware	kg	431	1,293
Ware remaining water	kg	8,621	7,328
Water to evaporate from mold	kg	0	11,690

Tabla 16. Parámetros higrométricos en la sala de colado en una fábrica de moldes de resina. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).

States		CASTING
		1
Time	h	24
T _{hall}	°C	25
T _{hall}	K	298
X _{hall}	%	75%
e _{w hall}	Pa	3,169
X _{S hall}	g/kg	20.08
X _{hall}	g/kg	15.06
T _{external}	°C	15
T _{external}	K	288
X _{external}	%	68%
e _{w external}	Pa	1,725
X _{s external}	g/kg	10.77
X _{external}	g/kg	7.28
Inlet ware water content	kg	20,742
Water to evaporate from ware	kg	1,724

Conocidas las condiciones ambientales exteriores e interiores deseadas, se puede calcular la demanda térmica en cada momento del año para conseguirlas. A tal efecto se han de considerar las siguientes variables:

- La energía de evaporar el agua

- La energía de calentar el aire ambiente
- La energía de pérdidas por transmisión a través de los cerramientos
- La energía de irradiación solar

La figura 30 muestra la clara diferencia entre los períodos de colado y secado en una fábrica de moldes de yeso debido a la cantidad de agua que se evaporará.

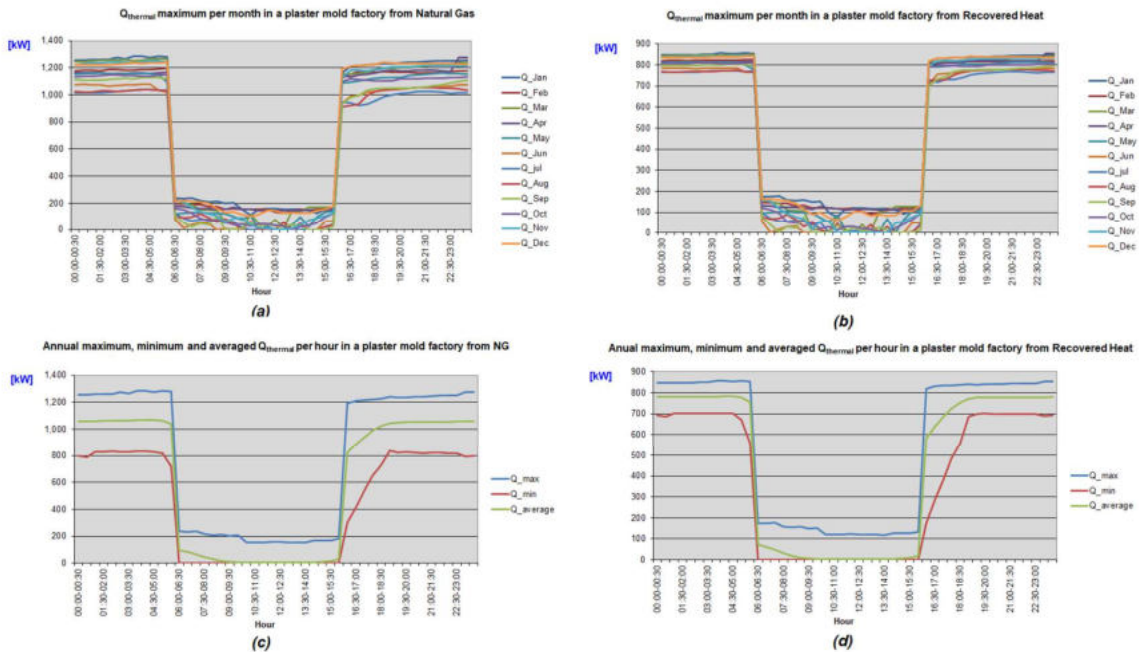


Figura 30. Potencia térmica de acondicionamiento de aire en una fábrica de moldes de yeso. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).

Por otro lado, en una fábrica de moldes de resina, el agua de los moldes no se evapora. Por lo tanto, la potencia térmica es mucho menor y no hay una gran diferencia a lo largo del ciclo, sino las relacionadas con las condiciones climáticas, como se muestra en la figura 31.

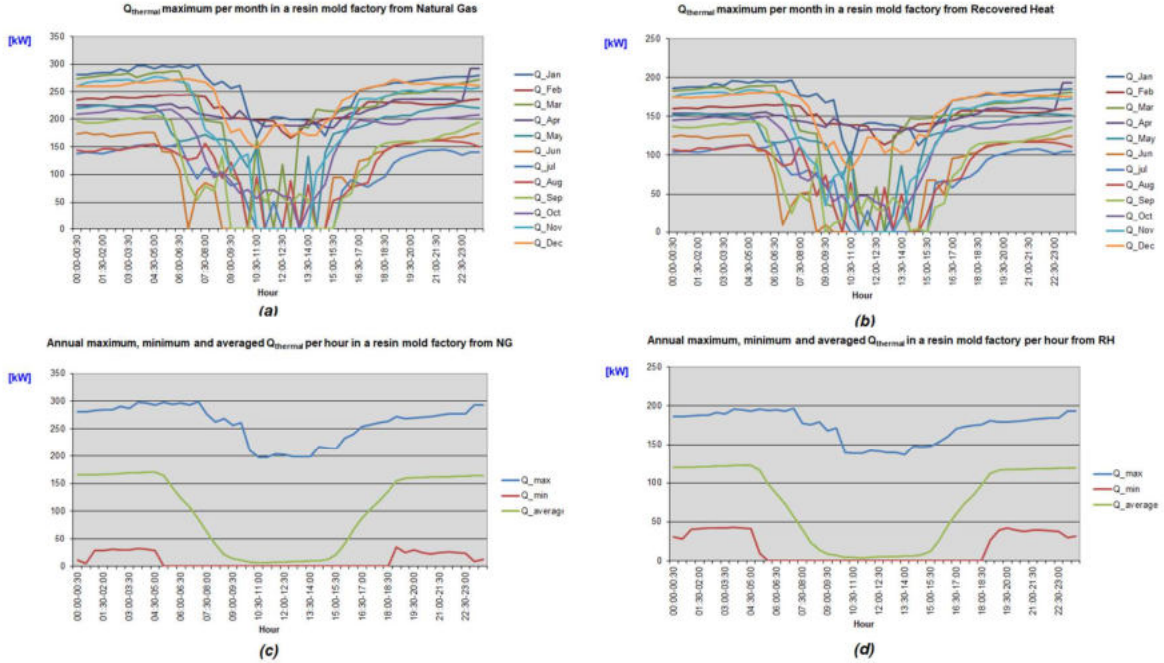


Figura 31: Potencia térmica de acondicionamiento de aire en una fábrica de moldes de resina. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).

Con respecto al proceso de secado, los cambios climáticos no afectan el rendimiento ya que el aire fresco requerido se toma de la sala de colado que ha sido tratada previamente por la central de acondicionamiento.

Con un contenido de agua del 17%, la vajilla se lleva al secadero cuyas condiciones ambientales se muestran en la tabla 17 para las cinco fases de secado diferenciadas.

Tabla 17. Parámetros de la curva de secado de las piezas cerámicas. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).

States		AMBIENT		HEATING			COOLING
		0	1	2	3	4	5
Time	h		2	3	3	2	1
T _{hall}	°C	25	38	50	75	90	25
T _{hall}	K	298	311	323	348	363	298
X _{hall}	%	55%	75%	50%	30%	20%	55%
e _{w hall}	Pa	3,169	6,449	12,339	38,654	70,529	3,169
X _{s hall}	g/kg	20.08	42.29	86.28	383.79	1,425.68	20.08
X _{hall}	g/kg	11.05	31.72	43.14	115.14	285.14	11.05
Inlet water content	kg		3,664	3,125	2,371	1,293	
Water to evaporate	%		2.50%	3.5%	5.00%	6.00%	
Outlet water content	kg		3,125	2,371	1,293	0	
Water to evaporate	kg		630	882	1,261	1,513	

El proceso en el secadero es, desde un punto de vista termodinámico, el mismo que para el acondicionamiento del aire. Mediante la recirculación de aire en el interior y con la adición de aire relativamente seco de la sala de colado que se ha de calentar previamente, se facilita la evaporación de agua de la pieza cerámica hasta que el aire se satura. A tal efecto ha de mantenerse una impulsión de aire nuevo constante que mantenga las condiciones higrométricas de la cámara del secadero.

Los parámetros de construcción de un secadero se han tomado de la tabla 18:

Tabla 18. Parámetros constructivos de un secadero de piezas cerámicas. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).

PRODUCTION PARAMETERS OF THE WARE DRYER		
Length	21,520	mm
Wide	11,800	mm
High	2,900	mm
"U" enclosure	2.83	w/m ² /°C
Heating transfer surface	332	m ²
Carts number	64	
Pieces per cart	16	
Cart weigh	200	kg
Production	5.00E+05	Pieces/year
Labor days	232	days/year
Nº cycles	2	cycles/day
Pieces in dryer	1,078	pieces in dryer
Wet weigh of piece	23	kg
Dry weigh of piece	20	kg
Initial water content	17.00%	Base húmeda
Water content	3,665	kg
Specific heat of cart	0.522	kJ/kg/°C
Specific heat of ware	1.13	kJ/kg/°C
LHV NG	48,000	kJ/kg
Temperature of the hall	25	°C
Humidity in the hall	50.00%	

La demanda térmica del secadero y el vapor resultante liberado a través de la chimenea de escape se muestran en la figura 32. En ambos casos se ve una pequeña diferencia entre la fábrica convencional, donde la demanda térmica se satisface mediante gas natural o la optimizada, donde el calor es recuperado y, por tanto, el aire tiene más temperatura y poder de absorción hídrica.

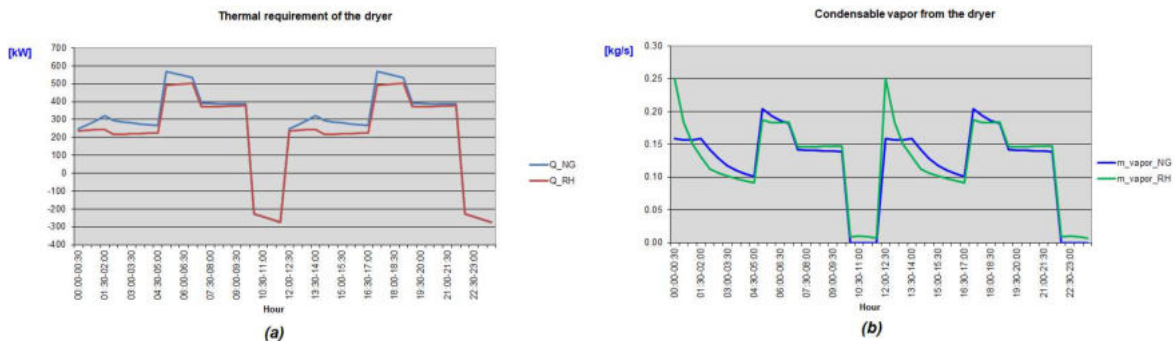




Figura 32. (a) Demanda térmica [kW]. (b) Contenido de humedad [kg/s]. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021)

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 86 de 231

3.4.6 Hipótesis para la cogeneración

Mediante el acoplamiento de la cogeneración se consigue optimizar la producción eléctrica y obtener calor excedente para realizar la destilación. La turbina se diseña para un grado de carga definido con un máximo de eficiencia. Cuando este grado cambia, la eficiencia de esta se reduce. La demanda eléctrica real de la fábrica es variable, por lo que la potencia de la turbina debe ajustarse y, por lo tanto, la eficiencia de la turbina está disminuyendo a medida que el grado de carga se modifica. Se utiliza una curva de demanda eléctrica horaria durante un año para simular el comportamiento real del sistema calculando las variables en cada hora de acuerdo con la demanda eléctrica real y sumándolas para todo el año.

La forma del tipo de curvas de demanda diaria no varía mucho a lo largo de los meses dentro del período del año (Cuviella-Suárez et al., 2012). Sin embargo, el máximo de potencia depende más del mes. Se puede ver un menor nivel de demanda durante los meses de verano. Las curvas diarias para cada mes se muestran en la figura 33.

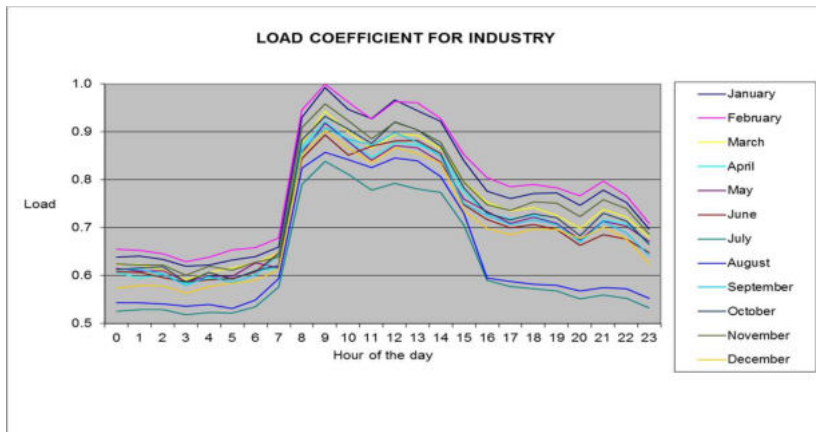




Figura 33. Coeficiente de carga tipo de un suministro eléctrico industrial. Fuente: (Cuviella-Suárez, Carlos et al., 2019).

Una vez que se conocen la configuración y la demanda, la única pregunta es el tamaño de la turbina. Con una turbina pequeña, se debe comprar electricidad y gas natural para satisfacer las necesidades, aunque trabajará en el punto de diseño durante todo el año con la mejor eficiencia. Por otro lado, cuando la turbina está sobredimensionada, la mayoría de las veces se saldrá del diseño, lo que va en detrimento del rendimiento. Se trata de buscar un compromiso entre el tamaño de la turbina y las demandas térmicas y eléctricas reales. La optimización se puede lograr desde el punto de vista económico según los precios de la energía o desde el punto

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 87 de 231

de vista energético según el consumo real de combustible para el conjunto de turbina de gas y demandas térmica y eléctrica.

La optimización energética sólo depende de la demanda. Por lo tanto, la optimización energética se resolverá por medio de una correlación por mínimos cuadrados con el conjunto de pares de potencias y su consumo correspondiente.

La optimización económica no es tan fácil ya que la potencia óptima depende de los dos precios variables, gas y electricidad. El proceso para calcular la GT óptima es encontrar una función que correlacione cada escenario de precios con la potencia óptima correspondiente.

La eficiencia de una turbina de gas disminuye con el grado carga (Lazzaretto and Andrea, 2001) como muestra la figura 34.

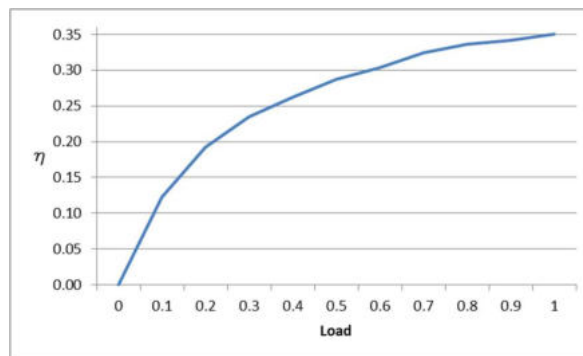




Figura 34. Rendimiento de un turbine de gas frente al grado de carga. Fuente: (Cuviella-Suárez, Carlos et al., 2019).

Para correlacionar la función coste, bi-variante según los precios de electricidad y gas, se desarrolla una red neuronal artificial que se entrena con varios conjuntos de datos. Cada conjunto incluye; precio de gas natural, precio de la electricidad, potencia óptima.

Cada escenario de precios es un problema de optimización único que debe resolverse mediante la minimización iterativa del coste calculado a lo largo del año para el par de precios y las curvas de demanda del que resulta una potencia de turbina óptima para minimizar el coste total de gas natural y electricidad. Es decir, cada punto de entrenamiento de la red neuronal se realiza a base de un proceso iterativo que optimice la turbina para ese par de precios.

La red neuronal se entrena con estos datos para proporcionar la función que define la potencia óptima de turbina en función de los dos precios de las energías.

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 88 de 231

3.4.7 Hipótesis para el análisis exergético

Se ha seleccionado esta técnica por su mejor definición de energía realmente recuperable, frente a la energía residual real.

El procedimiento de resolución comienza a partir de la fábrica convencional con un análisis exergoeconómico para cuantificar la exergía que se puede recuperar e identificar las posibles formas de llevarlo a cabo. Como se ha indicado en los apartados anteriores, la configuración de la fábrica se optimiza por medio de métodos de ingeniería térmica para recuperar el calor residual de algunos subprocesos para aprovecharlos en otros, a fin de reducir el consumo de combustible. Finalmente, tras realizar un segundo análisis a la fábrica optimizada ambas configuraciones se comparan para mostrar el ahorro global y los resultados se comparan con los datos existentes relativos a esta industria.

El cálculo se basa en los modelos termodinámicos elaborados para cada componente del sistema. En este sentido, el modelado computacional permite al investigador hacer predicciones sobre los resultados que posteriormente deben ser comprobados empíricamente en una segunda etapa de investigación (van Vugt et al., 2019). En la primera etapa, los resultados deben ser coherentes con los datos existentes. En el área de la simulación híbrida (Brailsford et al., 2019), la investigación proporciona una herramienta para evaluar mejor la relación entre los datos reales existentes en la fabricación de artículos sanitarios y los parámetros que permiten optimizar el rendimiento de la eficiencia de los recursos como otros autores han desarrollado en otros campos (Nabavi-Pelesaraei et al., 2013b). Muchos investigadores hacen uso de modelos: (Nabavi-Pelesaraei et al., 2013a) y (Nabavi-Pelesaraei et al., 2019) para las industrias de procesamiento de maní y arroz, respectivamente.

El procedimiento de resolución se muestra en la figura 35 de la siguiente manera:

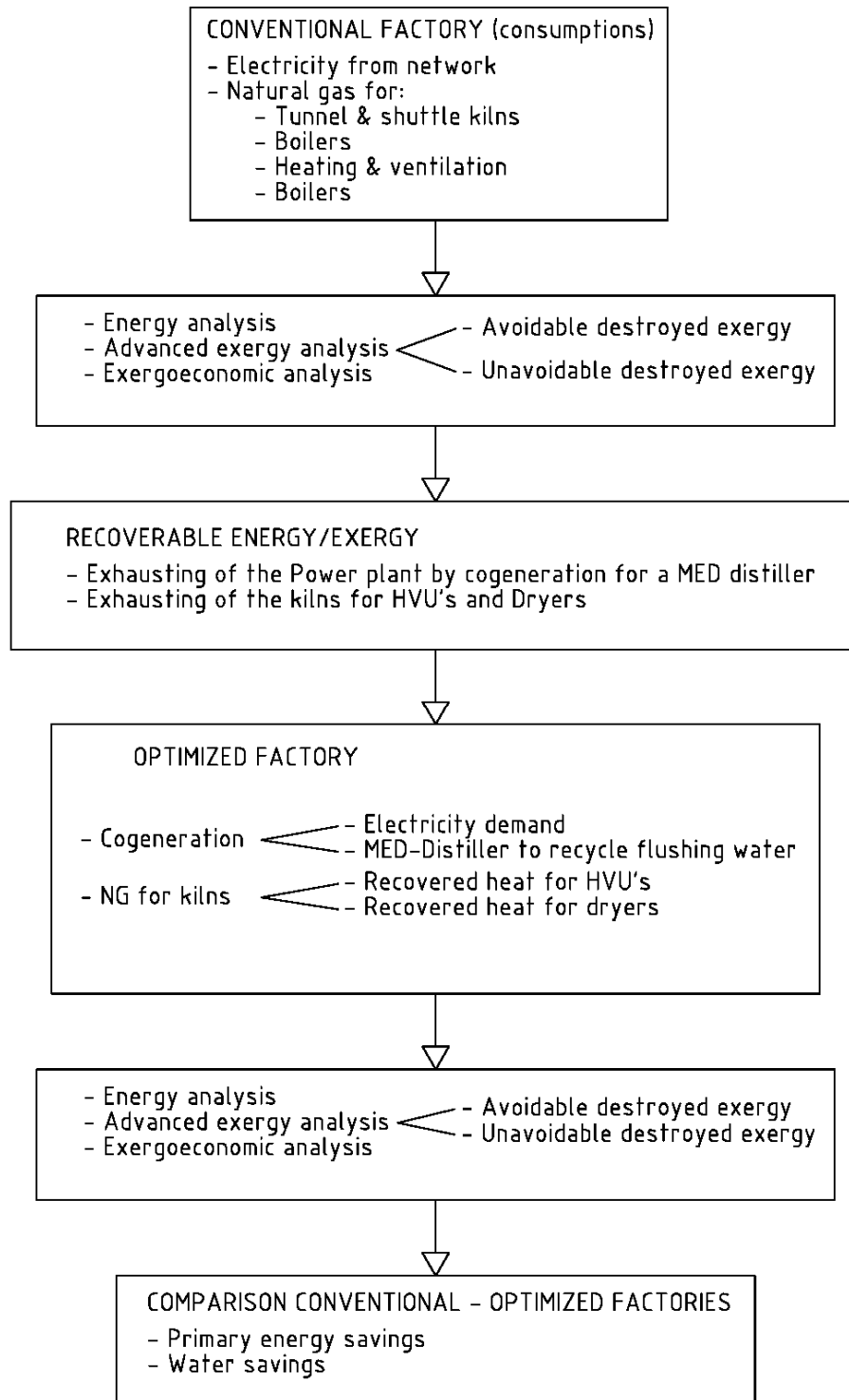


Figura 35. Esquema de procedimiento de resolución. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019b).

La propuesta de la tesis es reorganizar los flujos térmicos añadiendo una cogeneración que suministre la energía eléctrica y permita que el calor residual adicional sea aprovechado en el tratamiento del agua para su reutilización. En la publicación 2 se presenta el caso de la destilación. Además, el calor residual de los hornos se recupera para precalentar los aires entrantes en los hornos y suministrar energía térmica a los consumidores térmicos de la fábrica como muestra la figura 36:

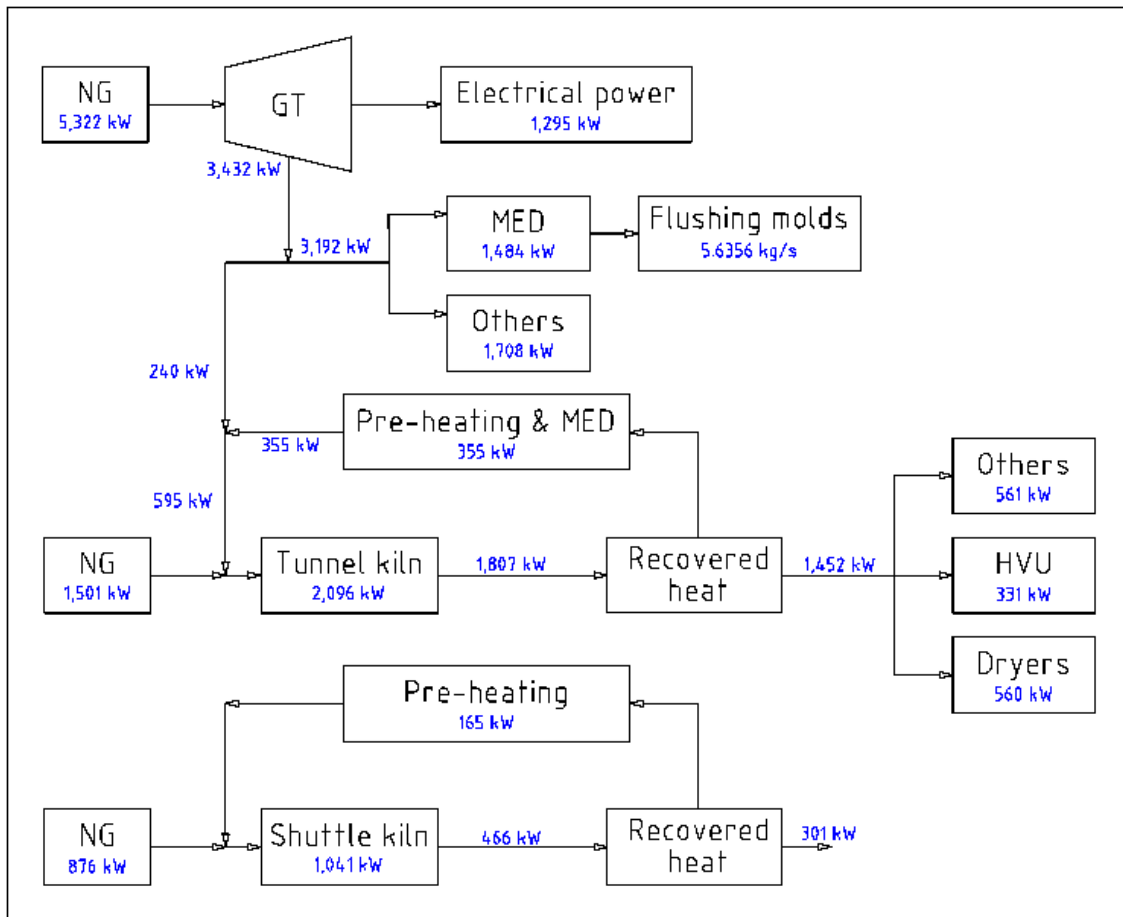




Figura 36. Necesidades térmica, eléctrica e hídrica de una fábrica optimizada. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019b).



Esta fábrica optimizada se compara con la convencional mediante un análisis de exergía avanzado para identificar y cuantificar la reducción de exergía consumida. En primer lugar, se ha llevado a cabo un análisis energético y exergético de cada uno de los equipos individualmente para caracterizar cada uno de ellos desde el punto de vista termodinámico, estableciendo el mapa completo de flujos entre ellos. Posteriormente se realiza el análisis del proceso conjunto en los dos casos, convencional y optimizado. para las dos configuraciones. Con

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 91 de 231

el fin de cuantificar la cantidad de exergía destruida inevitablemente, se hace un supuesto de las condiciones de eficiencia máxima disponible teórica en la tecnología existente. Esto permite ver cuál sería la menor destrucción posible de exergía y por diferencia, calcular la exergía destruida en el proceso real que podría ser evitada. A esto se añade finalmente un análisis exergoeconómico a fin de cuantificar el ahorro posible de combustible o energía primaria correspondiente.

El modelado del sistema se ha abordado desde un punto de vista térmico para cada subproceso dentro del proceso general. Se hace un balance de masa, energía y exergía en cada componente del sistema. Los sistemas se han calculado según el concepto convencional de sistemas termodinámicos de combustión y transferencia de calor. Respecto a las eficiencias y pérdidas se consideran las convencionales en la literatura termodinámica (Rosen, 2002). Los diferentes componentes del sistema y flujos considerados se han definido de la siguiente manera:

- Planta de energía (PP):
 - Entradas: GN y aire para la combustión.
 - Salidas: gases de combustión, pérdidas térmicas y energía eléctrica.
- Caldera (BO):
 - Entradas: GN y aire para la combustión y agua para calentar
 - Salidas: gases de combustión, pérdidas térmicas y agua caliente.
- Secaderos (WD):
 - Entradas: GN y aire para combustión, aire de secado, humedad atmosférica, agua de los artículos sanitarios, agua pulverizada, cerámica, carros de transporte.
 - Salidas: gases de combustión, pérdidas térmicas, vapor de agua, cerámica, carros de transporte.
- Unidad de calefacción y ventilación (HVU):
 - Entradas: GN y aire para combustión, aire de secado, agua de los artículos sanitarios.
 - Salidas: gases de combustión, pérdidas térmicas, vapor de agua.
- Horno túnel. Sección de calentamiento (calentamiento TK):
 - Entradas: GN y aire para combustión, aire de difusión y exceso de aire, soportes de cerámica, cerámica, carros de transporte.
 - Salidas: gases de combustión, pérdidas térmicas, soportes de cerámica, cerámica, carros de transporte.
- Horno túnel. Sección de enfriamiento (enfriamiento TK):
 - Entradas: Aire de enfriamiento rápido y lento y aire contra-vec (cortina de aire en la salida), soportes de cerámica, cerámica, carros de transporte.

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 92 de 231

- Salidas: aire de enfriamiento rápido y lento, pérdidas térmicas, soportes de cerámica, cerámica, carros de transporte.
- Horno intermitente. Sección de calentamiento (SK-calefacción):
 - Entradas: GN y aire para combustión, aire de difusión e inyección, soportes de cerámica, cerámica, carros de transporte.
 - Salidas: gases de combustión, pérdidas térmicas, soportes de cerámica, cerámica, carros de transporte.
- Horno intermitente. Sección de enfriamiento (SK-enfriamiento):
 - Entradas: Difusión, inyección y aire de enfriamiento, soportes de cerámica, cerámica, carros de retención.
 - Salidas: aire de enfriamiento rápido y lento, pérdidas térmicas, soportes de cerámica, cerámica, carros de transporte.
- Turbina de gas (GT):
 - Entradas: GN y aire para la combustión.
 - Salidas: gases de combustión, pérdidas térmicas y energía eléctrica.
- Destilador multi-efecto (MED):
 - Entradas: gases de combustión (calor recuperado) y agua.
 - Salidas: gases de combustión, pérdidas térmicas de destilado y salmuera.
- Agua de lavado (FL):
 - Entradas: agua destilada tibia.
 - Salidas: agua de lavado fría y pérdidas térmicas.

De acuerdo con los modelos anteriores, cada componente del sistema se ha analizado individualmente para establecer y calcular sus flujos de energía y exergía identificando cada variable termodinámica como se indica en las figura 37 y figura 38. Estos esquemas representan el mapa de ambas configuraciones mediante los flujos termodinámicos dentro del proceso térmico general.

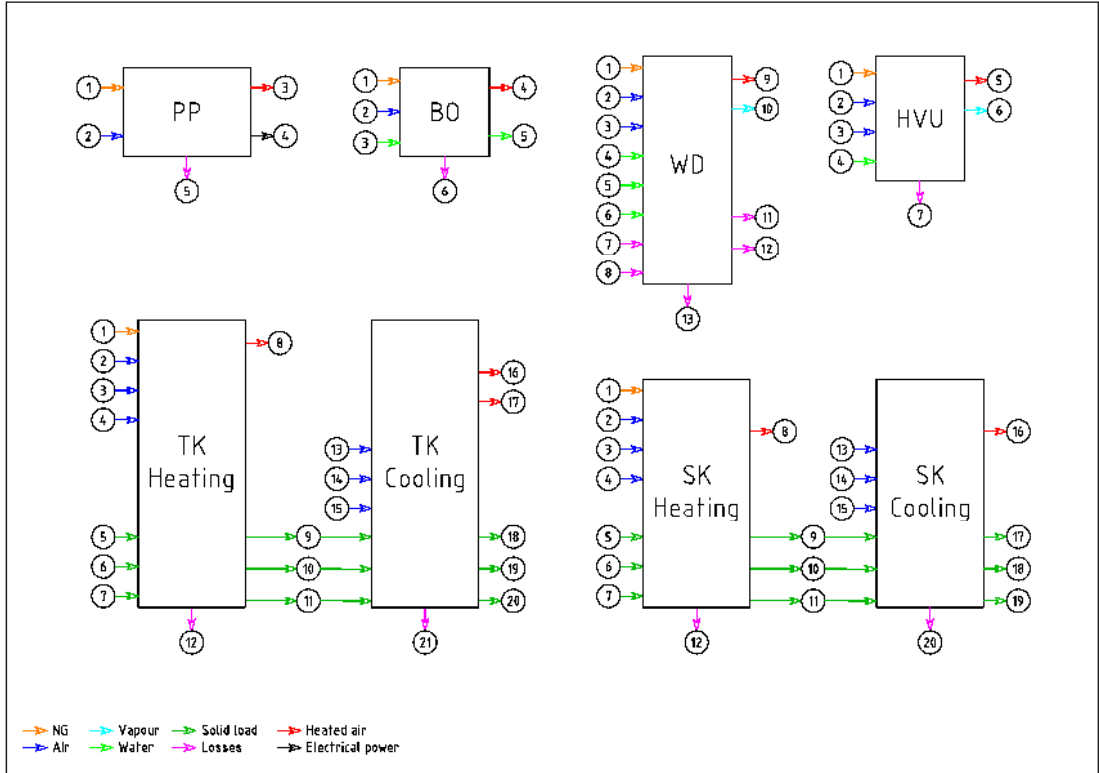


Figura 37. Esquema de flujo de una fábrica convencional. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019b)

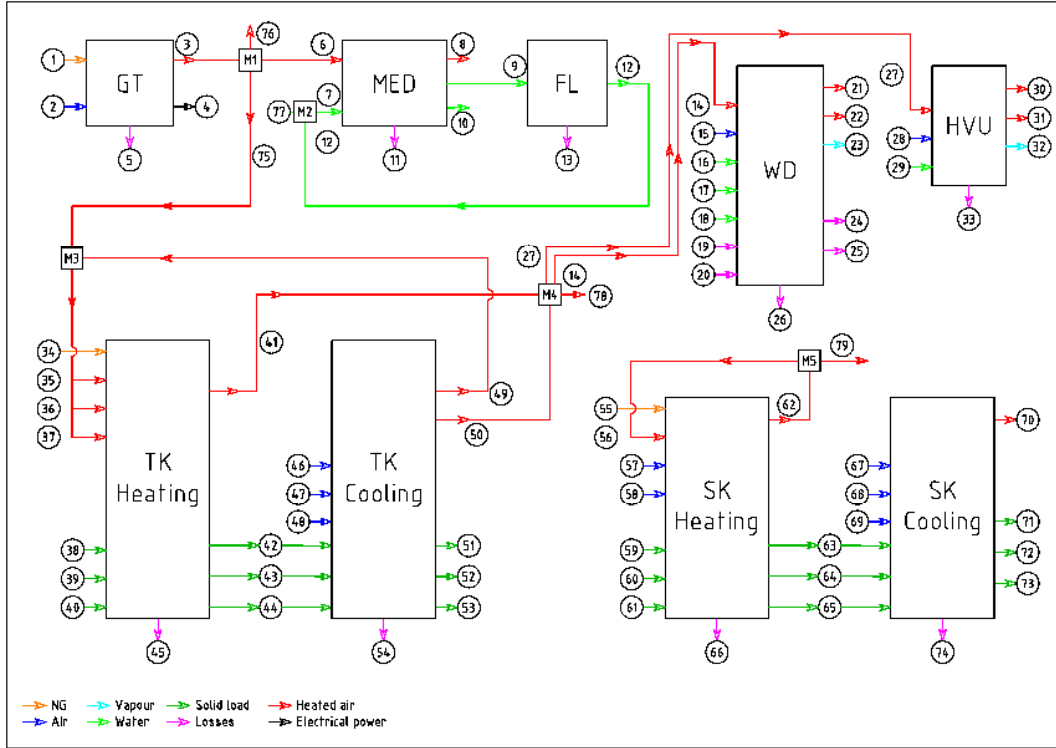




Figura 38. Esquema de flujo de una fábrica optimizada. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019b)



Con el fin de producir un análisis de exergía avanzado, es necesario identificar las exergías destruidas "evitables" e "inevitables". Permiten cuantificar hasta qué punto se puede optimizar un sistema (Vuckovic et al., 2012) por medio de la mejora del diseño de la construcción. La exergía inevitable proviene de ineficiencias debidas a limitaciones técnicas o económicas. Deben hacerse algunas suposiciones ya que la eficiencia total no se puede lograr en la práctica. La tabla 19 muestra las consideraciones tenidas en cuenta en el alcance de esta investigación para un equipo óptimo versus uno estándar o real.

Tabla 19. Condiciones inevitables de las diferencias de eficiencia. Fuente: (Tsatsaronis et al., 2003)

Equipment			Real conditions	Optimal conditions
PP	Electrical efficiency	h_{el}	0.37	0.40
BO	Thermal efficiency	h_{th}	0.90	0.95
TK	Perfect Combustion	air excess	0.10	0.00
	Better thermal insulation	thermal conductivity	100.00%	50.00%
TK	Better cooling efficiency	air flow	100.00%	75.00%
	Better thermal insulation	thermal conductivity	100.00%	50.00%
WD	Better thermal insulation	thermal conductivity	100.00%	50.00%
HVU	Perfect Combustion	air excess	0.10	0.00
	Better thermal insulation	thermal conductivity	100.00%	50.00%
SK	Better thermal insulation	thermal conductivity	100.00%	50.00%
	Better cooling efficiency	air flow	100.00%	75.00%

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 95 de 231

Comparando configuraciones entre sí, se pueden calcular ahorros cuando una fábrica convencional se optimiza. Por otro lado, también se puede ver cómo se puede reducir la exergía destruida en las mejores condiciones disponibles. Esta diferencia representa la exergía destruida "*evitable*", ya que puede eliminarse cambiando la tecnología. La exergía residual en las mejores condiciones disponibles representa la exergía destruida "*inevitable*" que no puede evitarse dentro del estado de la técnica actual.

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 96 de 231



4 MARCO TEÓRICO EN EL QUE SE INSCRIBE EL TEMA DE LA TESIS Y HERRAMIENTAS METODOLÓGICAS. REMISIÓN A LAS PUBLICACIONES

El marco teórico en el que se enmarca la tesis se corresponde directamente con las características ya expuestas en la introducción y en las hipótesis previas del sector industrial tratado. Esto es, con un tratamiento secuencial, se pretende aprovechar la condición particular del escalonamiento térmico de los procesos constituyentes para, progresivamente,

- encontrar la energía recuperable
- cuantificar su cantidad y calidad
- reutilizarla mediante técnicas novedosas a fin de reducir el consumo global del proceso general
- cuantificar la mejora de eficiencia y analizar la reducción de consumos

Las herramientas que se han utilizado son:

- Modelización numérica de cada proceso termodinámico involucrado en la producción de la cerámica sanitaria. Se ha construido un sistema de ecuaciones matemáticas que por simulación numérica permiten evaluar los resultados de necesidades de recursos para cada escenario posible de condiciones de operación. En el desarrollo de esta tesis se han realizado todos los cálculos con unas hipótesis de partida determinadas en cuanto a los parámetros de operación se refiere. No obstante, el modelo definido sirve para cualquier escenario plausible de operación con sólo cambiar las variables de entrada. Esta metodología permite de esta forma, simular diferentes diseños posibles de planta de producción al efecto de analizar la mejor opción de construcción de una nueva unidad de fabricación sean cuales sean sus necesidades de producción.
- Técnicas de optimización para maximizar ahorros o minimizar consumos como, por ejemplo, la correlación de una variable mediante ajuste por mínimos cuadrados, correlación multivariable mediante redes neuronales de autoaprendizaje, etc.
- Análisis exergético avanzado para poder establecer la cantidad efectiva de energía que puede recuperarse y la que no, dependiendo del estado muerto de exergías. Por otro lado, esta técnica permite evaluar la exergía disponible en los diferentes sub-procesos a fin de establecer el impacto de cada uno de ellos en la mejora global y poder concentrar los recursos de mejora en los puntos más interesantes. Respecto a la exergía destruida, se puede con esta técnica, segregarla según los conceptos de “*evitable*” y “*no evitable*”. El primero hace referencia a la fracción de exergía destruida que con una tecnología de los equipos y medios considerados podría aprovecharse respecto a la tecnología más avanzada que

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 97 de 231



pueda disponerse en el estado actual del arte. El segundo concepto involucra la fracción que siempre sería destruida debido a efectos no evitables y que no es función de la calidad de ejecución de proceso.

- Análisis de sensibilidad para estudiar las diferencias de comportamiento de los resultados en función de diferentes variables de entrada del sistema, estableciendo distintos escenarios de operación que facilitan el diseño de instalaciones en previsión de posibles cambios imprevistos de las condiciones de trabajo.

Como ya se ha mencionado, la tesis se ha planteado en una serie secuencial de acciones para elaborar la evolución de la industria en su estado actual definido como “*convencional*” hacia un estado óptimo en lo que a consumo de recursos se refiere definido como “*optimizado*”. En línea con esta secuencia, se han planteado las publicaciones como sigue:

- En primer lugar, se ha elaborado en la “*publicación 1*” un estudio de los consumos en la fábrica convencional y sus residuos energéticos e hídricos a fin de elaborar el mapa de los mismos y el potencial de ahorros posibles antes de establecer las posibles acciones de mejora.
- Una vez definida la posibilidad de recuperar calor y agua, y aprovechando el mapa de recursos, se analiza la reutilización de efluente líquido mediante destilación con calor recuperado en la “*publicación 2*”.
- En la “*publicación 3*”, se estudia una segunda acción de reducción de consumo hídrico del agua eliminada en forma de vapor, mediante la condensación por una enfriadora de absorción operada también con calor recuperado.
- En la “*publicación 4*” se analiza como optimizar el consumo energético una vez obtenido el máximo ahorro de agua. En este caso, y debido al aumento de demanda térmica requerido por la reutilización del agua, se estudia la mejora de eficiencia global a través de la incorporación de una cogeneración cuyo residuo térmico suministre el calor necesario además de reducir las pérdidas inherentes al transporte del suministro eléctrico público.
- Finalmente, en la “*publicación 5*” se acomete el análisis exergoeconómico del sistema donde se valoran los ahorros conseguidos y se comparan las eficiencias de la instalación convencional frente a la optimizada a fin de justificar la conveniencia de las acciones necesarias para reducir los costes, el impacto medioambiental y, en definitiva, la sostenibilidad de un sector industrial de gran relevancia global.

A continuación, se describen los métodos particulares utilizados en cada una de las publicaciones y su aportación al conjunto de la investigación de la tesis.

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 98 de 231

4.1 PUBLICACION 1: “*Management tool to optimize energy and water consumption in the sanitary-ware industry*”

El planteamiento de esta publicación es aportar la información termodinámica necesaria para la comprensión físicomatemática de la fábrica contemplada como un modelo de cálculo que relaciona todas las variables, tanto de entrada como de salida en lo que a consumo de recursos se refiere. Por otro lado, y porque es la primera publicación de la serie, hace un breve análisis del estado del arte en la fabricación de artículos sanitarios y una revisión bibliográfica al respecto.

Se establece el modelo matemático de consumos eléctricos, térmicos e hídricos y con ellos se definen las cantidades de recursos, los residuos resultantes y las posibles conexiones entre ambos, así como las medidas de potenciales ahorros y mejoras de eficiencia como punto de partida de la investigación siguiendo el hilo de continuidad establecido en la sección 3.3.

4.1.1 Modelo eléctrico

El modelo adoptado para los cálculos de consumo eléctrico consiste en analizar todas las cargas eléctricas y su comportamiento a lo largo del ciclo de trabajo. Las magnitudes a caracterizar son:

- Potencia eléctrica nominal y número equipos (kW)
- Ciclo de trabajo mediante la relación de horas "*marcha-paro*"
- Coeficientes de uso y simultaneidad para obtener la potencia promedio
- Potencia promedio para cada carga (kW)
- La energía para un día y todo el año (MWh)
- Emisiones de CO₂ de la energía eléctrica generada en una central eléctrica basada en combustibles fósiles (t/año)

Elaborando una base de datos a partir de los diferentes equipos eléctricos y sus características se calculan las potencias y energías para las diferentes áreas o procesos de la fábrica globalmente. Los consumos resultantes se muestran en las tabla 20 y tabla 21;

Tabla 20. Consumo eléctrico en una fábrica de moldes de yeso. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).



ELECTRICAL ENERGY CONSUMPTION		PLASTER CASTING									
ELECTRICAL CONSUMPTION		Nº	P _{unit} (kW)	P _{nom} (kW)	RUN (hours)	STOP (hours)	use Coeff. f _u	sim. Coeff f _s	P _{average} (kW)	W _{day} (kWh/day)	W _{year} (kWh/year)
RAW MATERIALS											
Mills		2	110	220.00	16.00	8.00	1.00	1.00	220.00	3,520	816,640
Belts		7	5	35.00	16.00	8.00	0.67	0.75	17.50	280	64,960
Pumps		3	10	30.00	16.00	8.00	0.67	0.75	15.00	240	55,680
Hoppers		6	3	15.00	16.00	8.00	0.67	0.75	7.50	120	27,840
	Power=			300.00				0.87	260	4,160	965,120
	Lighting=			7.50	12.00	12.00	0.50	1.00	4	45	10,440
	Sub-Total RAW MATERIALS			307.50					264	4,205	975,560
SLIP PREPARATION											

Blungers	2	125	250.00	16.00	8.00	1.00	0.80	200.00	3,200	742,400	
Sievers	6	2	9.00	16.00	8.00	0.80	1.00	7.20	115	26,726	
Slip tanks	7	15	105.00	24.00	0.00	1.00	1.00	105.00	2,520	584,640	
			Power=	364.00				0.86	312.20	5,835	1,353,766
			Lighting=	3.75	12.00	12.00	0.50	1.00	1.88	23	5,220
			Sub-Total SLIP PREPARATION	367.75				314	5,858	1,358,986	
GLAZE PREPARATION											
Mills	2	25	50.00	16.00	8.00	1.00	0.80	40.00	640	148,480	
Belts	2	4	8.00	16.00	8.00	0.80	0.75	4.80	77	17,818	
Blungers	1	30	30.00	16.00	8.00	1.00	0.80	24.00	384	89,088	
Sievers	3	2	4.50	16.00	8.00	0.80	1.00	3.60	58	13,363	
Pumps	2	3	5.00	16.00	8.00	0.67	0.75	2.50	40	9,280	
Glaze tanks	18	3	54.00	16.00	8.00	0.67	0.75	27.00	432	100,224	
			Power=	151.50				0.67	101.90	1,630	378,253
			Lighting=	3.28	12.00	12.00	0.50	1.00	1.64	20	4,568
			Sub-Total GLAZE PREPARATION	154.78				104	1,650	382,820	
MODELLING & MOLDS											
Dryers	3	35	105.00	20.00	4.00	1.00	0.60	63.00	1,260	409,248	
Crane	10	2	17.50	16.00	8.00	0.67	1.00	11.67	187	43,307	
Plaster preparation	1	5	5.00	16.00	8.00	0.67	1.00	3.33	53	12,373	
Pumps	3	3	7.50	16.00	8.00	0.67	0.80	4.00	64	14,848	
			Power=	135.00	16.00			0.61	82.00	1,564	479,776
			Lighting=	1.56	12.00	12.00	0.50	1.00	0.78	9	2,175
			Sub-Total MODELLING & MOLDS	136.56				83	1,573	481,951	
CASTING											
Casting benches	30	30	900.00	16.00	8.00	0.75	0.70	472.50	7,560	1,753,920	
Ponds	2	5	10.00	16.00	8.00	0.67	1.00	6.67	107	24,747	
Slip tanks	2	25	50.00	16.00	8.00	1.00	0.80	40.00	640	148,480	
Pumps	4	3	10.00	16.00	8.00	0.67	0.75	5.00	80	18,560	
			Power=	970.00				0.54	524.17	8,387	1,945,707
			Lighting=	40.63	12.00	12.00	0.50	1.00	20.31	244	56,550
			Sub-Total CASTING	1010.63				544	8,630	2,002,257	
HEATING & VENTILATION											
HVU	2	50	100.00	24.00	0.00	0.50	0.75	37.50	900	208,800	
Exhausting fans	6	6	33.00	24.00	0.00	0.50	0.75	12.38	297	68,904	
			Power=	133.00				0.38	49.88	1,197	277,704
			Lighting=	1.56	12.00	12.00	0.50	1.00	0.78	9	2,175
			Sub-Total HEATING & VENTILATION	134.56				51	1,206	279,879	
DRYING											
Dryers	2	55	110.00	24.00	0.00	1.00	0.75	82.50	1,980	459,360	
			Power=	110.00				0.75	82.50	1,980	459,360
			Lighting=	7.81	12.00	12.00	0.75	1.00	5.86	70	16,313
			Sub-Total DRYING	117.81				88	2,050	475,673	
GLAZING											
Vagonetausels	1	45	45.00	16.00	8.00	1.00	0.75	33.75	540	125,280	
Booths & others	4	5	20.00	16.00	8.00	1.00	0.75	15.00	240	55,680	
			Power=	65.00				0.75	48.75	780	180,960
			Lighting=	11.72	12.00	12.00	0.75	1.00	8.79	105	24,469
			Sub-Total GLAZING	76.72				58	885	205,429	
KILNS											
Tunnel kiln	1	125	125.00	24.00	0.00	1.00	0.75	93.75	2,250	730,800	
Shuttle kiln	1	100	100.00	24.00	0.00	0.80	0.75	60.00	1,440	467,712	
Re-firing booths	2	5	10.00	16.00	8.00	0.75	0.75	5.63	90	29,232	
			Power=	235.00				0.68	159.38	3,780	1,227,744
			Lighting=	10.16	12.00	12.00	0.75	1.00	7.62	91	29,689
			Sub-Total KILNS	245.16				167	3,871	1,257,433	
SORTING											
Test lines	4	5	20.00	16.00	8.00	1.00	0.75	15.00	240	77,952	
Wrapping kiln	1	10	10.00	16.00	8.00	0.75	0.75	5.63	90	29,232	
Packing lifting Tablas	3	5	14.25	16.00	8.00	0.75	0.75	8.02	128	41,656	
			Power=	44.25				0.65	28.64	458	148,840
			Lighting=	5.86	12.00	12.00	0.75	1.00	4.39	53	17,128
			Sub-Total SORTING	50.11				33	511	165,968	
OFFICES											
Desk station	75	1	75.00	8.00	16.00	0.90	0.75	50.63	405	93,960	
Central server	1	10	10.00	8.00	16.00	0.90	0.75	6.75	54	12,528	
AC units	10	5	45.00	8.00	16.00	0.90	0.75	30.38	243	56,376	
Others	1	20	20.00	8.00	16.00	0.90	0.75	13.50	108	25,056	
			Power=	150.00				0.68	101.25	810	187,920
			Lighting=	4.69	12.00	12.00	0.75	1.00	3.52	42	9,788
			Sub-Total OFFICES	154.69				105	852	197,708	
WARE-HOUSE											
Ware-house office	1	3	2.50	8.00	16.00	0.90	0.75	1.69	14	3,132	
Battery chargers	5	1	5.00	24.00	0.00	1.00	0.75	3.75	90	20,880	
			Power=	7.50				0.73	5.44	104	24,012
			Lighting=	15.63	12.00	12.00	0.75	1.00	11.72	141	32,625
			Sub-Total WARE-HOUSE	23.13				17	244	56,637	
FACILITIES											
Compressors	2	150	300.00	24.00	0.00	0.80	0.75	180.00	4,320	1,002,240	
Boilers	1	5	5.00	12.00	12.00	0.50	0.50	1.25	15	3,480	
Maintenance	1	45	45.00	16.00	8.00	0.75	0.75	25.31	405	93,960	
Reverse osmosis	1	25	25.00	24.00	0.00	1.00	0.75	18.75	450	104,400	
Losses hopper	1	50	50.00	12.00	12.00	0.50	0.50	12.50	150	34,800	
Pumps room	1	225	225.00	24.00	0.00	0.03	0.75	5.63	135	31,320	
Waste water treatment plant	1	75	75.00	24.00	0.00	0.75	0.75	42.19	1,013	234,900	
Guard house	1	5	5.00	24.00	0.00	0.75	0.75	2.81	68	15,660	
Waste & leftovers area	1	5	5.00	16.00	8.00	0.75	0.75	2.81	45	10,440	
Canteen	1	5	4.50	16.00	8.00	0.75	0.75	2.53	41	9,396	

Kitchen	1	10	10.00	16.00	8.00	0.75	0.75	5.63	90	20,880
External lighting	1	10	10.00	24.00	0.00	0.75	0.75	5.63	135	31,320
Sockets	1	32	32.00	24.00	0.00	0.25	0.50	4.00	96	22,272
Watering	1	0								0
Power=			791.50				0.39	309.03	6,962	1,615,068
Lighting=			5.00	12.00	12.00	0.75	1.00	3.75	45	10,440
Sub-Total FACILITIES			796.50					313	7,007	1,625,508
Total power=			3,457					1,569	37,647	9,244,229
Total lighting=			119					37	897	221,578
TOTAL ELECTRICAL ENERGY=			3,576				0.45	1,606	38,544	9,465,808

Tabla 21. Consumo eléctrico en una fábrica de moldes de resina. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).

ELECTRICAL ENERGY CONSUMPTION	N°	P _{unit} (kW)	P _{nom} (kW)	RUN (hours)	STOP (hours)	PRESSURE CASTING			P _{average} (kW)	W _{day} (kWh/day)	W _{year} (kWh/year)
						use Coef. f _u	sim. Coef. f _s				
ELECTRICAL CONSUMPTION											
RAW MATERIALS											
Mills	2	110	220.00	16.00	8.00	1.00	1.00	220.00	3,520	816,640	
Belts	7	5	35.00	16.00	8.00	0.67	0.75	17.50	280	64,960	
Pumps	3	10	30.00	16.00	8.00	0.67	0.75	15.00	240	55,680	
Hoppers	6	3	15.00	16.00	8.00	0.67	0.75	7.50	120	27,840	
Power=			300.00					0.87	260	4,160	
Lighting=			7.50	12.00	12.00	0.50	1.00	4	45	10,440	
Sub-Total RAW MATERIALS			307.50					264	4,205	975,560	
SLIP PREPARATION											
Blungers	2	125	250.00	16.00	8.00	1.00	0.80	200.00	3,200	742,400	
Sievers	6	2	9.00	16.00	8.00	0.80	1.00	7.20	115	26,726	
Slip tanks	7	15	105.00	24.00	0.00	1.00	1.00	105.00	2,520	584,640	
Power=			364.00					0.86	312.20	5,835	
Lighting=			3.75	12.00	12.00	0.50	1.00	1.88	23	5,220	
Sub-Total SLIP PREPARATION			367.75					314	5,858	1,358,986	
GLAZE PREPARATION											
Mills	2	25	50.00	16.00	8.00	1.00	0.80	40.00	640	148,480	
Belts	2	4	8.00	16.00	8.00	0.80	0.75	4.80	77	17,818	
Blungers	1	30	30.00	16.00	8.00	1.00	0.80	24.00	384	89,088	
Sievers	3	2	4.50	16.00	8.00	0.80	1.00	3.60	58	13,363	
Pumps	2	3	5.00	16.00	8.00	0.67	0.75	2.50	40	9,280	
Glaze tanks	18	3	54.00	16.00	8.00	0.67	0.75	27.00	432	100,224	
Power=			151.50					0.67	101.90	1,630	
Lighting=			3.28	12.00	12.00	0.50	1.00	1.64	20	4,568	
Sub-Total GLAZE PREPARATION			154.78					104	1,650	382,820	
MODELLING & MOLDS											
Mixer	1	5	5.00	16.00	8.00	1.00	0.80	4.00	64	14,848	
Crane	1	3	2.50	16.00	8.00	0.80	0.75	1.50	24	5,568	
Air conditioning	1	5	5.00	16.00	8.00	1.00	0.80	4.00	64	14,848	
Pumps	2	2	3.00	16.00	8.00	0.80	1.00	2.40	38	8,909	
Power=			15.50					0.77	11.90	190	
Lighting=			7.81	12.00	12.00	0.50	1.00	3.91	47	10,875	
Sub-Total MODELLING & MOLDS			23.31					16	237	55,048	
CASTING											
Pressure machines	7	18	126.00	16.00	8.00	0.75	0.70	66.15	1,058	245,549	
Ponds	3	5	15.00	16.00	8.00	0.67	1.00	10.00	160	37,120	
Slip tanks	4	25	100.00	16.00	8.00	1.00	0.80	80.00	1,280	296,960	
Pumps	4	3	10.00	16.00	8.00	0.67	0.75	5.00	80	18,560	
Power=			251.00					0.64	161.15	2,578	
Lighting=			13.54	12.00	12.00	0.50	1.00	6.77	81	18,850	
Sub-Total CASTING			264.54					168	2,660	617,039	
HEATING & VENTILATION											
HVU	2	50	100.00	24.00	0.00	0.50	0.75	37.50	900	208,800	
Exhausting fans	6	6	33.00	24.00	0.00	0.50	0.75	12.38	297	68,904	
Power=			133.00					0.38	49.88	1,197	
Lighting=			1.56	12.00	12.00	0.50	1.00	0.78	9	2,175	
Sub-Total HEATING & VENTILATION			134.56					51	1,206	279,879	
DRYING											
Dryers	2	55	110.00	24.00	0.00	1.00	0.75	82.50	1,980	459,360	
Power=			110.00					0.75	82.50	1,980	
Lighting=			7.81	12.00	12.00	0.75	1.00	5.86	70	16,313	
Sub-Total DRYING			117.81					88	2,050	475,673	
GLAZING											
Vagonetausels	1	45	45.00	16.00	8.00	1.00	0.75	33.75	540	125,280	
Booths & others	4	5	20.00	16.00	8.00	1.00	0.75	15.00	240	55,680	
Power=			65.00					0.75	48.75	780	
Lighting=			11.72	12.00	12.00	0.75	1.00	8.79	105	24,469	
Sub-Total GLAZING			76.72					58	885	205,429	
KILNS											
Tunnel kiln	1	125	125.00	24.00	0.00	1.00	0.75	93.75	2,250	730,800	
Shuttle kiln	1	100	100.00	24.00	0.00	0.80	0.75	60.00	1,440	467,712	
Re-firing booths	1	5	5.00	16.00	8.00	0.75	0.75	2.81	45	14,616	
Power=			230.00					0.68	156.56	3,735	
Lighting=			10.16	12.00	12.00	0.75	1.00	7.62	91	29,689	
Sub-Total KILNS			240.16					164	3,826	1,242,817	
SORTING											



 	Tesis Doctoral		
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO₂			
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez		10/03/2021	Página 101 de 231

Test lines	2	5	10.00	16.00	8.00	1.00	0.75	7.50	120	38,976	
Wrapping kiln	1	10	10.00	16.00	8.00	0.75	0.75	5.63	90	29,232	
Packing lifting Tablas	3	5	14.25	16.00	8.00	0.75	0.75	8.02	128	41,656	
			34.25					0.62	21.14	338	109,864
Power=			5.86	12.00	12.00	0.75	1.00	4.39	53	17,128	
Lighting=											
Sub-Total SORTING			40.11					26	391	126,992	
OFFICES											
Desk station	75	1	75.00	8.00	16.00	0.90	0.75	50.63	405	93,960	
Central server	1	10	10.00	8.00	16.00	0.90	0.75	6.75	54	12,528	
AC units	10	5	45.00	8.00	16.00	0.90	0.75	30.38	243	56,376	
Others	1	20	20.00	8.00	16.00	0.90	0.75	13.50	108	25,056	
			150.00					0.68	101.25	810	187,920
Power=			4.69	12.00	12.00	0.75	1.00	3.52	42	9,788	
Lighting=											
Sub-Total OFFICES			154.69					105	852	197,708	
WARE-HOUSE											
Ware-house office	1	3	2.50	8.00	16.00	0.90	0.75	1.69	14	3,132	
Battery chargers	5	1	5.00	24.00	0.00	1.00	0.75	3.75	90	20,880	
			7.50					0.73	5.44	104	24,012
Power=			15.63	12.00	12.00	0.75	1.00	11.72	141	32,625	
Lighting=											
Sub-Total WARE-HOUSE			23.13					17	244	56,637	
FACILITIES											
Compressors	2	150	300.00	24.00	0.00	0.80	0.75	180.00	4,320	1,002,240	
Boilers	1	5	5.00	12.00	12.00	0.50	0.50	1.25	15	3,480	
Maintenance	1	45	45.00	16.00	8.00	0.75	0.75	25.31	405	93,960	
Reverse osmosis	1	25	25.00	24.00	0.00	1.00	0.75	18.75	450	104,400	
Losses hopper	1	50	50.00	12.00	12.00	0.50	0.50	12.50	150	34,800	
Pumps room	1	225	225.00	24.00	0.00	0.03	0.75	5.63	135	31,320	
Waste water treatment plant	1	75	75.00	24.00	0.00	0.75	0.75	42.19	1,013	234,900	
Guard house	1	5	5.00	24.00	0.00	0.75	0.75	2.81	68	15,660	
Waste & leftovers area	1	5	5.00	16.00	8.00	0.75	0.75	2.81	45	10,440	
Canteen	1	5	4.50	16.00	8.00	0.75	0.75	2.53	41	9,396	
Kitchen	1	10	10.00	16.00	8.00	0.75	0.75	5.63	90	20,880	
External lighting	1	10	10.00	24.00	0.00	0.75	0.75	5.63	135	31,320	
Sockets	1	32	32.00	24.00	0.00	0.25	0.50	4.00	96	22,272	
Watering	1	0								0	
			791.50					0.39	309.03	6,962	1,615,068
Power=			5.00	12.00	12.00	0.75	1.00	3.75	45	10,440	
Lighting=											
Sub-Total FACILITIES			796.50					313	7,007	1,625,508	
SUB-Total power=			2,603			0.48	1,262	30,300	7,407,516		
SUB-Total lighting=			98			0.33	32	772	192,578		
TOTAL ELECTRICAL ENERGY=			2,702			0.48	1,295	31,072	7,600,095		

De las bases de datos eléctricas se obtienen los valores de consumo para cada tipo de tecnología, bien de moldes de yeso o resina. La tabla 22 muestra el consumo eléctrico general comparado para los diferentes subprocesos en toda la fábrica. Los valores se han calculado como una suma de las potencias eléctricas de las máquinas para cada proceso. El modelo eléctrico proporciona el consumo eléctrico promedio durante un año en ambos tipos de fábricas. La tecnología de colado a presión es más eficiente que el yeso en casi un 20%. La principal diferencia entre las tecnologías está en los procesos de modelado y colado.

Tabla 22. Consumo eléctrico comparado para ambas tecnologías. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021)

ELECTRICAL ENERGY CONSUMPTION SECTION	PLASTER CASTING			PRESSURE CASTING		
	P _{nom} (kW)	P _{average} (kW)	W _{year} (GJ/year)	P _{nom} (kW)	P _{average} (kW)	W _{year} (GJ/year)
Raw materials	307.50	264	3,512	307.50	264	3,512
Slip preparation	367.75	314	4,892	367.75	314	4,892
Glaze preparation	154.78	104	1,378	154.78	104	1,378
Modelling & molds	136.56	83	1,735	23.31	16	198
Casting	1010.63	544	7,208	264.54	168	2,221
Heating & ventilation	134.56	51	1,008	134.56	51	1,008
Drying	117.81	88	1,712	117.81	88	1,712
Glazing	76.72	58	740	76.72	58	740
Kilns	245.16	167	4,527	240.16	164	4,474
Sorting	50.11	33	597	40.11	26	457
Offices	154.69	105	712	154.69	105	712
Ware-house	23.13	17	204	23.13	17	204
Facilities	796.50	313	5,852	796.50	313	5,852
TOTAL ELECTRICAL ENERGY=	3,576	1,606	34,077	2,702	1,295	27,360

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 102 de 231

4.1.2 Modelo térmico

El análisis térmico se realiza examinando cada carga térmica que se calcula individualmente según los requisitos del proceso. Excepto las calderas, cuyo comportamiento es convencional y su potencia no es relevante, los hornos, secaderos y unidades de calefacción se calculan a partir de las necesidades térmicas modelando matemáticamente su comportamiento para concluir su balance térmico (Saidur et al., 2011). Análogamente a la creación de las bases de datos eléctricas, se elabora otra base de datos con las potencias térmicas y su ciclo de trabajo correspondiente cuyos valores se presentan en las tabla 23 y tabla 24.

Tabla 23. Consumo térmico en una fábrica de moldes de yeso. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).

THERMAL ENERGY CONSUMPTION			PLASTER CASTING								
GAS CONSUMPTION			Nº	Puni kW	Pins kW	RUNNING h	STOP h	use coeff. f _u	P _{average} kW	W _{day} kWh/día	W _{year} kWh/año
Molds dryers	3	150	450	24	0	0.77	346	8,310	2,698,932		
Sub-Total molds dryers=			450	24	0	1	346	8,310	2,698,932		
Heating & ventilation units	2	800	1,600	24	0	0.68	1,094	26,257	6,091,683		
Sub-Total heating & ventilation=			1,600	24	0	1	1,094	26,257	6,091,683		
Pieces dryers	2	400	800	24	0	0.53	425	10,195	2,365,153		
Sub-Total pieces dryers=			800	24	0	1	425	10,195	2,365,153		
Tunnel kiln	1	2,150	2,150	24	0	0.90	1,935	46,440	15,083,712		
Shuttle kiln	1	2,500	2,500	20	4	0.60	1,511	30,221	9,815,856		
Sub-Total kilns=			4,650	44	4	2	3,446	76,661	24,899,568		
Wrapping kiln	1	400	400	16	8	0.20	80	1,280	415,744		
Sub-Total sorting=			400	16	8	0	80	1,280	415,744		
Shower boilers	1	110	110	16	8	0.95	105	1,672	387,904		
Sub-Total facilities=			110	16	8	1	105	1,672	387,904		
TOTAL=			8,010			0.69	5,496	124,375	36,858,983		

Tabla 24. Consumo térmico en una fábrica de moldes de resina. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).

THERMAL ENERGY CONSUMPTION			PRESSURE CASTING								
GAS CONSUMPTION			Nº	Puni kW	Pins kW	RUNNING h	STOP h	use coeff. f _u	P _{average} kW	W _{day} kWh/día	W _{year} kWh/año
Boilers for pressure machines	7	110	770	16	8	0.60	465	7,443	2,417,366		
Sub-Total Casting=			770	16	8	1	465	7,443	2,417,366		
Heating & ventilation units	2	200	400	24	0	0.68	271	6,499	1,507,865		
Sub-Total heating & ventilation=			400	24	0	1	271	6,499	1,507,865		
Pieces dryers	2	400	800	24	0	0.53	425	10,195	2,365,153		
Sub-Total pieces dryers=			800	24	0	1	425	10,195	2,365,153		
Tunnel kiln	1	2,150	2,150	24	0	0.90	1,935	46,440	15,083,712		
Shuttle kiln	1	2,500	2,500	20	4	0.60	1,511	30,221	9,815,856		
Sub-Total kilns=			4,650	44	4	2	3,446	76,661	24,899,568		
Wrapping kiln	1	400	400	16	8	0.20	80	1,280	415,744		
Sub-Total sorting=			400	16	8	0	80	1,280	415,744		
Shower boilers	1	110	110	16	8	0.95	105	1,672	387,904		
Sub-Total facilities=			110	16	8	1	105	1,672	387,904		
TOTAL=			7,130			0.67	4,791	103,750	31,993,600		

Las necesidades de gas natural confrontadas para ambas tecnologías se muestran en la tabla 25. Los modelos térmicos proporcionan el consumo térmico promedio durante un año en ambos tipos de fábricas. La tecnología de colado a presión resulta un 13% más eficiente que la tecnología de yeso. La principal diferencia está en los procesos de elaboración de moldes, colado y acondicionamiento de aire en la sala de colado.



 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 103 de 231

Tabla 25. Consumo térmico comparado para ambas tecnologías. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).

THERMAL ENERGY CONSUMPTION SECTION	PLASTER CASTING			PRESSURE CASTING		
	P _{nom} (kW)	P _{average} (kW)	W _{year} (GJ/year)	P _{nom} (kW)	P _{average} (kW)	W _{year} (GJ/year)
Raw materials						
Slip preparation						
Glaze preparation						
Modelling & molds	450	346	9,716			
Casting				770	465	8,703
Heating & ventilation	1,600	1,094	21,930	400	271	5,428
Drying	800	425	8,515	800	425	8,515
Glazing						
Kilns	4,650	3,446	89,638	4,650	3,446	89,638
Sorting	400	80	1,497	400	80	1,497
Offices						
Ware-house						
Facilities	110	105	1,396	110	105	1,396
TOTAL THERMAL ENERGY=	8,010	5,496	132,692	7,130	4,791	115,177

4.1.3 Modelo de horno túnel

De acuerdo con las mejores tecnologías disponibles para la fabricación de artículos sanitarios (“Reference Document on Best Available Techniques in the Ceramic Manufacturing Industry,” 2007) en su punto 2.3.7.5, en relación a la cocción, la forma más común de llevar a cabo este proceso es a través de hornos de túnel que, esencialmente, son túneles refractarios con raíles longitudinales por los que circulan las vagonetas que transportan las piezas a lo largo del proceso. La figura 39 muestra un túnel estándar para artículos sanitarios donde se hace referencia expresa a los gases de combustión, aires residuales y chimeneas de salida. El horno se construye agregando módulos de 3 metros de largo. Los diferentes módulos para cada sección del horno se pueden ver en la figura 39.

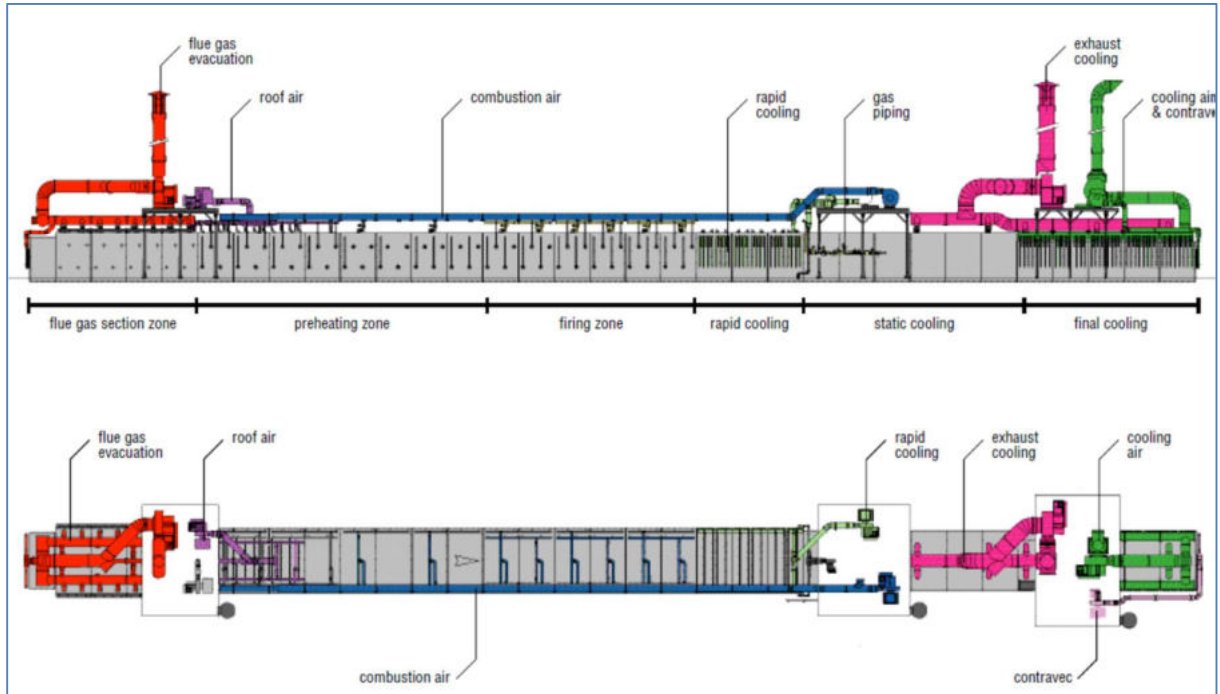



Figura 39. Configuración de un horno túnel (Fuente: SACMI Catalogue)

La especificación de un túnel estándar del líder mundial de fabricación de maquinaria para la industria sanitaria (SACMI) se muestra en la figura 40.

TECHNICAL DATA	
Kiln possible dimension	46 - 132 m
Useful width	2,400 - 3,800 mm
Possible car loading height	800 - 1,200 mm
Car useful volume	2.52 - 4.26 m ³
Car in the kiln	32 - 94
Average load on car (depending on products mix and loading conditions)	18 - 30 pieces
Maximun temperature	1,300 °C
Firing temperature	1,269 °C
Approximate firing cycle	10 - 20 hours
Approximate specific net consumption (depending on technological and firing cycle conditions)	4,180 - 5,852 kJ/kg

Figura 40. Rango de especificaciones técnicas de un horno túnel. Fuente: (SACMI Catalogue)

 Escuela Internacional de Doctorado EIDUNED	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 105 de 231

El horno escogido en esta tesis, de acuerdo con la producción establecida para la fábrica tipo ($5 \cdot 10^5$ piezas por año) es de 84 m de longitud, con 28 módulos. Las características de este se presentan en la tabla 26.

Tabla 26. Principales características de un horno túnel de 84 m. Fuente: (SACMI – Technical specifications).

KILN SPECIFICATIONS		
Kiln length	84	m
Kiln width	3	m
Firing temperature	1214	°C
Number of cart inside the kiln	62.2	
Duty cycle	16	h
Excess of air	10%	
Roof air	0.3120	kg/s
Rapid cooling air	0.7926	kg/s
Slow cooling air	1.6760	kg/s
Contracec air	1.4339	kg/s
Annual production	500,000	Pieces/year
Efficiency	86.54%	
Specific consumption	5,225	kJ/kg
Average mass of piece	20	kg/piece
Days/year kiln operation	325	days/year
Kiln thermal power	2,150	kW

Dada la uniformidad de funcionamiento del horno túnel es muy adecuado considerar su calor residual debido, además a la gran cantidad de energía térmica residual en sus chimeneas. En resumen, el horno funciona quemando gas natural a lo largo de la primera mitad de un túnel aislado para llevar las piezas a la temperatura de vitrificación del esmalte que está alrededor de 1.250 °C. El flujo de aire y gases dentro del túnel es contra corriente, tanto en la primera mitad (zona de calentamiento) como en la segunda (zona de enfriamiento). A través de las secciones del horno se identifican diferentes corrientes de aire con diferentes propósitos como se muestra en la figura 41.

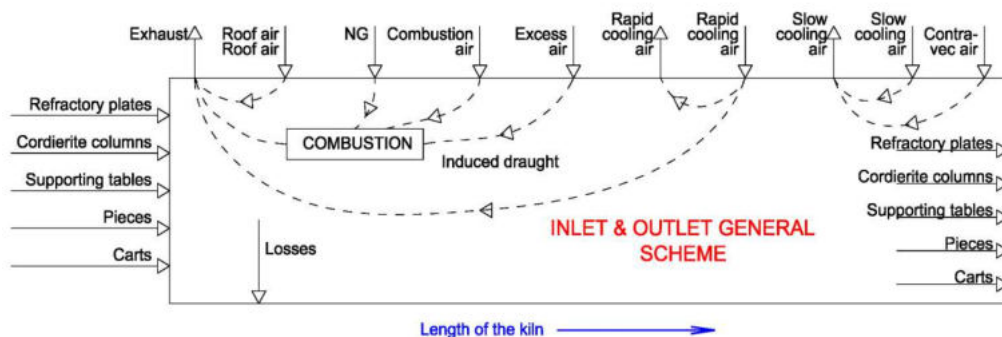




Figura 41. Esquema del modelo de horno túnel. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2018).

Actualmente la mayoría de los hornos túnel existentes funcionan con gas natural, con una distribución de temperatura a lo largo del horno similar a la que se muestra en la figura 42:

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 106 de 231

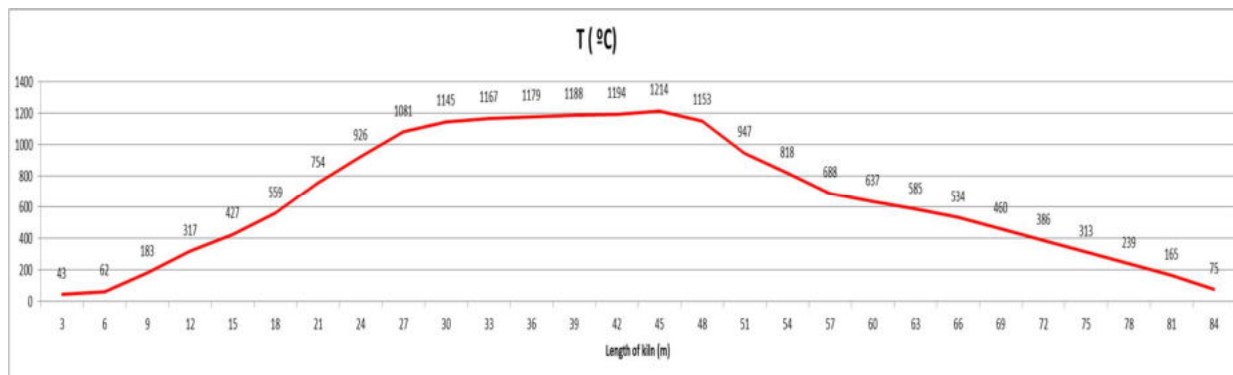




Figura 42. Distribución de temperatura en un horno túnel. Fuente: (SACMI – Technical specifications).

El principio de funcionamiento es calentar vagonetas, soportes, piezas y los diferentes flujos de aire auxiliar desde la entrada mediante combustión, normalmente de gas, hasta aproximadamente la mitad del horno donde se alcanza la temperatura de aproximadamente 1.200-1.250 °C. A partir de este punto, la carga y vagoneta comienzan a enfriarse mediante, un enfriamiento rápido primero, y posteriormente un enfriamiento lento hasta la salida del horno. La energía térmica que transportan la carga y vagoneta al pasar a la sección de enfriamiento se transfiere a los aires de enfriamiento y se envía a través de las chimeneas 2 (enfriamiento rápido) y 3 (enfriamiento lento) donde pueden ser recuperados con gran cantidad de calor residual para su reutilización. El aire de enfriamiento de igual forma que el aire de techo sirven también para mejorar el intercambio de calor a lo largo del horno produciendo una turbulencia adecuada que incrementa el coeficiente de transferencia térmica de convección (Kaya et al., 2008). En (Mezquita et al., 2014), Mezquita estudia cómo reducir el consumo de gas en el horno precalentando el aire de combustión con el calor recuperado del aire de enfriamiento.

Las vagonetas, de estructura metálica se cubren con plataformas refractarias que protegen el acero de las altas temperaturas en el interior del túnel. Por otro lado, hay una estructura de columnas y vigas también refractarias destinada a soportar las placas que han de sujetar las piezas a lo largo del proceso. La figura 43 muestra una sección transversal de este túnel con una configuración de carga estándar de inodoros de cerámica sanitaria. Las vagonetas se empujan a lo largo del horno con una velocidad uniforme de acuerdo con el ciclo establecido, mientras que los gases calientes o de enfriamiento circulan en sentido contrario hacia la entrada del túnel. Las altas temperaturas dentro del horno son mantenidas por materiales refractarios de alto rendimiento de espesor apropiado en cada sección.

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 107 de 231

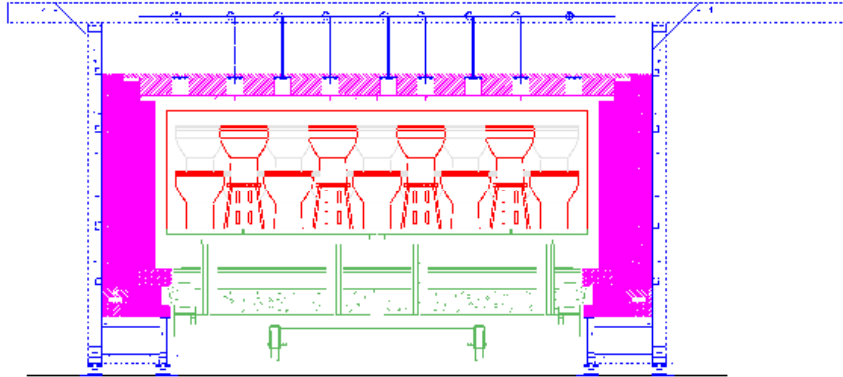




Figura 43. Sección transversal de un horno túnel. Fuente: (SACMI Catalogue)

Existen trabajos de investigación relativos a la simulación del horno de túnel con respecto al horno completo (Nicolau and Dadam, 2009), o la distribución de la temperatura (Zhang et al., 2015), aunque la mayoría de ellos se dedican a la producción de cerámica plana. En esta tesis, el modelo se ha desarrollado analizando los balances de masa y energía para cada módulo de forma independiente, combinándolos posteriormente para obtener el equilibrio global para todo el horno. Para cada módulo, se calcula:

- el equilibrio de la masa de aire y los flujos térmicos de entrada y salida de aire y gas.
- el equilibrio de la energía de la carga de entrada y salida.
- las pérdidas a través de paredes, techo y suelo del túnel por combinación de conducción térmica, convección y radiación.

La figura 44 muestra el esquema de balances en un módulo genérico.

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 108 de 231

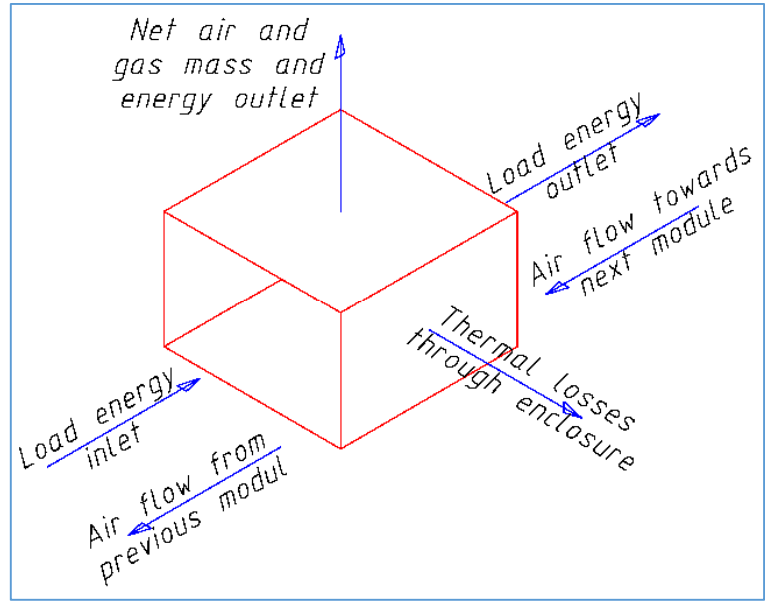


Figura 44. Esquema de balance de masa y energía en un módulo genérico. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019a).



El calor neto disponible para ser recuperado se obtiene asociando los balances netos de masa y energía entre cada módulo conectado entre sí y el conducto de salida hacia la chimenea correspondiente como se muestra en la figura 44. La temperatura en cada módulo y las masas de los flujos de aire, son las variables para calcular la potencia térmica.

$$\dot{m}_{g_{in}} = \dot{m}_{g_{out}} + \dot{m}_{g_{exh}} \dots\dots\dots (3)$$

$$\dot{m}_{g_{in}} \cdot h_{g_{in}} = \dot{m}_{g_{out}} \cdot h_{g_{out}} + \dot{m}_{g_{exh}} \cdot h_{g_{exh}} + \dot{H}_{losses} \dots\dots\dots (4)$$

El proceso iterativo de cálculo es como sigue:

- Dada la curva de temperatura como función de una variable, la distancia al origen (entrada) se calculan las pérdidas térmicas por las paredes, techo y suelo del horno, mediante las ecuaciones de transferencia térmica por radiación convección y conducción. El proceso resulta iterativo puesto que las variables de convección y en algunos casos las de conducción dependen de las condiciones del flujo interno y el externo, especialmente en lo que se refiere a temperaturas y velocidades. A partir de la iteración se resuelven los valores de pérdidas en conjunción con las temperaturas de contorno, específicamente las de pared interna y externa. Éstas son particularmente necesarias en el caso del flujo térmico a través de la vagoneta. El gradiente de temperaturas en el flujo de calor hacia el suelo del horno está fuertemente vinculado al valor de las pérdidas.

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 109 de 231

- Conocidas las pérdidas y temperaturas de contorno en cada una de las capas aislantes de la vagoneta, se puede calcular el consumo térmico para calentar la vagoneta con toda la carga hasta la temperatura máxima, aproximadamente a la mitad del túnel. A continuación, se obtiene, el calor transferido de las masas sólidas a los aires de enfriamiento.
- Finalmente, añadiendo a las potencias térmicas ya calculadas, la correspondientes a calentar los aires de techo y combustión desde la temperatura ambiente hasta la indicada en cada zona del horno, se obtiene la potencia de combustible total requerida.

4.1.3.1 Pérdidas

El cálculo de las pérdidas se basa en la resolución de un sistema de ecuaciones convencional de transferencia térmica por combinación de radiación, convección y conducción como se muestra en la figura 45.

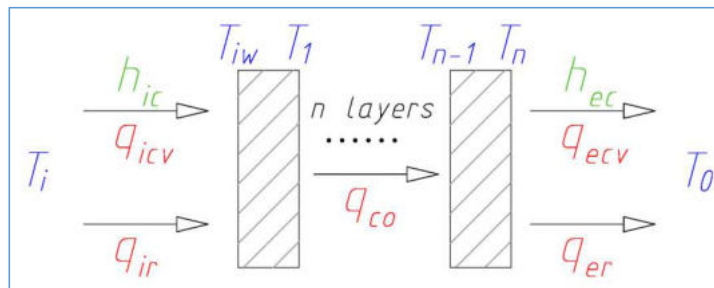


Figura 45. Esquema de transferencia térmica a través de los cerramientos del horno. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019a).

El número y las características de las capas de aislamiento son diferentes de acuerdo a la temperatura en cada sección del horno.

Como el gradiente de temperatura varía a lo largo del horno, también lo hacen las propiedades del aislamiento térmico. De acuerdo con la figura 45, se calculan las pérdidas a través de cerramientos con las ecuaciones (5) a (24).

$$q_{icv} = h_i \cdot S \cdot (T_i - T_1) \dots\dots\dots (5)$$

$$q_{ir} = \sigma \cdot \epsilon \cdot S \cdot (T_i^4 - T_1^4) \dots\dots\dots (6)$$

$$q_c = q_{icv} + q_{ir} \dots\dots\dots (7)$$

$$q_c = k_1 \cdot S \cdot (T_1 - T_2) = \dots = k_n \cdot S \cdot (T_{n-1} - T_n) \dots\dots\dots (8)$$

$$q_c = q_{ecv} + q_{er} \dots\dots\dots (9)$$

$$q_{ecv} = h_e \cdot S \cdot (T_n - T_0) \dots \dots \dots (10)$$

$$q_{er} = \sigma \cdot \epsilon \cdot S \cdot (T_e^4 - T_0^4) \dots \dots \dots (11)$$

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L} \dots \dots \dots (12)$$

Como el número de Nusselt (Nu) y la conductividad del gas dependen de la temperatura del fluido, el sistema debe resolverse mediante un proceso iterativo. Además, la fórmula para calcular Nu depende de las condiciones geométricas y termodinámicas. El interior del horno se modela como un tubo no circular donde el diámetro hidráulico correspondiente para la modelación se calcula mediante:

$$D_h = 4 \cdot \frac{A_{cs}}{P_{wet}} \dots \dots \dots (13)$$

A_{cs} y P_{wet} son mostrados en la figura 46:

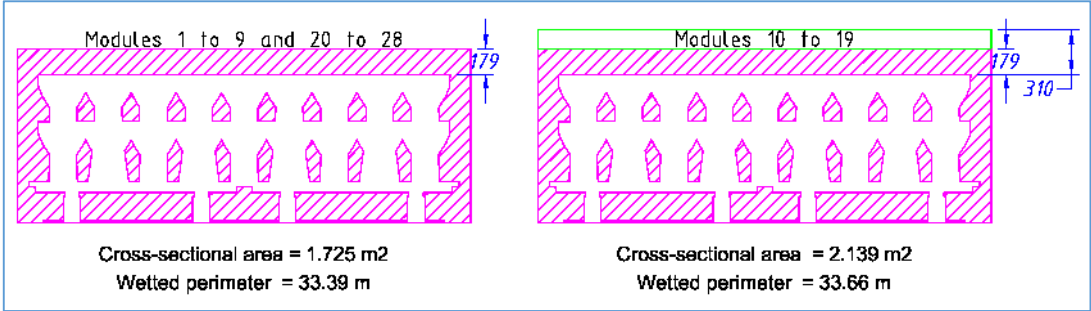


Figura 46. Modelo de flujo interior en conducto no circular. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019a)

Las características termodinámicas del flujo son calculadas para cada temperatura como sigue:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D_h}{\mu} \dots \dots \dots (14)$$



$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{k_{air}} \dots \dots \dots (15)$$

$$Gr = \frac{g \cdot \rho^2 \cdot L^3 \cdot \beta \cdot \Delta t}{\mu^2} \dots \dots \dots (16)$$

La viscosidad dinámica se obtiene con la fórmula de Shutherland:

$$\mu = \mu_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right) \cdot \frac{T_0 + 110,4}{T + 110,4} \dots \dots \dots (17)$$

La densidad del aire se aproxima de acuerdo con:

 	Tesis Doctoral		
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂			
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez		10/03/2021	Página 111 de 231

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T} \dots\dots\dots (18)$$

El calor específico se obtiene de:

$$C_{p\text{air}} = 0,9956 + 9,299 \cdot 10^{-5}T \dots\dots\dots (19)$$

El coeficiente de expansión térmica es calculado según:

$$\beta = \frac{1}{T} \dots\dots\dots (20)$$

En el interior del túnel, el Nu es obtenido con la fórmula de Hausen:

$$Nu = 3.66 + \frac{0,0668 \cdot \left(\frac{D_h}{L_{mod}} \cdot Re \cdot Pr\right)}{1 + 0,04 \cdot \left(\frac{D_h}{L_{mod}} \cdot Re \cdot Pr\right)^{\frac{1}{4}}} \dots\dots\dots (21)$$

En el exterior de las paredes se tiene convección natural de placa vertical cuyo Nu es calculado de acuerdo a:

$$Nu = 0,555 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}} \dots\dots\dots (22)$$

Sobre el techo lo que se tiene es una convección natural de placa horizontal cuyo Nu responde a:

$$Nu = 0,58 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{5}} \dots\dots\dots (23)$$



En la cámara que resulta debajo de las vagonetas y debido a los gradientes de temperatura, lo que resulta es una convección entre placas paralelas cuyo Nu es:

$$Nu = 0,068 \cdot Gr^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots (24)$$

En la figura 47 se muestra el resultado de las iteraciones realizadas para cada módulo con las pérdidas correspondientes.

ZONE	PREFIRING								FIRING								RAPID COOLING								SLOW COOLING								TOTAL
MODULE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28					
X [m]	2	4.5	7.5	11	14	17	20	23	25.5	28.5	31.5	34.5	37.5	40.5	43.5	46.5	50	53	56	59	62	65	68	71	74	77	80	83					
T [°C]	43	62	183	317	427	559	754	926	1,081	1,145	1,167	1,179	1,188	1,194	1,214	1,153	947	818	688	637	585	534	460	386	313	239	165	133					
Q _{walls}	0	0	0.2	0.5	1.1	2	4.2	7.1	10.4	10.9	11.4	11.7	12	12.1	12.6	11.1	6.8	4.7	3	3.6	2.9	2.3	1.6	1.1	0.7	0.4	0.2	0.1	135				
Q _{roof}	0	0.1	0.4	1	1.8	3.1	5.7	8.5	11.4	10.6	10.9	11.1	11.3	11.4	11.9	10.6	6.8	4.9	3.3	4	3.4	2.8	3.2	2.3	1.5	0.9	0.5	0.4	144				
Q _{floor}	0	0	0.1	0.3	0.5	0.7	1.2	1.6	2	2.18	2.24	2.27	2.3	2.32	2.38	2.2	1.6	1.3	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	30				
Q _{load}	0	0	1	2	3	6	11	17	24	24	25	25	26	26	27	24	15	11	7	9	7	6	5	4	3	2	1	1	309				

Figura 47. Potencia térmica de pérdidas a través de las paredes [kW].

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 112 de 231

4.1.3.2 Evolución térmica de la carga

En la tabla 27 se muestran los detalles constructivos de la vagoneta, los soportes y las piezas cerámicas con los que se calcula la potencia térmica en cada sección del horno de acuerdo con la evolución de temperatura de cada uno de los componentes.

Tabla 27. Características térmicas de carga y vagoneta. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).

ELEMENT	MATERIAL	mass	Cp
		kg/cart	kJ/kg·°C
Supporting plates	Cordierite	124.90	1.46
Supporting columns	Cordierite	17.77	1.46
Supporting frames	Cordierite	112.32	1.46
Pieces	Ceramic body	360	1.13
Floor cart insulation			
Layer-1	Refractory concrete	179.40	0.88
Layer-2	Thermal Panel Kaowool	26.52	0.84
Layer-3	Thermal Panel Kaowool	24.96	1.10
Layer-4	Vermiculite concrete 1/8	1228.50	0.84
Layer-5	Vermiculite concrete 1/5	222.30	0.84
Layer-6	Steel plate	91.85	0.46
Structure support and wheels	Iron	880.00	0.46

El campo de temperatura a través de la carga y por tanto la distribución no son uniformes a través de la carga y las capas de la vagoneta. Nicolau y col. han establecido el gradiente para un horno similar de fabricación de ladrillos, encontrando hasta un 50% de cambio de temperatura entre la superficie y el núcleo de la carga, como lo muestra la figura 48 (Nicolau and Dadam, 2009).

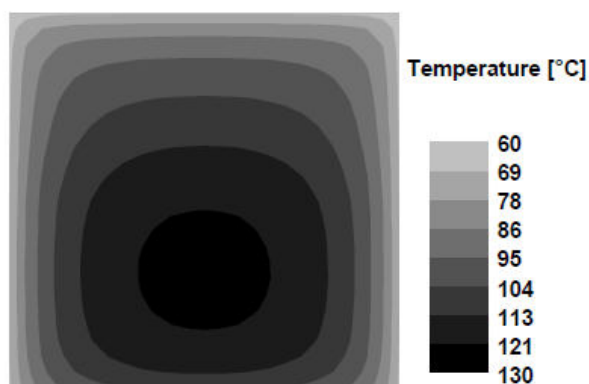


Figura 48. Gradiente transversal de temperatura en la carga a la salida del túnel. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019a).

En la figura 49 se muestran las potencias requeridas para calentar las masas sólidas durante el proceso de calentamiento y las potencias de enfriamiento (negativas) durante el proceso de enfriamiento.

ZONE	PREFIRING								FIRING								RAPID COOLING				SLOW COOLING							
	MODULE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
X [m]	1.5	4.5	7.5	10.5	13.5	16.5	19.5	22.5	25.5	28.5	31.5	34.5	37.5	40.5	43.5	46.5	49.5	52.5	55.5	58.5	61.5	64.5	67.5	70.5	73.5	76.5	79.5	82.5
T [°C]	43	62	183	317	427	559	754	926	1,081	1,145	1,167	1,179	1,188	1,194	1,214	1,153	947	818	688	637	585	534	460	386	313	239	165	133
Q _{ware}	13	32	58	56	55	75	84	75	50	20	8	5	3	6	-9	-61	-77	-59	-41	-23	-23	-29	-34	-34	-34	-34	-24	-22
Q _{plates}	6	14	26	25	25	33	38	33	22	9	3	2	2	3	-4	-27	-34	-26	-18	-11	-11	-13	-15	-15	-15	-15	-11	-10
Q _{columns}	1	2	4	4	4	5	5	5	3	1	0	0	0	0	-1	-4	-5	-4	-3	-1	-1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-1
Q _{supports}	5	13	23	22	22	30	34	30	20	8	3	2	1	2	-4	-25	-31	-24	-17	-9	-9	-12	-14	-14	-14	-14	-10	-9
Q _{refractory concrete}	4	11	22	23	22	29	33	29	19	8	3	2	1	2	-4	-24	-30	-23	-16	-9	-9	-11	-13	-13	-14	-14	-11	-4
Q _{panel kaowool}	1	2	3	3	3	4	5	4	3	1	0	0	0	0	-1	-3	-4	-3	-2	-1	-1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-1
Q _{fiber kaowool}	1	2	4	4	4	5	5	5	3	1	0	0	0	0	-1	-4	-5	-4	-3	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-1
Q _{vermiculite 1/8}	7	19	37	37	34	44	48	41	27	10	4	3	2	3	-5	-33	-42	-33	-23	-14	-14	-17	-21	-21	-22	-23	-18	-5
Q _{vermiculite 1/5}	1	3	6	6	5	6	7	5	3	1	1	0	0	0	-1	-4	-5	-4	-3	-2	-2	-3	-3	-3	-3	-4	-3	0
Q _{steel}	1	2	5	4	4	5	5	4	3	1	0	0	0	0	-3	-4	-3	-2	-1	-2	-2	-2	-2	-2	-3	-3	-2	0
Q _{wheels}	1	12	23	22	20	24	25	21	13	5	2	1	1	1	-2	-16	-21	-17	-13	-7	-8	-10	-12	-12	-13	-14	-11	19
Q _{total}	41	112	211	205	197	260	287	252	167	65	26	16	11	20	-31	-203	-257	-201	-142	-81	-82	-100	-119	-121	-123	-127	-95	-36

Figura 49. Potencias de calentamiento-enfriamiento de las masas sólidas a lo largo del túnel [kW]. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).

4.1.3.3 *Calculo de flujos de gases y potencia de combustible*

El sistema de ecuaciones a resolver se establece mediante los equilibrios de masa y energía como se indicó anteriormente.

El balance de masa es igual a las entradas de aire (aire del techo, combustión y exceso de aire, aire de enfriamiento rápido y lento), la entrada de masa de gas natural y las salidas de aire (gases de escape y aire de enfriamiento de escape).

$$\dot{m}_{ra} + \dot{m}_{ca} + \dot{m}_{ea} + \dot{m}_{rc} + \dot{m}_{sc} + \dot{m}_{cv} + \dot{m}_{ng} = \dot{m}_{ex} + \dot{m}_{exrc} + \dot{m}_{exsc} \dots\dots\dots(25)$$

Por otro lado, el balance de energía se establece con las energías térmicas de entrada y salida más las pérdidas. Cada término de la ecuación se calcula multiplicando el flujo de masa por la entalpía de la misma a la temperatura correspondiente, como se muestra en la ecuación (26):

$$\sum_{in} \dot{m}_{in} h_{in} = \sum_{o} \dot{m}_{out} h_{out} + W_{losses} \dots\dots\dots(26)$$

Las entradas de energía consideradas son:

- Aires de techo, combustión, exceso, enfriamiento rápido, enfriamiento lento y aire de contra-vec (cortina de aire a la salida del túnel).
- Flujo de gas natural de 48.000 kJ / kg.
- Vagonetas y superestructura, que consta de: piezas cerámicas, soportes y placas.

ZONE	PRE-FIRING								FIRING								RAPID COOLING				SLOW COOLING				TOTAL					
MODULE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28		
X	1.5	4.5	7.5	10.5	13.5	16.5	19.5	22.5	25.5	28.5	31.5	34.5	37.5	40.5	43.5	46.5	49.5	52.5	55.5	58.5	61.5	64.5	67.5	70.5	73.5	76.5	79.5	82.5		
T	43	62	183	317	427	559	754	926	1,081	1,145	1,167	1,179	1,188	1,194	1,214	1,153	947	818	688	637	585	534	460	386	313	239	165	133		
INLETS																														
m _{CH₄} IN	0.0006	0.0000	0.0019	0.0026	0.0017	0.0009	0.0035	0.0041	0.0092	0.0043	0.0027	0.0023	0.0023	0.0020	0.0040	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0420
m _{combustion air} IN	0.0095	0.0000	0.0318	0.0446	0.0284	0.0159	0.0607	0.0711	0.1573	0.0744	0.0455	0.0398	0.0399	0.0341	0.0682	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.7215
m _{excess air} IN	0.0010	0.0000	0.0032	0.0045	0.0028	0.0016	0.0061	0.0071	0.0157	0.0074	0.0046	0.0040	0.0040	0.0034	0.0068	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0721	
m _{roof air} IN	0.0347	0.0347	0.0347	0.0347	0.0347	0.0347	0.0347	0.0347	0.0347	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3120	
m _{rapid cooling} IN	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2410	0.2234	0.1909	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.6553	
m _{slow cooling} IN	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1125	0.1267	0.1777	0.2530	0.3154	0.4110	0.5794	0.6673	0.3246	2.9677	
Total m _{in}	0.0457	0.0347	0.0716	0.0864	0.0676	0.0531	0.1050	0.1171	0.2169	0.0862	0.0528	0.0461	0.0462	0.0394	0.0790	0.0000	0.2410	0.2234	0.1909	0.1125	0.1267	0.1777	0.2530	0.3154	0.4110	0.5794	0.6673	0.3246	4.7706	
OUTLETS																														
m _{exhausting} OUT	0.0457	0.0347	0.0716	0.0864	0.0676	0.0531	0.1050	0.1171	0.2169	0.0862	0.0528	0.0461	0.0462	0.0394	0.0790	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.1477	
m _{rapid cooling} OUT	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2410	0.2234	0.1909	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.6553	
m _{slow cooling} OUT	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1125	0.1267	0.1777	0.2530	0.3154	0.4110	0.5794	0.6673	0.3246	2.9677	
Total m _{out}	0.0457	0.0347	0.0716	0.0864	0.0676	0.0531	0.1050	0.1171	0.2169	0.0862	0.0528	0.0461	0.0462	0.0394	0.0790	0.0000	0.2410	0.2234	0.1909	0.1125	0.1267	0.1777	0.2530	0.3154	0.4110	0.5794	0.6673	0.3246	4.7706	

Figura 50. Flujos de gases en cada módulo del túnel. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).

4.1.3.4 Resultados del modelo de horno

A partir de la evaluación del horno, se deduce que más de la mitad de los 2,15 MW de gas natural quemado se pierden por las chimeneas de salida de gases, como lo muestra la tabla 28. Estos flujos pueden ser recuperados para otros procesos donde se requiera energía térmica.

Tabla 28. Balance de masa y energía a través del horno túnel. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2018)

INPUTS				OUTPUTS				
COMBUSTION	kg/s	°C	kW	COMBUSTION	kg/s	°C	kW	
NG	0.0448	30	2,150.22	Exhaust	1.5500	327	506.85	
Roof air	0.3120	30	9.36					
Combustion air	0.7690	30	23.07					
Excess air	0.0769	30	2.31					
Subtotal combustion=			1.2027	2,184.95	Subtotal combustion=			506.85
COOLING				COOLING				
Rapid cooling	0.7930	30	23.79	Rapid cooling	0.4450	868	386.26	
Slow cooling	1.6760	30	50.28	Slow cooling	3.1099	296	920.54	
Contracec air	1.4339	30	43.02	Contracec air				
Subtotal cooling=			117.09	Subtotal cooling=			1,306.80	
SUPERSTRUCTURE				SUPERSTRUCTURE				
Refractory plates	0.1401	30	6.14	Refractory plates	0.1401	30	6.14	
Cordierite columns	0.0199	30	0.87	Cordierite columns	0.0199	30	0.87	
Supporting plates	0.1260	30	5.52	Supporting plates	0.1260	30	5.52	
Pieces	0.4644	30	15.74	Pieces	0.4366	30	14.80	
Subtotal superstructure & pieces=			28.27	Subtotal superstructure & pieces=			27.33	
CARTS				CARTS				
Subtotal carts=			65.00	Subtotal carts=			100	
				LOOSES				
				Walls			106.11	
				Roof			158.19	
				Floor			29.09	
				Subtotal losses=			293.39	
THERMAL POWER			2,395.31	THERMAL POWER			2,388.29	

Difference due to iterative calculation errors

Aunque el modelo termodinámico se basa en un conjunto simple de conceptos, la solución resulta compleja ya que la temperatura varía a lo largo del túnel y el número de ecuaciones es muy elevado.

La figura 51 muestra el balance energético neto a través de las diferentes secciones del túnel.

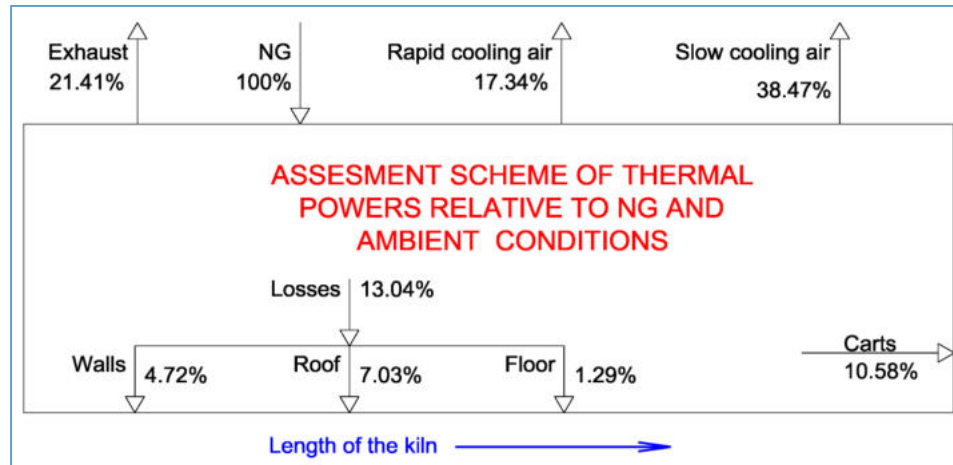


Figura 51. Esquema simplificado del modelo termodinámico de horno túnel. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2018)



Se puede ver que el 76% del calor liberado por el horno, se expulsa a través de las chimeneas de humos y aires de enfriamiento. Por lo tanto, se puede recuperar directamente o mediante un intercambiador de calor para ser reutilizado en otros procesos térmicos. La tabla 29 muestra las condiciones termodinámicas de una eventual mezcla de los tres flujos.

Tabla 29. Calor recuperable de las chimeneas del horno. Fuente (Elaboración propia).

		Chimenea 1	Chimenea 2	Chimenea 3	Mezcla
		Gases combustión	Enfriamiento rápido	Enfriamiento lento	
Flujo másico	m[kg/s]	1,55	0,445	3,11	5,105
Temperatura	T[°C]	327	868	296	355
Potencia térmica	[kW]	460	373	827	1.661
Temperatura sala	T ₀ [°C]	30			

4.1.4 Modelo de horno intermitente

El horno intermitente se ha modelado siguiendo el procedimiento utilizado para el horno túnel, con la única diferencia de que aquí la distribución térmica no es espacial sino temporal. Es decir, las variaciones termodinámicas no se localizan a lo largo del túnel y no son constantes, sino que son variables en el tiempo del ciclo, pero localizadas siempre en la totalidad de la cámara del horno. Para simular o modelar el horno, se ha considerado una cámara cerrada con aislamiento realizado mediante bloques refractarios y la vagoneta que transporta los artículos sanitarios como muestra la figura 52.

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 116 de 231

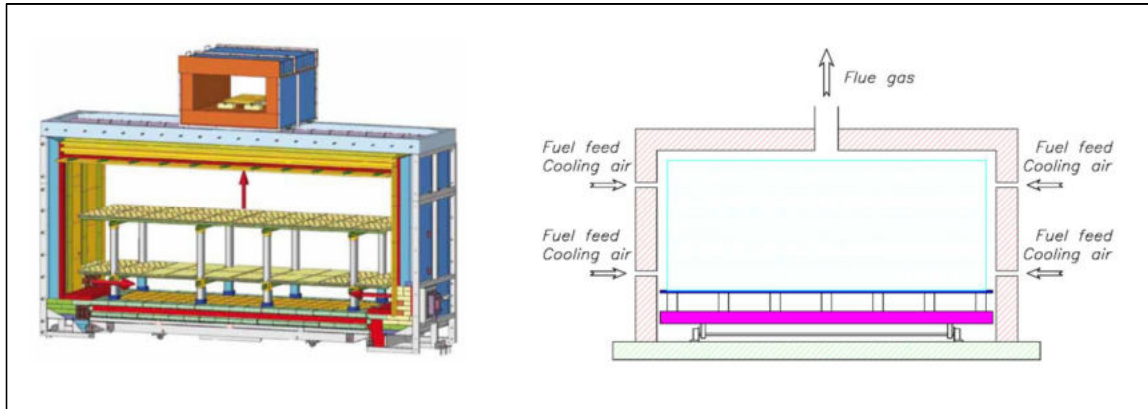


Figura 52. Sección transversal de un horno intermitente. Fuente: (SACMI Catalogue).

La figura 53 muestra la distribución de temperaturas en el interior durante el ciclo de trabajo.

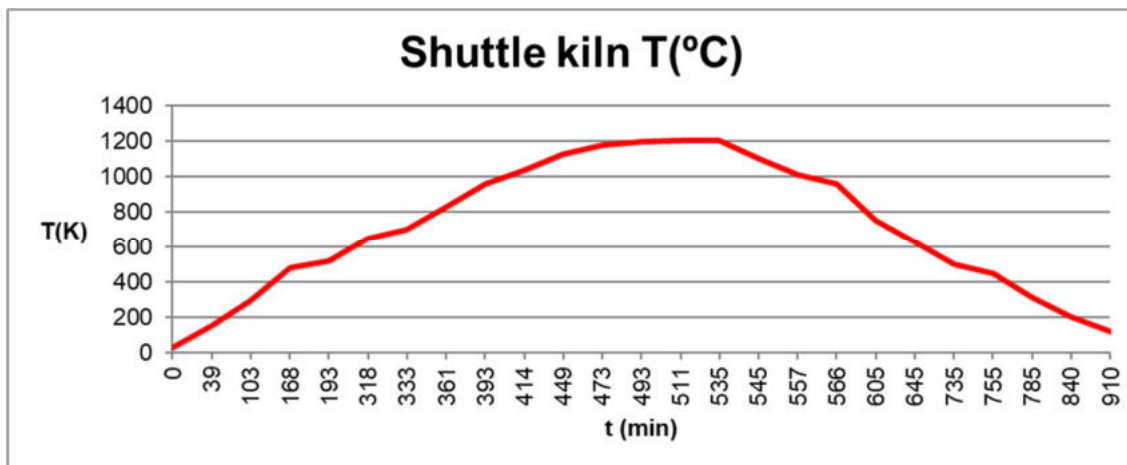




Figura 53. Curva de distribución de temperatura en un horno intermitente. Fuente: (SACMI Specifications).

Con el fin de regular esta curva de temperatura, se establecen diferentes corrientes de aire en el interior del horno:

- Aire de combustión para producir la combustión del GN según la relación estequiométrica.
- El exceso de aire establece el 10% del aire de combustión y permite la combustión completa.
- Se inyecta aire de inyección para regular dinámicamente las variaciones de temperatura.
- Difusión/enfriamiento del aire para proporcionar uniformidad de temperatura a través de la cámara del horno durante el proceso de calentamiento y enfriamiento de la cámara después de alcanzada la temperatura de vitrificación.

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 117 de 231

El balance de masa es igual a la diferencia de entradas; aires (combustión, exceso, inyección, difusión y aire de enfriamiento), y gas natural y las salidas; (gases de combustión y aire de enfriamiento saliente).

$$\sum_{in} \dot{m}_{in} = \sum_{out} \dot{m}_{out} \dots\dots\dots(27)$$

Por otro lado, el balance de energía es igual a diferencia de energías de entrada y las energías de salida más pérdidas. Cada término de la ecuación se calcula multiplicando el flujo de masa por la entalpía de la misma a la temperatura correspondiente, como se muestra en la ecuación (28):

$$\sum_{in} \dot{m}_{in} h_{in} = \sum_o \dot{m}_{out} h_{out} + W_{losses} \dots\dots\dots(28)$$

Las pérdidas se calculan considerando la transferencia térmica desde el interior del horno hacia el exterior, incluidos los tres componentes de la transferencia de calor; conducción, convección y radiación.

Se establece como ciclo de trabajo el de un día completo.

El horno de túnel se ejecuta en régimen permanente. Por lo tanto, el calor recuperable de él se ha considerado como constante. Es igual a:

$$Q_{TK_{recuperable}} = Q_{ex} + Q_{rc} + Q_{sc} \dots\dots\dots(29)$$

El flujo de aire de enfriamiento rápido es menor que el aire de combustión, por lo que la diferencia para precalentar el aire de combustión es suministrada por el flujo de los gases. La energía para precalentar el aire de combustión se obtiene mediante:

$$Q_{TK_{ca}} = \dot{m}_{ca} \cdot C_{p_{air}} \cdot (T_{ca} - T_0) \dots\dots\dots(30)$$

donde;

$$T_{ca} = \frac{\dot{m}_{rc} \cdot T_{rc} + (\dot{m}_{ca} - \dot{m}_{rc}) \cdot T_{ex}}{\dot{m}_{ca}} \dots\dots\dots(31)$$



El ciclo de cocción del horno intermitente de frío a frío se repite todos los días, por lo que la potencia térmica varía durante el ciclo. Sin embargo, la forma de calcular la potencia para cualquier período del ciclo es similar al horno de túnel, con la única diferencia de que solo hay un flujo y temperatura en la única chimenea de salida

$$Q_{SK_{recuperable}} = Q_{ex} \dots\dots\dots(32)$$

$$Q_{SK_{ca}} = \dot{m}_{ca} \cdot C_{p_{air}} \cdot (T_{ex} - T_0) \dots\dots\dots(33)$$

El calor recuperado resulta:

$$Q_{recovered} = Q_{TK_{recuperable}} - Q_{TK_{ca}} + Q_{SK_{recuperable}} - Q_{SK_{ca}} \dots\dots\dots(34)$$

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 118 de 231

La demanda térmica en cada periodo es la suma de los HVU's, y de los secaderos de moldes y piezas dependiendo del tipo de fábrica.

$$Q_{demand} = Q_{HVU's} + Q_{ware-dryers} + Q_{mold-dryers} \text{ (para fábrica de moldes de yeso) } \dots\dots\dots (35)$$

$$Q_{demand} = Q_{HVU's} + Q_{ware-dryers} + Q_{boilers} \text{ (para fábrica de moldes de resina) } \dots\dots\dots (36)$$

La cantidad de gas necesaria en cada periodo se obtiene por diferencia,

$$Q_{NG_{demand}} = Q_{demand} - Q_{recovered} \dots\dots\dots (37)$$

Cuando $Q_{NG_{demand}}$ resulta positivo, hay demanda de calor que debe ser suministrado con GN. Cuando resulta negativo, el exceso de calor se pierde o se almacena para ser utilizado posteriormente durante los próximos periodos de falta.

La potencia total de GN requerida para la fábrica es la suma de la demanda más los hornos:

$$Q_{NG_{factory}} = Q_{NG_{demand}} + Q_{NG_{kilns}} \dots\dots\dots (38)$$

Promediando las potencias a lo largo del ciclo diario se pueden calcular y comparar los ahorros de gas

$$\bar{Q}_{NG_{factory}} = \frac{\sum_{i=1}^{24} Q_{NG_{factory}_i} \cdot t_i}{\sum_{i=1}^{24} t_i} \dots\dots\dots (39)$$

4.1.5 Modelo psicrométrico



Para el cálculo posterior de secaderos y acondicionamiento de aire se precisa estudiar el modelo de tratamiento termodinámico de la atmósfera en la que se llevarán a cabo las evaporaciones del agua que ha de eliminarse de la pieza cerámica. A tal efecto el método que se ha considerado es como sigue.

La presión de vapor de saturación del agua contenida en el aire a una temperatura determinada es, de acuerdo a la ley de Sonntag (Various, 2014):

$$p_s = \exp(\sum_{i=1}^4 a_i \cdot T^{i-2} + a_7 \ln(T)), \dots\dots\dots (40)$$

donde;

- a1= -6,09693850E+03
- a2= 2,12409642E+01
- a3= -2,71119300E-02
- a4= 1,67395200E-05
- a7= 2,43350200E+00
- p_s [Pa]
- T [K]

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 119 de 231

Con un grado de incertidumbre <0,005%.

La cantidad de agua contenida en el aire está definida por:

$$x = \frac{m_v}{m_a} \cdot \frac{kg_{vapor}}{kg_{air}} \dots\dots\dots (41)$$

donde:

x = Contenido de agua [kg/kg].

m_v = Masa de vapor [kg].

m_a = Masa de aire [kg].

Por otro lado, las masas correspondientes de vapor y agua en una mezcla responden a la ley de Dalton:

$$m_v = \frac{M_w \cdot p_v \cdot V}{R_0 \cdot T} \dots\dots\dots (42)$$

$$m_a = \frac{M_a \cdot p_a \cdot V}{R_0 \cdot T} \dots\dots\dots (43)$$

donde:

M_w = Molecular mass of vapor [kg/kmol].

p_v = Partial pressure of vapor [Pa].

V = Volume of the vapor-air mixture [m³].

R_0 = Ideal gas constant [kJ/K/kmol].

T = Temperature of the mixture [K].

M_a = Molecular mass of air [kg/kmol].

p_a = Partial pressure of air [Pa].



De aquí:

$$x = \frac{m_v}{m_a} = \frac{M_w \cdot p_v}{M_a \cdot p_a} \dots\dots\dots (45)$$

La humedad relativa se define como:

$$\phi = \frac{p_v}{p_s} \dots\dots\dots (46)$$

Y la presión total de la mezcla es:

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 120 de 231

$$p = p_v + p_a \dots\dots\dots (47)$$

Combinando (5), (6) and (7), se obtiene:

$$x = \frac{M_v}{M_a} \cdot \frac{p_s}{\phi - p_s} \frac{kg_{vapor}}{kg_{air}} \dots\dots\dots (48)$$

Considerando que la humedad relativa en el punto de saturación es igual a 1,

$$\phi = 1 \dots\dots\dots (49)$$

y

$$x_s = \frac{M_v}{M_a} \cdot \frac{p_s}{p - p_s} \frac{kg_{vapor}}{kg_{air}} \dots\dots\dots (50)$$

Finalmente, la cantidad de agua contenida efectivamente en unas condiciones para una humedad relativa definida corresponde a:

$$x = x_s \cdot \phi \cdot \frac{kg_{vapor}}{kg_{air}} \dots\dots\dots (51)$$

La energía térmica de evaporación se puede obtener de la combustión de un combustible (fábrica convencional) o bien de la recuperación de aire caliente (fábrica optimizada). En cualquier caso, el cálculo se realiza a través de los balances de masa y energía de acuerdo al proceso que se trate según:

$$\sum_{in} \dot{m}_{in} = \sum_{out} \dot{m}_{out} \dots\dots\dots (52)$$


$$\sum_{in} \dot{m}_{in} \cdot h_{in} = \sum_{out} \dot{m}_{out} \cdot h_{out} \dots\dots\dots (53)$$

Las entalpías de los flujos se obtienen mediante las correlaciones termodinámicas proporcionadas por la base de datos de la NASA (Glenn Research Center database of thermodynamic data JANAF coefficients)

4.1.6 Modelo de secadero de piezas y centrales de acondicionamiento

Como se ha visto en la sección 3, el funcionamiento, tanto el secadero como las centrales de acondicionamiento de aire en la sala de colado, está determinado por las condiciones higrotérmicas del ambiente en la cámara interior. El funcionamiento en ambos casos es esencialmente el mismo;

- una cámara o sala donde tiene lugar una evaporación en condiciones fijadas de humedad y temperatura
- un aire impulsado relativamente seco para poder absorber la humedad de las piezas y relativamente caliente para aumentar la capacidad evaporadora

 Escuela Internacional de Doctorado EIDUNED	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 121 de 231

- una fuente de calor
- un sistema de extracción del aire saturado

La única diferencia en ambos sistemas radica en la dependencia de la climatología externa. En el caso del secadero el aire se toma de la sala de colado en unas condiciones prácticamente constantes. Por otro lado, las pérdidas térmicas están sujetas a las temperaturas de ciclo por el interior y a las de la sala de colado por el exterior. Por otro lado, en el caso de la central de acondicionamiento, es el ambiente de la sala el que hay que controlar, por lo que el aire de renovación procede del ambiente exterior y las pérdidas térmicas están definidas por la temperatura externa y en gran medida, por la radiación solar.

El esquema de funcionamiento del secadero puede verse en la figura 54.

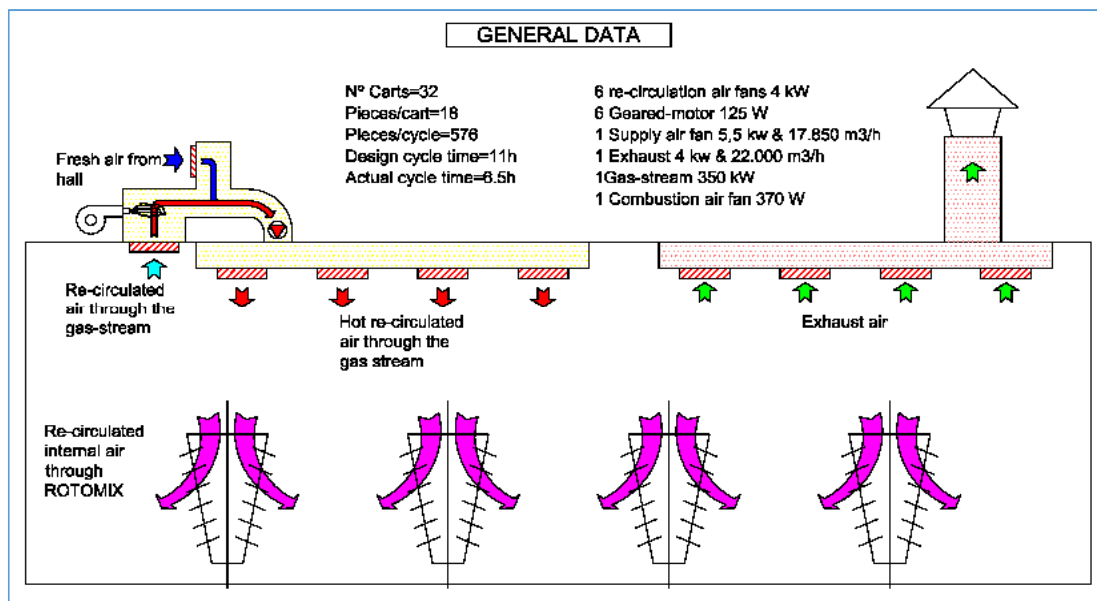


Figura 54. Esquema del modelo del secadero de piezas. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2018).

El esquema de una central de acondicionamiento se puede apreciar en la figura 55.

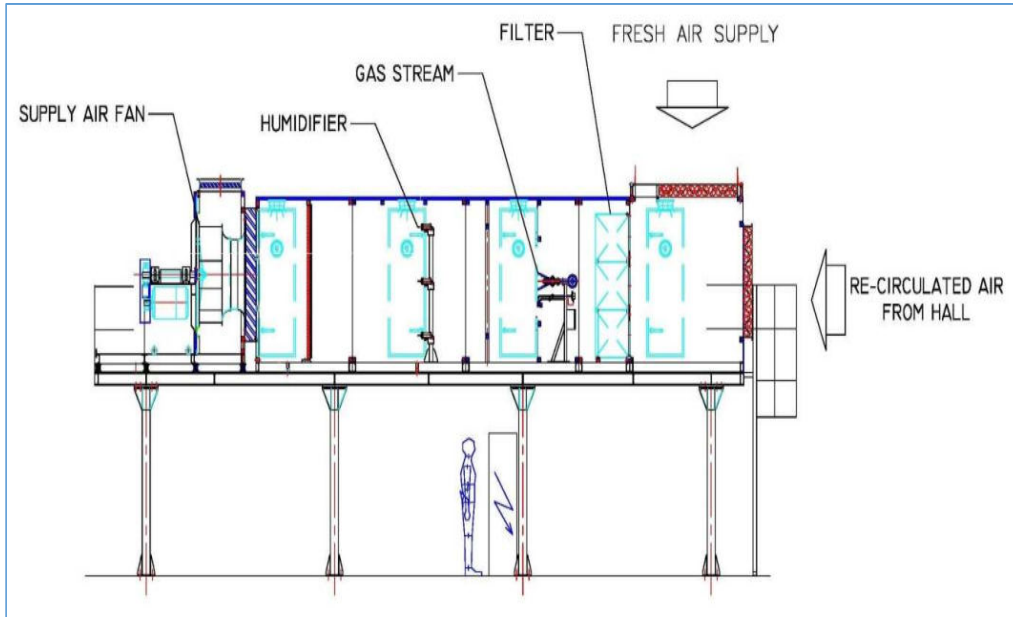


Figura 55. Esquema del modelo de central de acondicionamiento de aire. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2018).

4.1.6.1 Cálculo de la demanda térmica

El proceso térmico en ambos casos es termodinámicamente el mismo con la única diferencia en las condiciones ambientales requeridas para la evaporación que son variables según la fase de cada ciclo cuyas hipótesis fueron establecidas en la sección 3. Las ecuaciones del modelo que definen la demanda térmica del sistema son las siguientes de acuerdo a cada necesidad:

Calentamiento de las piezas cerámicas y los carros soportes de transporte

$$Q_{carts \& \text{ware}} = (m_{\text{ware}} \cdot C_{e_{\text{ware}}} + m_{\text{carts}} \cdot C_{e_{\text{carts}}}) \cdot \Delta t \dots \dots \dots (54)$$

Donde,

m_{ware} = masa de la cerámica a secar

$C_{e_{\text{ware}}}$ = calor específico de la cerámica



m_{carts} = masa de los carros de transporte

$C_{e_{\text{carts}}}$ = calor específico de los carros

Δt = aumento de temperatura de las masas en cada etapa del ciclo

Calentamiento del aire de renovación para extracción del agua

$$Q_{\text{ventilation}} = m_{\text{fresh air}} \cdot C_{e_{\text{air}}} \cdot \Delta t \dots \dots \dots (55)$$

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 123 de 231

Donde,

$m_{fresh\ air}$ = masa de aire de renovación

Ce_{air} = calor específico del aire a la temperatura correspondiente

Δt = salto térmico del aire entre la temperatura de entrada y la interna de ciclo

La cantidad de aire fresco necesaria para absorber el agua se calcula por:

$$m_{fresh\ air} = \frac{m_{evaporation}}{x_{SIN} - x_{IN}} \dots\dots\dots (56)$$

Donde,

$m_{evaporation}$ = masa de agua a evaporar en cada fase del ciclo

x_{SIN} = humedad del aire saturado a la temperatura correspondiente del ciclo

x_{IN} = humedad requerida en cada fase del ciclo

Mantener la temperatura de ciclo frente a las pérdidas por cerramientos

$$Q_{losses} = S \cdot U \cdot \Delta t \dots\dots\dots (57)$$

Donde,

S = superficie de los cerramientos

U = coeficiente global de transmisión térmica

Δt = salto térmico entre los ambientes interior y exterior

Evaporación de agua

$$Q_{evaporation} = m_{evaporation} \cdot (h_{vapor} - h_{water}) \dots\dots\dots (58)$$

Donde,

h_{vapor} = entalpía específica del vapor en las condiciones del ciclo



h_{water} = entalpía específica del agua en las condiciones del ciclo

La demanda térmica total es la suma:

$$Q_{thermal} = Q_{carts\ \&\ ware} + Q_{ventilation} + Q_{losses} + Q_{evaporation} \dots\dots\dots (59)$$

4.1.6.2 Cálculo la cantidad de agua evaporada

La cantidad de agua que se ha de eliminar, tanto de las piezas como de los moldes es la que se ha establecido en la sección 3 y que corresponde al contenido de agua de la barbotina. En una primera fase se evapora en

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 124 de 231

la sala de colado mientras la pieza asienta su consistencia y en una segunda fase, dentro del secadero. Pero, esta agua no es la única que se encuentra en las emisiones gaseosas, tanto de la sala de colado como la de los secaderos. A continuación, se enumeran las diferentes aportaciones hídricas al proceso.

Cantidad de agua evaporada de la humedad del aire de renovación

La cantidad aportada por el aire de renovación se obtiene a partir de la humedad ambiental, bien de la sala de colado en el caos del secadero o del ambiente externo, en el caso de la central de calefacción:

$$m_{moisture\ from\ fresh\ air} = m_{fresh\ air} \cdot x_{OUT} \dots\dots\dots (60)$$

Donde,

x_{OUT} = humedad del aire de renovación.

Masa de agua aportada por la combustión.

Por un lado, está la humedad contenida en el aire de combustión que se calcula de acuerdo a la humedad ambiental según:

$$m_{moisture\ combustion\ air} = m_{combustion\ air} \cdot x_{OUT} \dots\dots\dots (61)$$

Por otro lado, está la humedad aportada por el propio proceso de combustión que se calcula por los equivalentes estequiométricos.

Masa de agua aportada por el aire del calor recuperado.

Cuando el aporte de calor se hace a partir de aire recuperado, éste ha de mezclarse con aire fresco a fin de equilibrar las temperaturas con la deseada en el interior de la cámara o sala. La relación de cantidades se calcula de acuerdo al siguiente sistema de ecuaciones:

Del balance de energía:

$$m_{RH} \cdot h_{RH} + m_{OUT} \cdot h_{OUT} = Q_{thermal} + (m_{RH} + m_{OUT}) \cdot h_{IN} \dots\dots\dots (62)$$

Del balance de masa en contenido de agua:

$$m_{RH} \cdot x_{RH} + m_{OUT} \cdot x_{OUT} = (m_{RH} + m_{OUT}) \cdot x_{IN} \dots\dots\dots (63)$$

De la masa de agua a evaporar frente a la capacidad evaporadora de la mezcla de aires:

$$m_{evaporated} = (m_{RH} + m_{OUT}) \cdot (x_{SIN} - x_{IN}) \dots\dots\dots (64)$$

Finalmente, la humedad resultante de la mezcla será:

$$m_{moisture\ flow} = m_{RH} \cdot x_{RH} + m_{OUT} \cdot x_{OUT} \dots\dots\dots (65)$$

4.1.7 Modelo de secadero de moldes

De manera similar al secadero de piezas, estos secaderos se basan en el mismo concepto que el secadero de piezas con la única diferencia del estado higrotérmico en su interior. Los parámetros de operación se muestran en la figura 56.

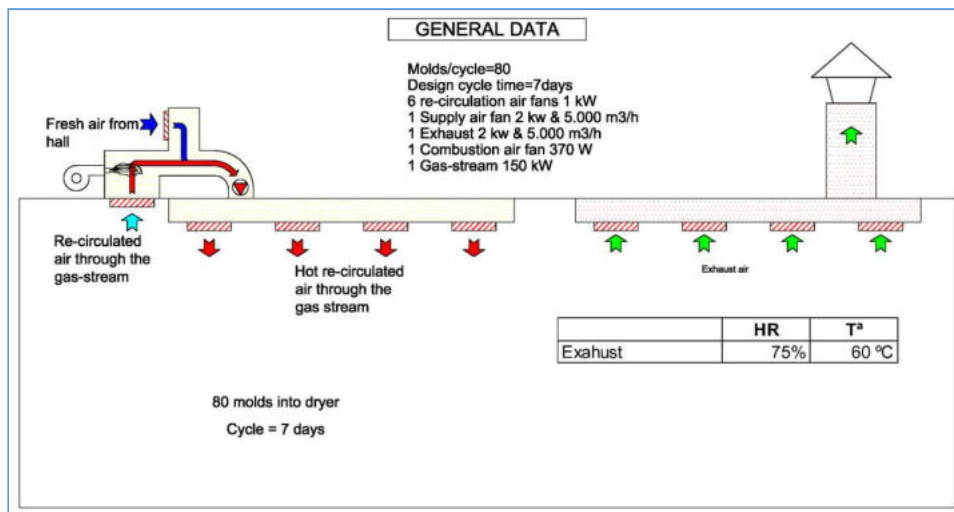


Figura 56. Esquema de modelo de secadero de moldes. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2018).

Como se explicó para el secadero de piezas, estos secaderos utilizan energía térmica para calentar los moldes de yeso, evaporar el agua contenida y compensar las pérdidas térmicas a través de cerramientos. El modelo de ecuaciones puede considerarse exactamente igual al de secadero de piezas.



Al igual que la masa dentro del secadero, el caudal de aire necesario para absorber el agua de la evaporación de los moldes debe calentarse a la temperatura interna de la cámara. El aire y el agua evaporada se muestran en las tabla 30 y tabla 31.

Tabla 30. Consumo de energía para un ciclo completo de secado. Fuente: (Elaboración propia).

	Energía GJ	Potencia kW
Pérdidas	3,86	6,38
Vaporización de agua	57,87	95,68
Calentamiento de aire	8,07	13,34
TOTAL	69,80	115,41

Tabla 31. Flujos de agua y aire para un ciclo completo de secado. Fuente: (Elaboración propia).

	kg	kg/h
Agua a evaporar	24.276	144,50
Aire necesario para secar	212.370	1.264,11

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 126 de 231

4.1.8 Modelo de consumo de agua

La figura 57 muestra cómo se distribuye el consumo de agua en una fábrica de sanitarios típica.

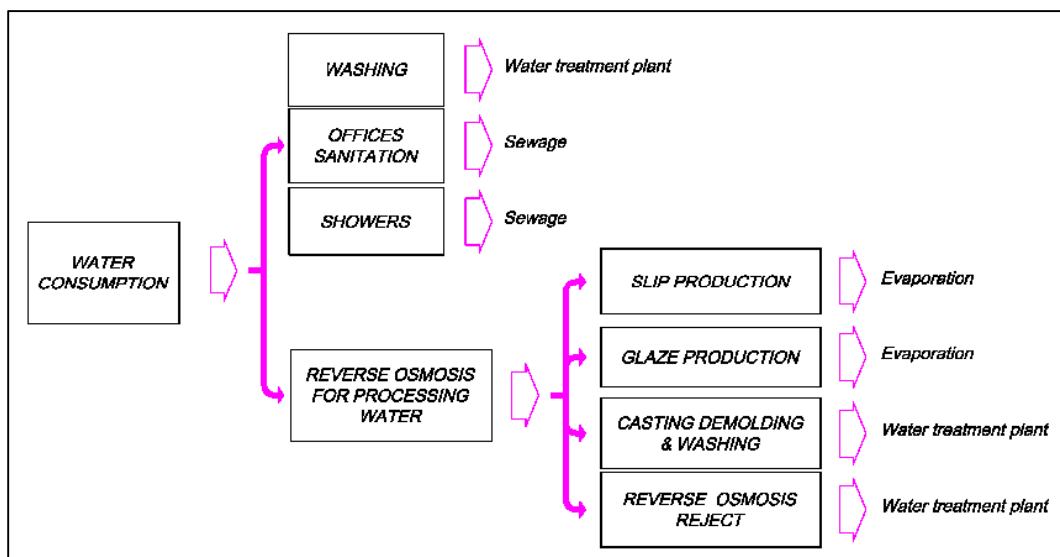




Figura 57. Esquema de consumo de agua en una fábrica tipo. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2018).

El agua se utiliza esencialmente como materia prima para la producción de barbotina, yeso, y esmalte, pero también es necesaria para lavar los moldes después de cada colada cuando la tecnología es de moldes de resina. Dependiendo de la calidad del suministro de agua, es común tratar el agua para eliminar las sales disueltas, lo cual es un inconveniente importante tanto para la operación de los moldes como para la formación del cuerpo de las piezas. La tecnología de moldes de resina es bastante más intensiva que en el caso de yeso en términos de uso de agua. Dado que el proceso no implica la contaminación del agua a excepción de la deposición de partículas de suspensión sólidas inorgánicas y la solución sales en muy baja concentración, puede tratarse fácilmente para como agua residual. En el caso de pretender la reutilización del agua, el tratamiento ya no resulta sencillo pues es necesaria la eliminación de sales en disolución a fin de que la concentración de sal no aumente con cada ciclo.

En las fábricas la forma más común de eliminar sales del agua es la ósmosis inversa y el agua residual suele ser rechazada al cauce público sin reutilización.

El sistema de ecuaciones para evaluar el consumo de agua se define a partir del análisis de los procesos que incluyen el agua en su operación y su balance de masa de acuerdo con los siguientes criterios.



 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 127 de 231

- El agua para la producción de barbotina se calcula en base a la fórmula de composición cerámica, que suele estar en el rango de un tercio del peso húmedo total de la pieza.
- El agua para la producción de esmalte se estima a partir de la suposición de que la proporción de esmalte / deslizamiento es de uno a nueve kg de la pieza final.
- El agua para la fabricación de moldes de yeso se calcula a partir de la cantidad de moldes producidos diariamente (promedio 80), su peso promedio es de aproximadamente 200 kg y la relación agua/yeso es de aproximadamente 1 kg/kg.
- El agua para el lavado de moldes dentro de la sección de colado es bastante diferente dependiendo de la tecnología de colado. Para moldes de yeso, se necesitan aproximadamente 5 dm³ por molde y colada. Para moldes de resina la cantidad es de 180 dm³.
- El agua para uso sanitario se estima según las proporciones estándar comunes para aseos, duchas, etc.
- Con la excepción del agua sanitaria, el resto debe ser tratada para eliminar las sales previamente a su uso industrial.
- Se supone un 50% de eficiencia para el R.O. como valor de tecnología industrial de uso común.

Al estudiar las diferencias de proceso desde el punto de vista de demanda hídrica, se puede ver que es mucho mayor en la tecnología de moldes de resina (tabla 32). Aunque la fabricación de moldes de yeso requiere una cantidad considerable de agua, es mucho menor que la necesaria para el lavado de moldes de resina. La diferencia está en el colado. El colado en moldes de resina consume casi 8 veces más agua que el yeso. Mientras que la resina mejora la productividad y el consumo de energía, el consumo de agua penaliza el uso de esta tecnología a menos que el agua se reutilice en ciclo cerrado con un tratamiento adecuado.

Tabla 32. Consumo de agua. Fuente: (Elaboración propia).

CONSUMO AGUA	MOLDES YESO			MOLDES RESINA		
	Proceso m ³ /día	Lavado m ³ /día	Total día m ³ /día	Proceso m ³ /día	Lavado m ³ /día	Total día m ³ /día
PRIMERAS MATERIAS		0	0,20		0	0,20
PASTAS	21,52	0,50	22,02	21,52	0,50	22,02
PREPARACION ESMALTE	2,39	0,50	2,89	2,39	0,50	2,89
YESO	6,73	0,30	7,03		0,30	0,30
COLADO	26,94	2,00	28,94	484,91	2,00	486,91
ACONDICIONAMIENTO			0,00			0,00
SECADO			0,00			0,00
ESMALTERIA		2,00	2,00		2,00	2,00
HORNOS			0,00			0,00
CONTROL FINAL		0,20	0,20		0,20	0,20
OFICINAS	0,38	0,10	0,48	0,38	0,10	0,48
ALMACEN		0,25	0,25		0,25	0,25
SERVICIOS	64,72	2,00	66,72	518,40	2,00	520,40
TOTALES DIARIOS (m³)	122,68	8,05	130,73	1,028	8,05	1.036
CONSUMO ANUAL (m³)	28.462	1.868	30.329	238.403	1.868	240.271

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 128 de 231

4.2 PUBLICACION 2: “Heat recovery in sanitary-ware industry applied to water and energy saving by multi-effect distillation”

Siguiendo la secuencia propuesta en la sección 3.3, en esta publicación se aborda la primera solución específica para la industria del sanitario. Se combina el aprovechamiento de calor residual a una temperatura media para destilar el agua de lavado de moldes y poder reutilizarla con el mismo fin en circuito cerrado. La conjunción de ambas necesidades inherentes al proceso permite una reducción racional de recursos con la ayuda del mapa establecido en la “*publicación 1*”.

4.2.1 Destilación multi-efecto (MED)

La destilación con temperaturas inferiores a 100 °C requiere alto consumo eléctrico para la generación de presiones por debajo de la atmosférica. No obstante, el ahorro obtenido por la recuperación de calor residual como fuente térmica para el proceso y la reutilización del agua tratada compensan ese efecto. Por otro lado, la destilación es menos sensible al contenido de sólidos en suspensión cuando en el flujo se mantiene una adecuada turbulencia. Este hecho la hace más adecuada que la ósmosis inversa como método de tratamiento para la reutilización de agua. La turbulencia es adecuada además a efectos de mejorar la transferencia de calor a lo largo de los tubos de los intercambiadores de calor. El agua reciclada con este método es adecuada para ser utilizada en nuevos ciclos. Existen investigaciones a este respecto en el sector industrial (Ammar et al., 2013).

4.2.2 Modelo destilación multi-efecto (MED)

El punto clave del modelo reside en la forma de aprovechar al máximo el calor recuperado del horno. Por lo tanto, el diseño de la destiladora debe coincidir con las características de calor para funcionar con un grado térmico bajo (Dastgerdi et al., 2016). Sin embargo, debe tenerse en cuenta que 70 °C es la temperatura más alta admisible en los tubos del evaporador para evitar deposiciones en el lado de la salmuera (Artin Hatzikioseyan and Pavlina Kousi, 2003). Por encima de esta temperatura, parte del contenido de CaCO₃ o CaSO₄, comienza a precipitar drásticamente produciendo incrustaciones y grandes caídas de efectividad del coeficiente de transferencia térmica. El diseño de las celdas de evaporación ha de ser realizado con unas boquillas de inyección a fin de producir cierto grado de pulverización que facilite la evaporación instantánea “*flash*” al acceder el líquido a una cámara con menos presión que la de saturación (Chen et al., 2018).

4.2.3 Cascada de tres celdas de evaporación simples

Inicialmente, como ejercicio de dimensionamiento previo, se calcula un sistema con tres celdas de evaporación para los tres estados térmicos de los gases recuperados provenientes del horno. Se calcularon a presión atmosférica y formando una cascada térmica descendente, como muestra la figura 58.

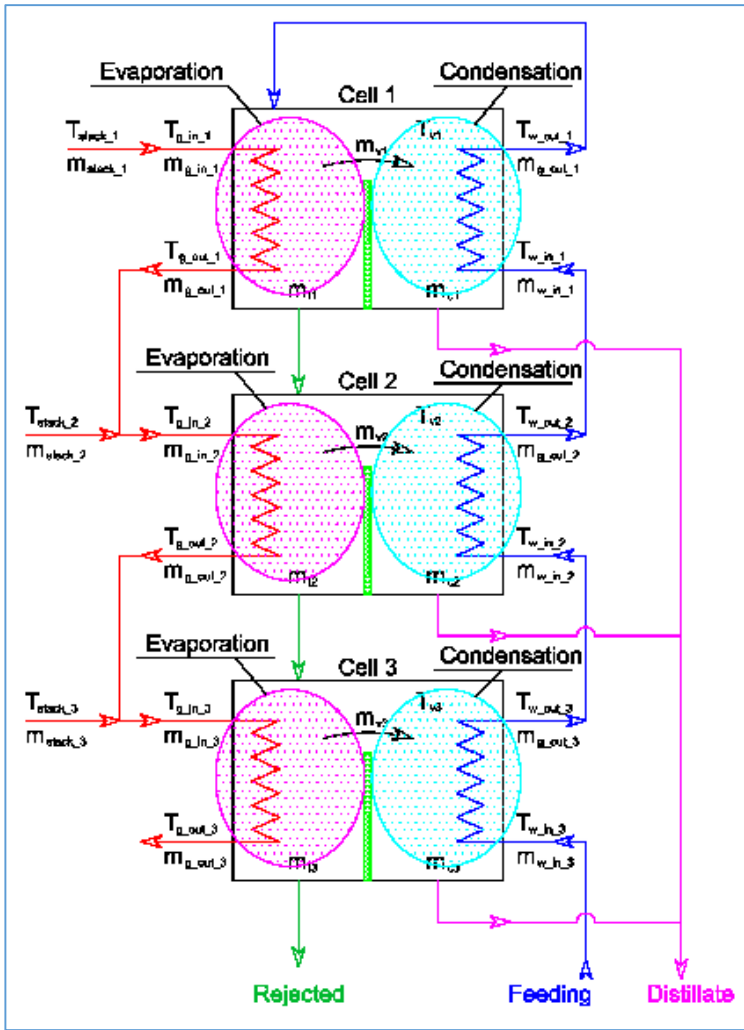




Figura 58. Cascada simple de celdas de evaporación-condensación. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019a).

Las ecuaciones para este modelo se obtienen de los balances de energía en el evaporador y el condensador de cada etapa según la figura 58:

$$Q_e = \dot{m}_g \cdot \Delta h_g = \dot{m}_v \cdot \Delta h_v \dots \dots \dots (66)$$

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 130 de 231

$$Q_c = \dot{m}_w \cdot \Delta h_w = \dot{m}_c \cdot \Delta h_c \dots \dots \dots (67)$$

Los datos para calcular los aumentos específicos de entalpía se obtienen de la base de datos de coeficientes de datos termodinámicos del Centro de Investigación Glenn de la NASA.

El resultado de una cascada simple de celdas condensador- evaporador se muestra en la tabla 33.

Tabla 33. Transferencia de energía en una cascada simple de evaporador-condensador. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019a).

		Cell 1	Cell 2	Cell 3	
EVAPORATOR	m_g	kg/s	0.445	1.995	5.105
	T_{g_in}	°C	868	327	296
	T_{g_out}	°C	327	296	110
	h_{g_in}	kJ/kg	907	305	272
	h_{g_out}	kJ/kg	305	272	81
	Dh_g	kJ/kg	602	32	191
	Q_e	kJ	268	65	974
	T_v	°C	100	100	100
	h_l	kJ/kg	419	419	419
	h_v	kJ/kg	2,688	2,688	2,688
	Dh_v	kJ/kg	2,269	2,269	2,269
	m_v	kg/s	0.1181	0.0286	0.4294
	m_w	kg/s	5.61	5.61	5.61
	CONDENSER	m_c	kg/s	0.1181	0.0286
T_{w_in}		°C	74.25	71.50	30.00
T_{w_out}		°C	85.62	74.25	71.50

Dada la baja eficiencia resultante, y con el fin de mejorar el rendimiento, se diseña un sistema de evaporación al vacío en cascada multi-efecto como muestra la figura 59.

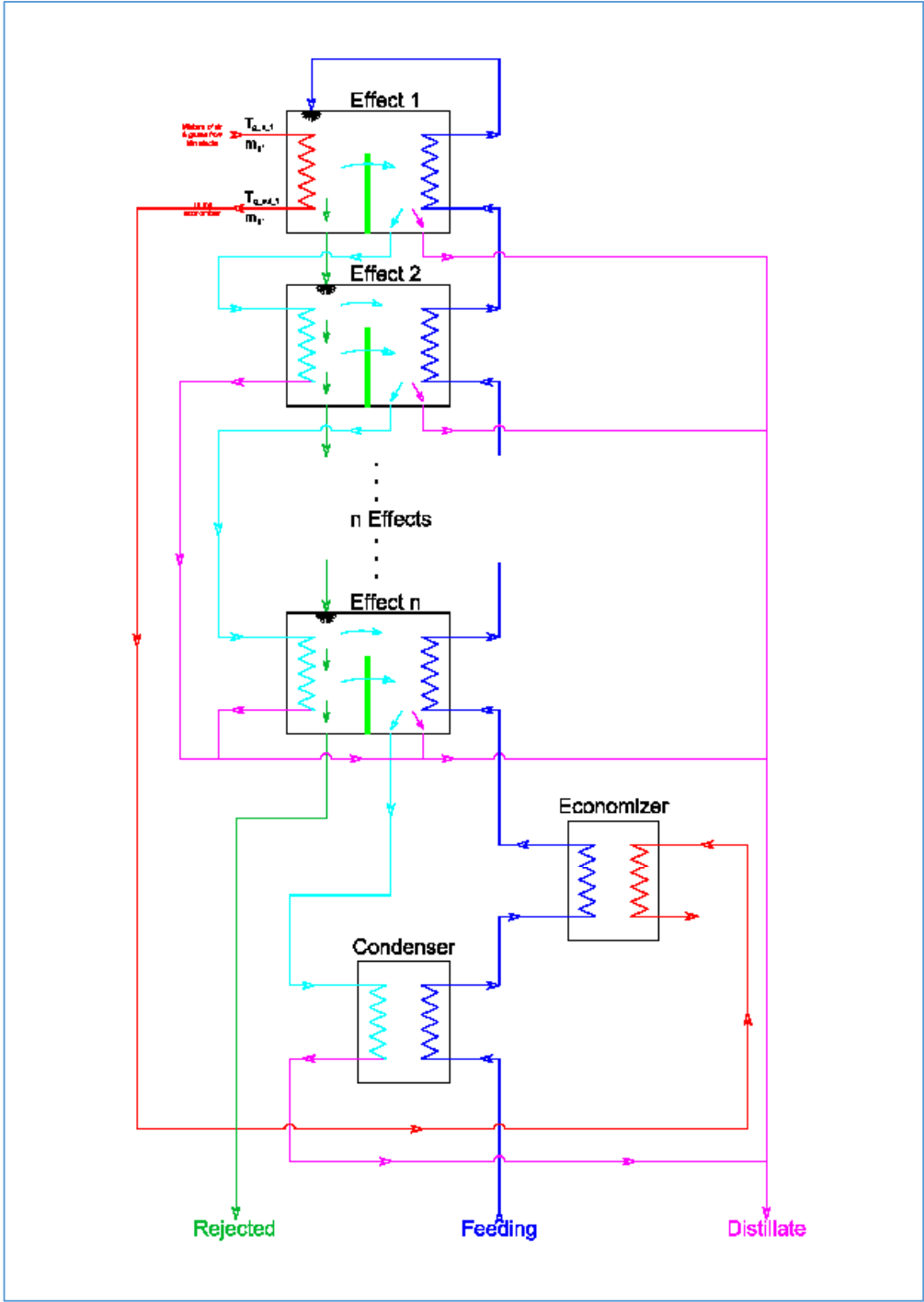




Figura 59. Esquema del sistema MED de destilación. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019a).

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 132 de 231

El agua de alimentación se envía a través de los pre-calentadores hasta el primer efecto donde es parcialmente evaporada a baja presión por intercambio térmico con el calor recuperado procedente del horno. Este vapor, también parcialmente se condensa por intercambio térmico con el agua de alimentación en el lado del condensador. La fracción no condensada continua el circuito aguas abajo con más temperatura que la del siguiente efecto donde actuará como fuente de calor para evaporar otra fracción de agua de alimentación repitiendo de nuevo el proceso. La configuración esquemática del primer efecto se puede ver en la figura 60.

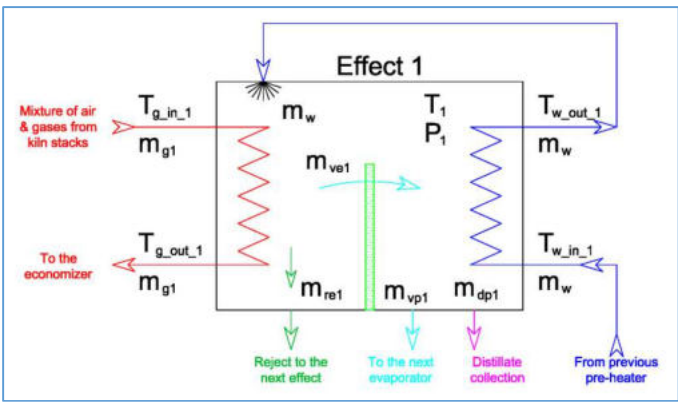


Figura 60. Esquema de configuración del primer efecto MED. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019a).

Los balances de masa y energía proporcionan el calor intercambiado, el agua evaporada en el evaporador y el destilado condensado en el pre-calentador. La temperatura de este primer efecto se debe parametrizar para optimizar el sistema. Como la temperatura debe ser inferior a 100 °C para evitar incrustaciones en el evaporador, la presión en la celda debe reducirse hasta la presión de vapor correspondiente a esta temperatura.

4.2.4 Ecuaciones en el primer efecto

4.2.4.1 Evaporador

$$Q_1 = \dot{m}_g \cdot (h_{g_in_1} - h_{g_out_1}) = \dot{m}_{ve1} \cdot (h_{v1} - h_{l1}) \dots \dots \dots (68)$$

$$\dot{m}_w = \dot{m}_{re1} + \dot{m}_{ve1} \dots \dots \dots (69)$$

4.2.4.2 Pre-Calentador

$$Q_1 = \dot{m}_{dp1} \cdot (h_{v1} - h_{l1}) = \dot{m}_w \cdot (h_{w_out_1} - h_{w_in_1}) \dots \dots \dots (70)$$

$$\dot{m}_{ve1} = \dot{m}_{vp1} + \dot{m}_{dp1} \dots \dots \dots (71)$$

Este proceso se repite en los siguientes efectos aguas abajo a medida que la temperatura disminuye y por tanto la presión en cada efecto, que debe igualar a la de vapor correspondiente. La figura 61 ilustra este concepto.

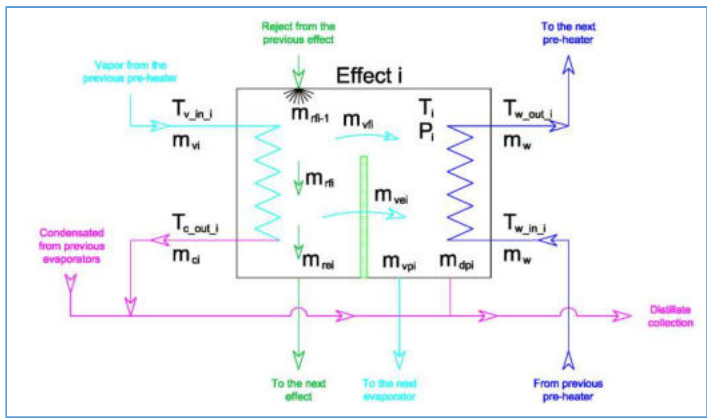


Figura 61. Esquema de cada efecto genérico del MED. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019a).

Una vez calculado el primer efecto, se aplican las ecuaciones de balance de masa y energía a la cámara de evaporación instantánea “flash”, al evaporador y al pre-calentador de cada efecto genérico subsiguiente para definir el estado termodinámico de cada flujo en cada estadio. El flujo caliente para el evaporador se toma de la corriente de vapor que sale del pre-calentador anterior, \dot{m}_{vpi-1} .

4.2.5 Ecuaciones en un efecto i-genérico

4.2.5.1 Cámara flash

$$\dot{m}_{rfi-1} \cdot h_{rfi-1} = \dot{m}_{vfi} \cdot h_{vfi} + \dot{m}_{rfi} \cdot h_{rfi} \dots \dots \dots (72)$$

$$\dot{m}_{rfi-1} = \dot{m}_{vfi} + \dot{m}_{rfi} \dots \dots \dots (73)$$

4.2.5.2 Evaporador

$$\dot{m}_{vi} = \dot{m}_{vpi-1} \dots \dots \dots (74)$$

$$\dot{m}_{vi} = \dot{m}_{ci} \dots \dots \dots (75)$$

$$Q_i = \dot{m}_{vi} \cdot (h_{v_in_i} - h_{c_out_i}) \dots \dots \dots (76)$$

$$\dot{m}_{vi} \cdot h_{v_in_i} + \dot{m}_{rfi} \cdot h_{rfi} = \dot{m}_{rei} \cdot h_{rei} + \dot{m}_{vei} \cdot h_{vei} + \dot{m}_{ci} \cdot h_{c_out_i} \dots \dots \dots (77)$$

$$\dot{m}_{rfi} = \dot{m}_{rei} + \dot{m}_{vei} \dots \dots \dots (78)$$

4.2.6 Pre-calentador

$$\dot{m}_{vfi} \cdot h_{vfi} + \dot{m}_{vei} \cdot h_{vei} + \dot{m}_w \cdot h_{w_in_i} = \dot{m}_{vpi} \cdot h_{vpi} + \dot{m}_{dpi} \cdot h_{dpi} + \dot{m}_w \cdot h_{w_out_i} \dots\dots\dots (79)$$

$$\dot{m}_{vfi} + \dot{m}_{vei} = \dot{m}_{vpi} + \dot{m}_{dpi} \dots\dots\dots (80)$$

4.2.7 Condensador

En el último efecto, el vapor restante se envía al condensador para ser condensado por intercambio con el agua fría de alimentación. La energía entregada en el condensador eleva la temperatura del primer paso del agua de alimentación.

Aguas abajo del condensador, se dispone un economizador previamente al último efecto para precalentar el agua de alimentación antes de pasar por los pre-calentadores secuenciales de los diferentes efectos. La fuente térmica para este propósito es el flujo de gases residuales procedente del evaporador en el primer efecto. Esta configuración se puede ver en la figura 62.

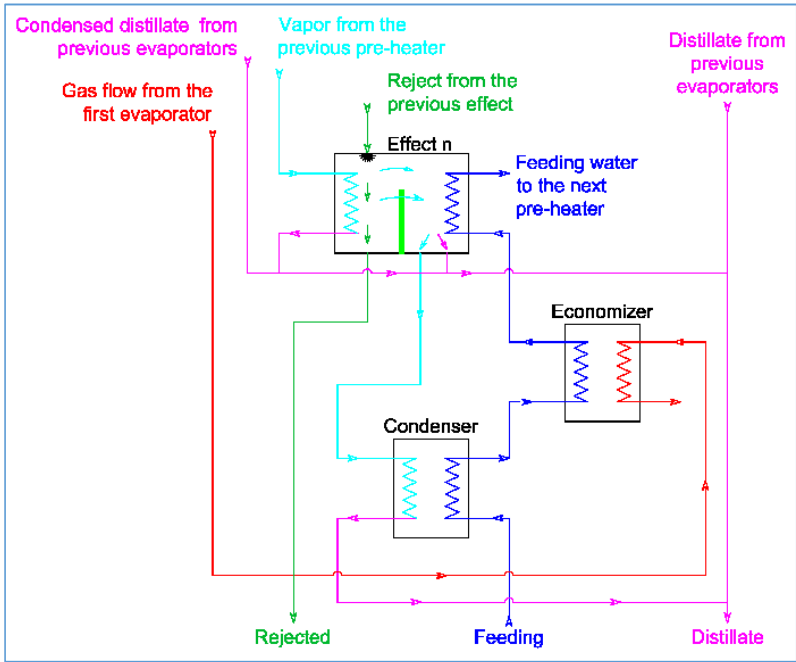




Figura 62. Esquema de configuración del ultimo efecto y la alimentación del Sistema. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019a).

Para calcular el comportamiento teórico del sistema, las ecuaciones deben resolverse en un proceso iterativo ya que los flujos resultantes están interactuando con el flujo de entrada en el condensador. En este punto hay

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 135 de 231

dos flujos desconocidos, por lo que uno de ellos tiene que ser estimado. El flujo de agua de alimentación se conoce antes de entrar al condensador. En la salida del condensador, debe calcularse a partir del flujo de vapor del último efecto, que es una de las variables a calcular. Se estima la temperatura del agua de alimentación en el condensador. Después de calcular sucesivamente cada efecto, se obtiene el valor del vapor del último efecto. Este flujo aplicado al condensador proporciona una temperatura calculada para el agua de alimentación que sirve para corregir la previamente estimada repetir el proceso de iteración hasta que ambas temperaturas, estimada y calculada, sean iguales.

Hay algunos parámetros a tener en cuenta para que el sistema sea consistente desde el punto de vista termodinámico y matemáticamente resoluble. Estos son los siguientes:

- El diferencial térmico en el economizador en la salida de gases ha de ser supuesto.
- El diferencial térmico en el evaporador del primer efecto a la salida de gases ha de ser supuesto.
- Se supone que el diferencial térmico en cada efecto es igual.

Las ecuaciones (81) y (82) permiten resolver el sistema igualando los calores intercambiados y evaluando los equilibrios de masa y energía en cada efecto, condensador y economizador de la siguiente manera.

Ecuación del condensador

$$Q_c = \dot{m}_w \cdot (h_{w_out_c} - h_{w_in_c}) = \dot{m}_{v_c} \cdot h_{v_in_c} - \dot{m}_{d_c} \cdot h_{d_out_c} \dots\dots\dots (81)$$

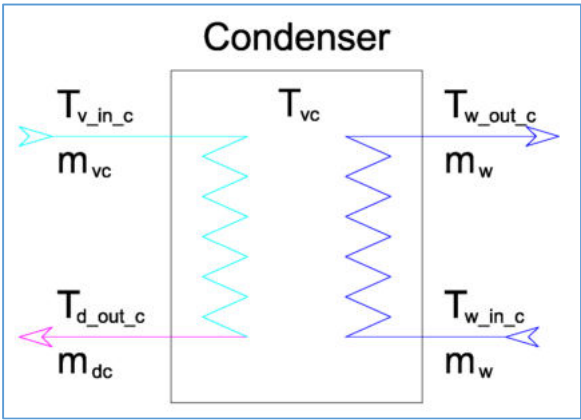




Figura 63. Esquema del condensador. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019a).

Ecuación del economizador

$$Q_e = \dot{m}_w \cdot (h_{w_out_e} - h_{w_in_e}) = \dot{m}_{ge} \cdot (h_{ge_in_e} - h_{ge_out_e}) \dots\dots\dots (82)$$

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 136 de 231

Las condiciones de entrada son conocidas para ambos flujos, pero las temperaturas de salida son desconocidas, por lo que se debe hacer una suposición. Se parametriza el salto térmico de salida para relacionar ambas temperaturas de salida. En estas circunstancias, la ecuación se puede resolver. La figura 64 ilustra el esquema del economizador.

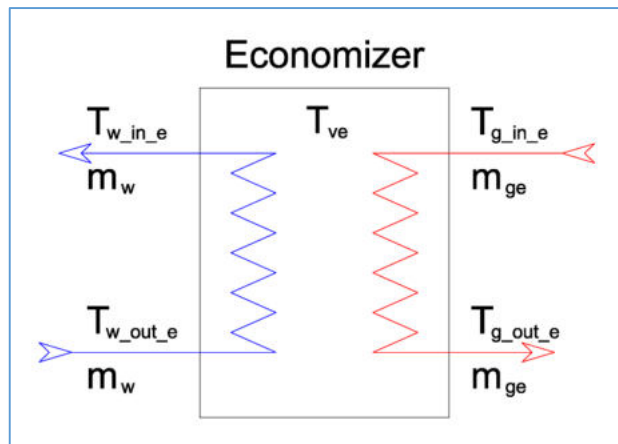




Figura 64. Esquema del economizador del MED. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019a).

La eficiencia del sistema crece con la temperatura del primer efecto, pero el límite superior queda establecido a los 70 °C, ya que esta es la temperatura a la cual comienzan a cristalizar las sales y con ello los problemas por incrustaciones. Como ejercicio teórico se ha probado el sistema con diferentes temperaturas. X_{bre} debe mantenerse por debajo del límite de solubilidad para evitar la deposición. Para las sales más comunes, este límite es inferior al 50%. Por lo tanto, las soluciones con un mayor valor no se consideran. En los casos segundo, tercero y sexto se encuentra que la concentración teórica de cálculo alcanza el 100%. Esto significa que toda el agua se ha evaporado y sólo hay sal. Esta situación conceptual es imposible desde el punto de vista operativo puesto que no se puede eliminar la sal en una corriente cuya fracción líquida desaparece.

La tabla 34 muestra los diferentes resultados en función del número de efectos y la temperatura en la primera celda.

Tabla 34. Rendimientos con diferentes valores de parámetros. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019a).

Case	Effects	T_1 °C	m_{dis} kg/s	m_{pre} kg/s	x_{pre} %	h	P_{vacuum} kW
1	9	70	5.3771	0.2585	10.80	0.954	24
2	10	70	5.6356	0.0000	100	1.000	25
3	10	80	5.6356	0.0000	100	1.000	70
4	10	90	5.4160	0.2196	12.39	0.961	145
5	10	100	5.1444	0.4912	5.47	0.913	260
6	11	100	5.6088	0.0268	100	0.995	246

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 137 de 231

Puesto que la destiladora trabaja con calor recuperado del horno, su ciclo de operación ha de coincidir. Esto es, régimen continuo de 24 horas. Hay algunos precedentes que coinciden conceptualmente con la interacción agua-energía (Dubreuil et al., 2013). El horno proporciona calor permanentemente a la destiladora produciendo una corriente de agua destilada que se reutilizará para el lavado de moldes. El único residuo hídrico resultante sería la fracción de agua contenida dentro de la salmuera residual que debe añadirse como renovación para mantener la cantidad circulante.

4.3 PUBLICACION 3: “Reduction of Water and Energy Consumption in Sanitary-Ware industry by Absorption Machine Operated with Recovered Heat”



Esta publicación aborda la segunda medida de mejora de eficiencia específica para un proceso en el que se combinan los residuos térmicos e hídricos para la reducción de consumos. En este caso, el objetivo de la acción es el residuo hídrico por vía gaseosa en forma de vapor. Como parte integrante del proceso de la cerámica, sea de eliminar toda el agua contenida por evaporación. En general las emisiones son rechazadas a la atmósfera y aunque no constituyen un contaminante directamente, es cierto que propician un mayor consumo de agua que si fuesen recicladas. Éste es el núcleo central de la publicación en el que el tratamiento de agua vuelve a ser energizado con calor residual del horno a través de una máquina de enfriamiento por absorción. Este artículo continúa la línea secuencial establecida en la sección 3.3.

4.3.1 Modelo de sistema de condensación

La cantidad de agua contenida en las emisiones se ha visto en el modelo de secaderos y centrales de acondicionamiento de aire en las secciones 3.4.2.6 y 3.4.2.7. Como se mencionaba en dicho apartado, Las condiciones son diferentes cuando el proceso se realiza con un combustible o con un aire recuperado y de ahí las diferencias de cantidad de agua contenida.

También se ha explicado la estacionalidad de los resultados debido a la variación de las condiciones ambientales. La base de datos con la que se ha trabajado tiene una frecuencia de 30 minutos durante un año completo, por lo que la tabla de resultados abarca 17.520 registros.

Los valores individuales obtenidos para las diferentes variables pueden resumirse o promediarse durante todo el año a efectos de comparar los resultados en una fábrica convencional frente a una optimizada. En esta publicación se ha considerado el valor agregado anual, es decir las energías y masas requeridas o resultantes a lo largo del año completo. Una vez establecida la energía necesaria para evaporar el agua y la cantidad de agua en el vapor, es factible una comparación del consumo entre la fábrica convencional y la optimizada. Para una

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 138 de 231

fábrica convencional, la sólo se necesita energía térmica para horno, secaderos y centrales de aire. A cambio, toda el agua de la evaporación es desperdiciada. En la optimizada, en cambio, se recupera esta agua a cambio de cierto aumento de consumo energético por parte de la máquina de absorción en el caso de que el calor residual no alcance a satisfacer toda la demanda.

En el caso de la fábrica convencional, el consumo energético será:

$$Q_{NG\ total} = Q_{NG\ kiln} + Q_{NG\ WD} + Q_{NG\ HVU} \dots\dots\dots (83)$$

Donde:

$Q_{NG\ total}$ =Consumo total de gas natural [kW].

$Q_{NG\ kiln}$ =Consumo de gas natural del horno [kW].

$Q_{NG\ WD}$ =Consumo de gas natural del secadero [kW].

$Q_{NG\ HVU}$ =Consumo de gas natural de la central de calefacción [kW].

Cuando en una fábrica convencional se pretende recuperar el agua evaporada por condensación, habría que añadir el coste energético de la máquina de absorción:

$$Q_{NG\ total} = Q_{NG\ kiln} + Q_{NG\ WD} + Q_{NG\ HVU} + Q_{NG\ abs} \dots\dots\dots (84)$$

Donde:

$Q_{NG\ ABS}$ =Consumo de gas natural de la máquina de absorción [kW].

En el caso de que el aire caliente recuperado del horno fuere insuficiente para satisfacer toda la demanda térmica, aparece un término de déficit energético que ha de ser cubierto con gas natural:

$$Q_{NG\ total} = Q_{NG\ kiln} + Q_{NG\ lack} \dots\dots\dots (85)$$

Donde:

$Q_{NG\ lack}$ =Consumo de gas natural para cubrir el déficit del calor recuperado [kW].


Por otro lado, la cantidad de agua que se puede obtener a partir del vapor será:

$$m_{condensable} = m_{evaporate_dryer} + m_{evaporate_HVU} + m_{cond\ NG/RH} + m_{cond\ fresh\ air} \dots\dots\dots (86)$$

Donde:

$m_{condensable}$ = Total de agua condensable[kg/s].

$m_{evaporate_dryer}$ = Agua contenida en las emisiones del secadero [kg/s].

 Escuela Internacional de Doctorado EIDUNED	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 139 de 231

$m_{evaporate_HVU}$ = Agua contenida en las emisiones de la central de calefacción [kg/s].

$m_{cond\ NG/RH}$ = Humedad contenida en el aire de combustión o en el calor recuperado, según e caso [kg/s].

$m_{cond\ fresh\ air}$ = Humedad contenida en el aire de renovación para el secado [kg/s].

Los resultados relevantes son los relacionados con el consumo de gas natural y agua. Alternativamente, para una fábrica optimizada, la cantidad de calor recuperado sustituye al consumo de gas. Otra variable a considerar como fundamental es la cantidad de aire fresco requerido para evaporar el agua que depende la humedad ambiental en cada momento. Los periodos de cálculo se han realizado para la frecuencia de datos climatológicos disponibles de 30 minutos. En consecuencia, los resultados son variables tanto diariamente como estacionalmente. Para los cálculos de magnitudes, se han considerado los agregados anuales, pero a efectos gráficos, se han representado los días promedios.

La figura 65 muestra la demanda de gas natural en las cuatro configuraciones consideradas.

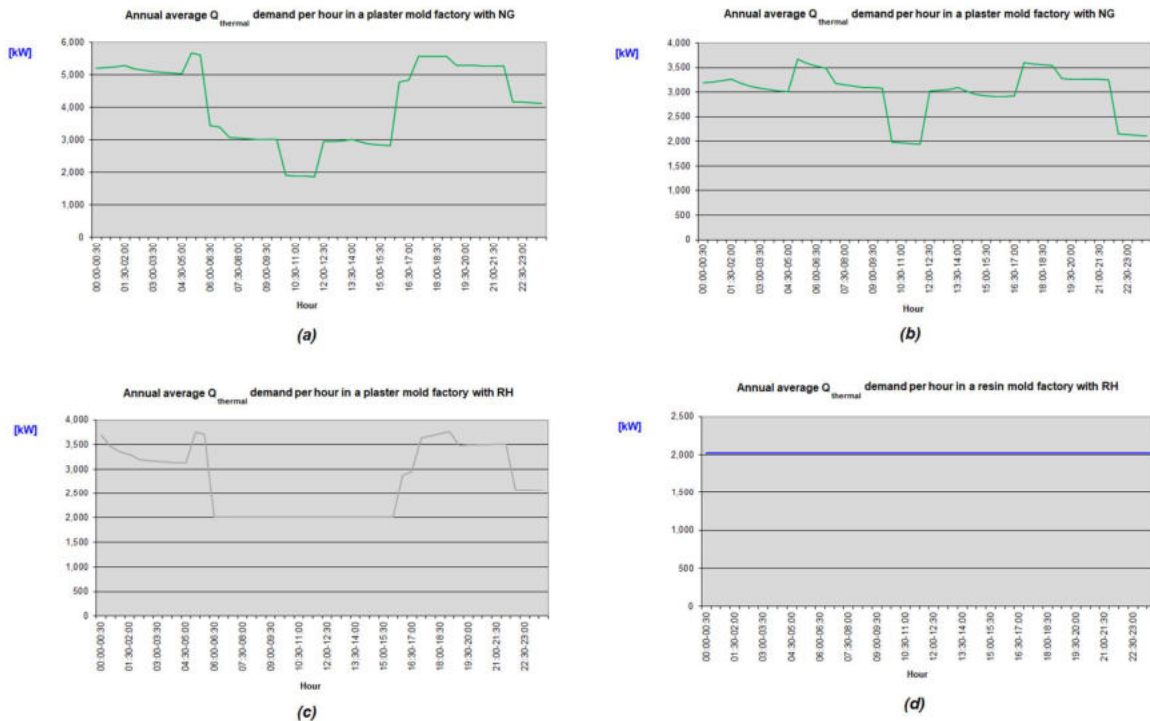




Figura 65. Cantidad de gas consumida según la configuración de fábrica. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).

En la gráfica se puede apreciar que la energía térmica requerida es mayor en una fábrica de moldes de yeso que en las de resina. Esto es debido a la necesidad de evaporar la gran cantidad de agua que queda en los moldes

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 140 de 231

después de la extracción de la pieza cerámica. Se puede apreciar como en una fábrica optimizada, siempre se reduce la cantidad de gas natural necesaria. Las curvas son adecuadas para mostrar la variabilidad de consumo a lo largo del día. Esta forma es muy similar a lo largo del año con la única diferencia de la variabilidad climatológica que sólo afecta a la central de acondicionamiento de aire. Es particularmente interesante resaltar el hecho de que, en una fábrica optimizada de moldes de resina, la curva de demanda de gas natural es completamente plana. Esto significa que sólo se necesita gas para el horno y que tanto el secadero como el acondicionamiento de aire son suministrados con calor residual del mismo.

La figura 66 muestra la cantidad de agua condensable en las cuatro configuraciones consideradas.

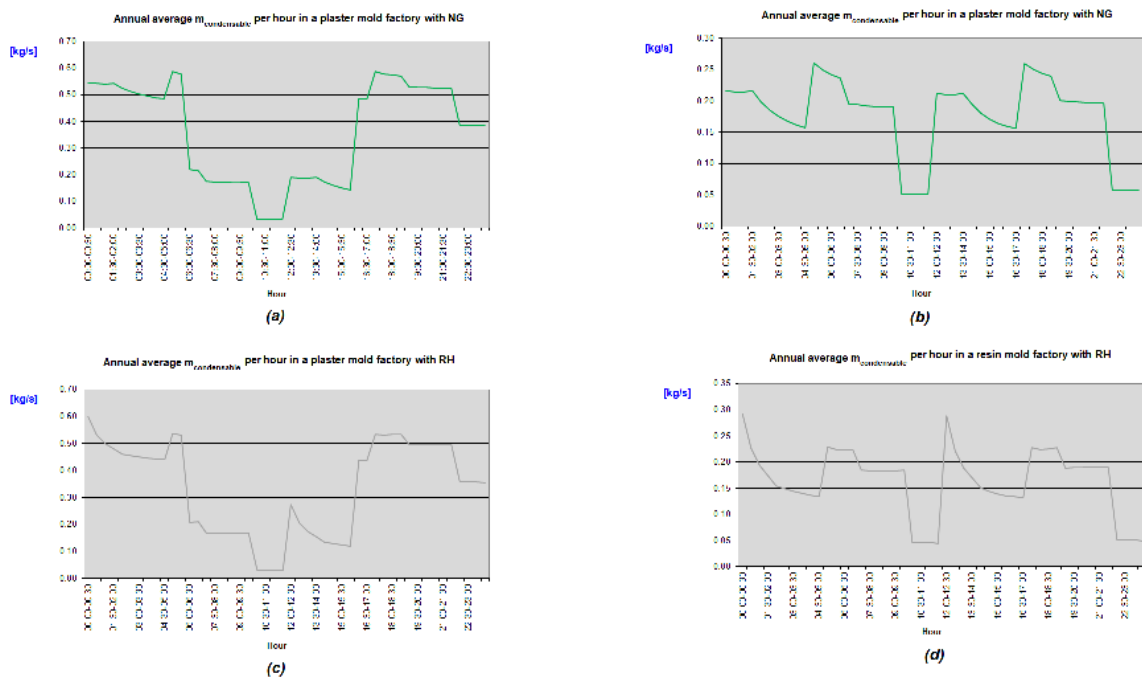


Figura 66. Cantidad de agua condensable según la configuración de fábrica. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).

Respecto a la cantidad de agua presente en las emisiones puede resaltarse que ésta es mayor en una fábrica de yeso debido al agua evaporada procedente de los moldes. La variabilidad a lo largo del día se asemeja bastante a la del secadero debido a la gran aportación del mismo a la humedad de emisiones. Este efecto es más acusado en el caso de la fábrica de resina por una mayor relevancia del agua evaporada en secadero frente a la de central de calefacción

Cuando se analizan los resultados anuales de cada tipo de fábrica se obtiene la gráfica de la figura 67.

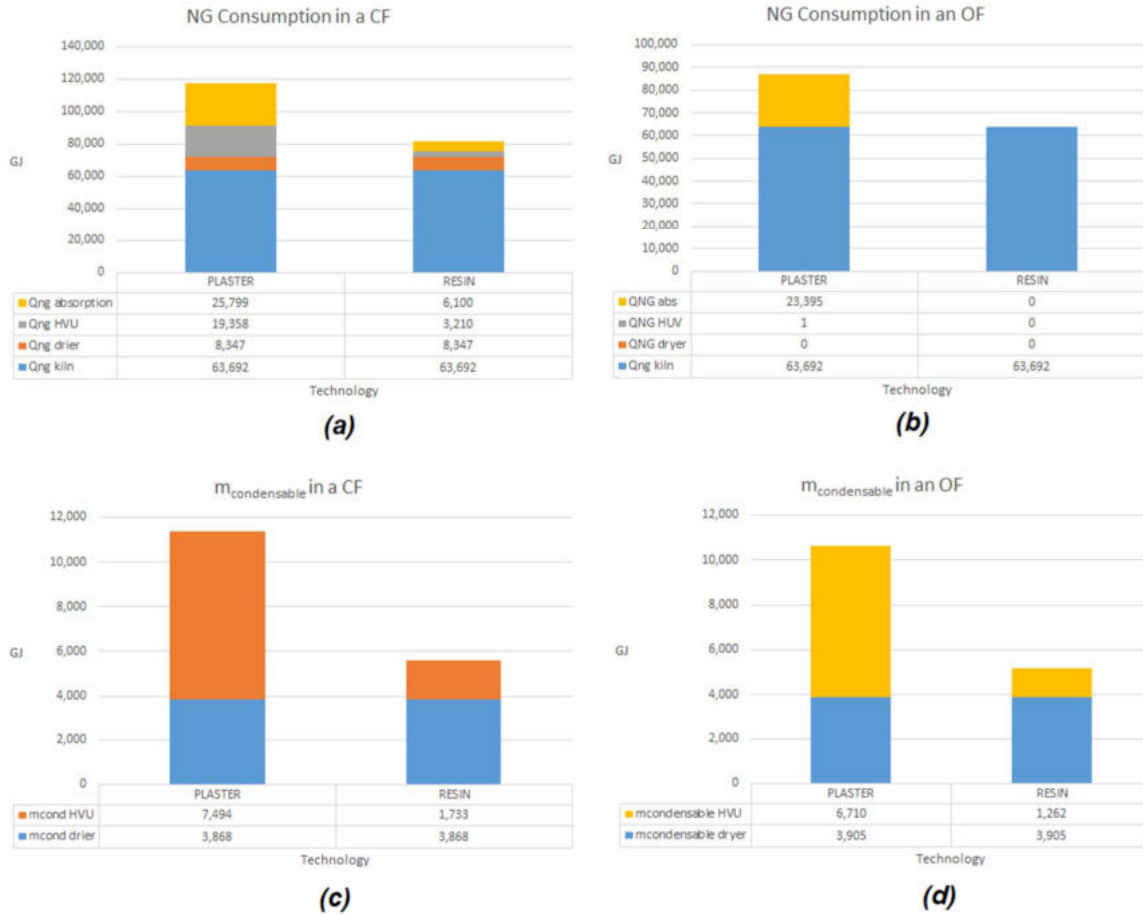




Figura 67. Resultados para las diferentes configuraciones de planta. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).

En estos gráficos vuelven a manifestarse las tendencias vistas en los gráficos previos. La energía y la cantidad de agua son mayores en una fábrica de yeso. Se percibe el ahorro de energía en el caso de la fábrica optimizada. También se ve como en la fábrica optimizada, tanto el secadero como la central se operan exclusivamente con el calor recuperado. Incluso se ve como, particularmente para la de moldes de resina, la máquina de absorción también trabaja con calor residual completamente.

La cantidad de agua que corresponde a la evaporada de la barbotina se calcula con la producción anual y la cantidad de agua contenida en la barbotina correspondiente a cada pieza según se describió en la tabla 14.

$$m_{process\ water} = 5 \cdot 10^5 \frac{pieces}{year} \cdot 9.62 \cdot \frac{kg_{water}}{piece} = 4.810 \frac{t_{water}}{year} \dots\dots\dots (87)$$

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 142 de 231

Esta es la cantidad teórica de agua que se puede ahorrar como materia prima del producto. El resto de agua condensada procede de los aires varios y de la combustión. Es agua excedente recuperada que puede servir a otros fines como lavados en la fábrica, reposición de lavado para moldes, duchas en vestuarios, etc.

4.3.2 Análisis de sensibilidad

Se ha llevado a cabo un análisis de sensibilidad para determinar el grado de dependencia de las variables de salida principales: potencia térmica requerida y agua condensable en función de las entradas climáticas más influyentes. En esta investigación se han considerado la temperatura ambiente y la radiación solar. El procedimiento de cálculo anual se ha repetido con diferentes escenarios de temperatura o radiación. Los escenarios se han simulado cambiando la temperatura o la radiación reales disponibles del año de referencia con un coeficiente de escala más un coeficiente aleatorio de ruido de acuerdo con:

$$X_{sim} = X_{real} \cdot \left(f_{scale} + \frac{f_{random}^{-0,5}}{10} \right) \dots\dots\dots (88)$$

Donde:

X_{sim} = Variable climatológica escalada con factor de aleatoriedad [kg/kg].

X_{real} = Variable climatológica real [kg/kg].

f_{scale} =factor de escala entre 0,7 y 1,3 para simular climas más frescos o cálidos.

f_{random} =Número aleatorio entre 0 y 1. Afectado de -0,5 y dividido por 10 se obtiene un efecto de ruido aleatorio de +/- 0,05 en beneficio de una aleatoriedad no proporcional de variación climática.

La figura 68 muestra las curvas de análisis de sensibilidad de Q_{ng} y $m_{condensable}$ para $T_{ambient}$. En (a) y (b) se puede ver cómo Q_{ng} presenta un mínimo de aproximadamente 0,85 T debido a la necesidad de aire fresco. Cuando la temperatura es baja, hay un mayor requerimiento de calor para calentar el aire. Cuando la temperatura aumenta, la potencia requerida disminuye, pero el agua contenida en el aire fresco aumenta porque la humedad relativa no ha cambiado. Este factor se vuelve más importante a medida que la temperatura aumenta hasta el punto en que los requisitos de absorción superan al resto de demandas, lo que hace que aumente la potencia global.

Cuando la temperatura del aire fresco supera la temperatura requerida en el sistema, no es posible alcanzar el punto de ajuste. Por otro lado, cuando la humedad relativa es alta, sucede que el aire fresco requerido está casi saturado. La combinación de ambos efectos produce que haya que circular una gran cantidad de aire de renovación. Por lo tanto, la energía y los condensados comienzan a aumentar de forma drástica.

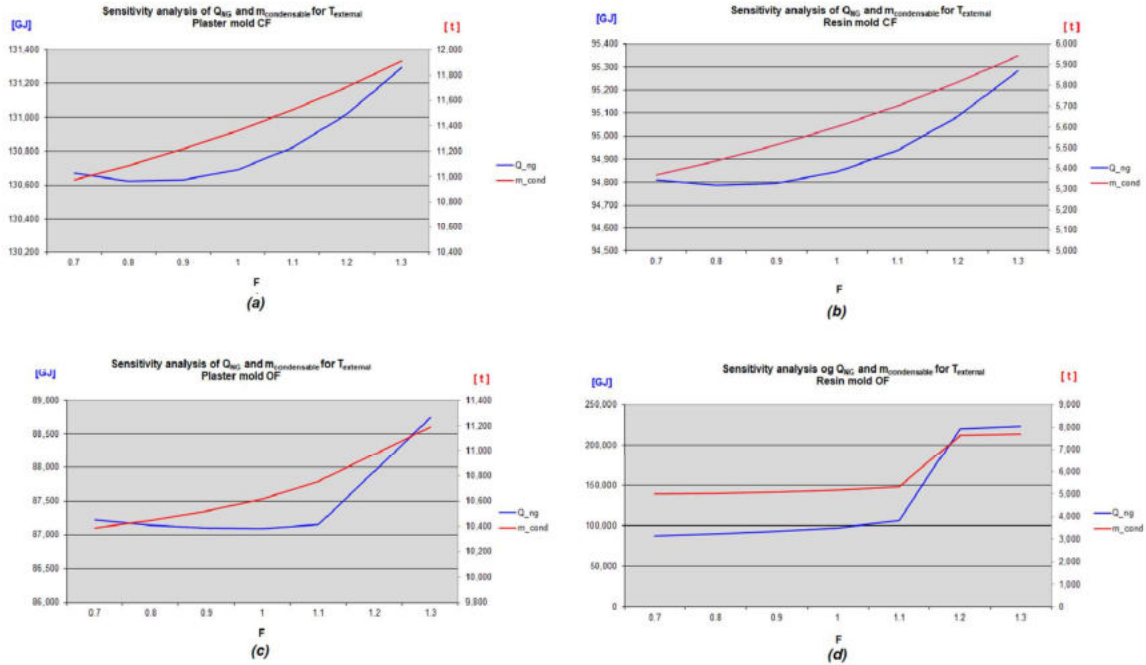


Figura 68. Análisis de sensibilidad de Q_{ng} y $m_{condensable}$ frente a $T_{ambient}$. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).

La figura 69 muestra las curvas de análisis de sensibilidad de Q_{ng} y $m_{condensable}$ para I_{solar} . A medida que la radiación solar aumenta, se requiere menos energía térmica para mantener la temperatura de consigna. Esto significa que entra menos agua al sistema del aire de combustión o de recuperación. Por lo tanto, ambas curvas disminuyen en ambos tipos de fábrica. En la fábrica de resina, el calor recuperado es suficiente para todas las demandas térmicas diferentes del horno, por lo que la Q_{ng} se ve plana en la gráfica de la fábrica optimizada. Solo se requiere gas natural para el horno.

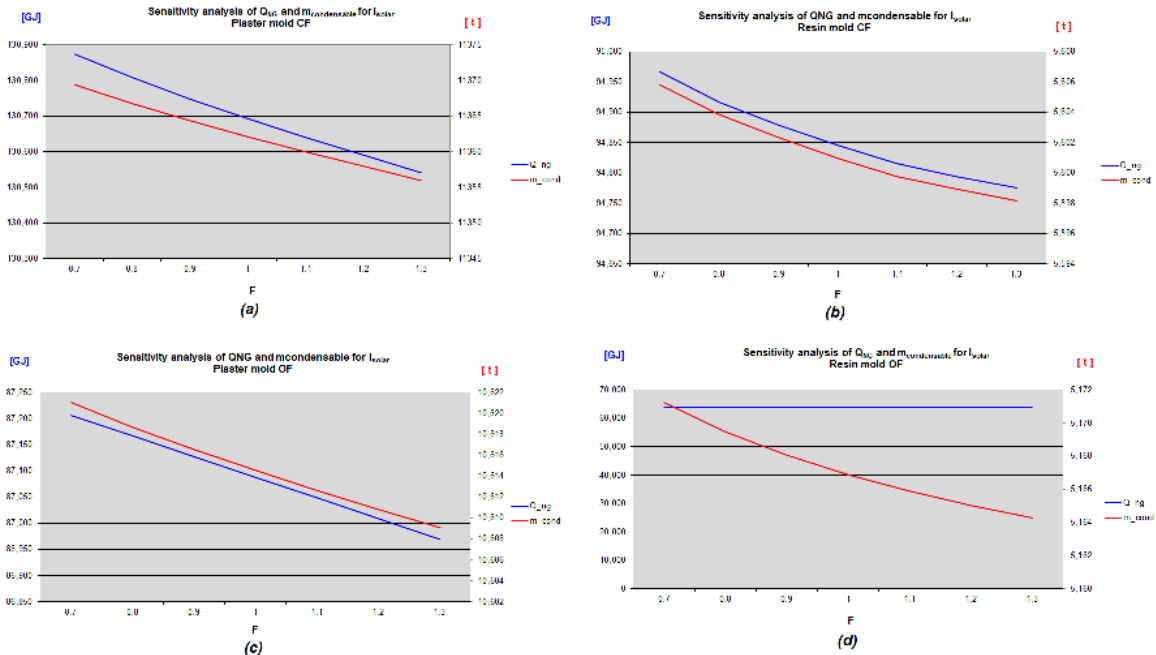


Figura 69. Análisis de sensibilidad de Q_{NG} y $m_{condensable}$ frente a I_{solar} . Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021)

4.4 PUBLICACION 4: “Sanitary-ware factories: heat recovery strategies to optimize energy and water consumption”


Esta publicación afronta la producción de energía eléctrica localmente con dos fines fundamentales:

- Evitar las pérdidas derivadas del transporte eléctrico en las líneas de distribución
- Aprovechar las pérdidas térmicas de la producción eléctrica “*in situ*” para fines productivos. En este caso, en concreto a través de una destiladora multi-efecto.

Se consigue de esta forma reducir el consumo de energía primaria equivalente al resultante en el caso de que el suministro eléctrico fuera satisfecho de modo convencional desde la red pública.

En las publicaciones 1 a 3, se establecieron y cuantificaron los consumos y los posibles ahorros en las instalaciones. De acuerdo con el esquema de la investigación planteado en la sección 3.3, esta publicación plantea la mejora de la eficiencia de una forma secuencial de la siguiente forma:

- Se parte de una fábrica convencional en la que no hay recuperación de ningún tipo.
- En una primera fase se aborda la recuperación de agua efluente del lavado de los moldes de resina. Este paso supone un aumento de consumo térmico derivado del calor necesario para destilar el agua tras el lavado.

 Escuela Internacional de Doctorado EIDUNED	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 145 de 231

- En el tercer paso se aborda la eficiencia energética mediante la inclusión de una planta de cogeneración que mejorará la eficiencia eléctrica y la térmica con su calor residual. El tamaño de la planta se toma de acuerdo con la media de potencia eléctrica consumida durante el año natural.
- En el cuarto paso, el tamaño de la planta se realiza buscando la potencia de turbina que minimiza el consumo de energía primaria.
- En un quinto paso se analiza la optimización económica frente a la energética del paso anterior.

Las configuraciones de las fábricas antes de optimizar y después se presentan en las figuras siguientes.

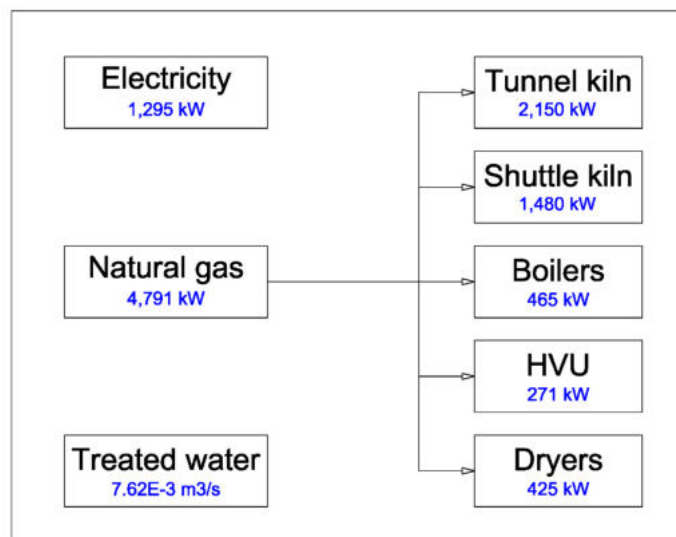


Figura 70. Esquema fábrica convencional sin medidas de ahorro. Fuente: (Cuviella-Suárez, Carlos et al., 2019).

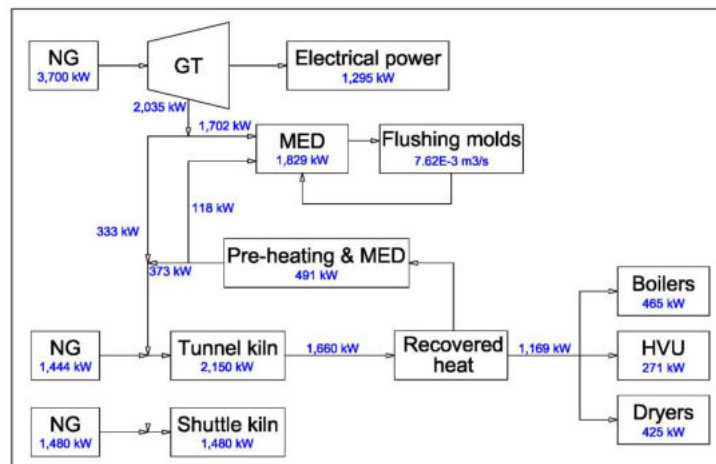




Figura 71. Esquema fábrica optimizada con recuperación de agua y de calor. Fuente: (Cuviella-Suárez, Carlos et al., 2019)..

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 146 de 231

4.4.1 Metodología de cálculo

A continuación, se describe el modo de calcular la energía o el coste en cada caso analizado.

4.4.1.1 Energía primaria para una fábrica convencional

La energía primaria se calcula bajo la siguiente hipótesis.

- Se contabiliza la energía térmica de cada consumidor y la energía eléctrica se divide por la eficiencia de la red eléctrica (se supone igual a 0,35 (Cuviella-Suárez et al., 2012)).
- Se supone que el consumo de gas es energía primaria.

Una vez cuantificadas las potencias correspondientes a cada consumidor, el coste anual y la energía primaria se calculan de la siguiente forma:

Para la fábrica convencional, el coste se calcula multiplicando cada consumo por el precio correspondiente en cada hora, y sumando todos los periodos para el conjunto del año:

$$C_{cf} = \sum_{i=1}^{8,760} (p_{ng} \cdot (Q_{tunnel\ kiln} + Q_{shuttle\ kiln} + Q_{boilers} + Q_{HVU's} + Q_{dryers}) + p_{elec} \cdot N_{elec_i}) \dots\dots (89)$$

Cuando se prueban diferentes escenarios de precios, las energías consumidas no cambian, pero el coste varía según la variación de precios. Sin embargo, la energía primaria es independiente del escenario económico.

$$W_{cf} = \sum_{i=1}^{8,760} \left(Q_{tunnel\ kiln} + Q_{shuttle\ kiln} + Q_{boilers} + Q_{HVU's} + Q_{dryers} + \frac{N_{elec_i}}{0.35} \right) \dots\dots\dots (90)$$

Se han probado diferentes escenarios de precios con los siguientes resultados en la tabla 35 y figura 72.

Tabla 35. Coste y consumo anuales en una fábrica convencional para diferentes escenarios de precios de energía.

Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).

C _{cf} (€/año)	P _{elec} (€/kWh)					W _{cf} kWh/año
	0.08	0.09	0.1	0.11	0.12	
0.023	1,873,095	1,986,557	2,100,019	2,213,481	2,326,943	
0.024	1,915,069	2,028,531	2,141,993	2,255,455	2,368,917	
P_{NG} (€/kWh)	0.025	1,957,043	2,070,505	2,183,967	2,297,429	2,410,890
	0.026	1,999,017	2,112,479	2,225,941	2,339,403	2,452,864
	0.027	2,040,991	2,154,453	2,267,915	2,381,377	2,494,838

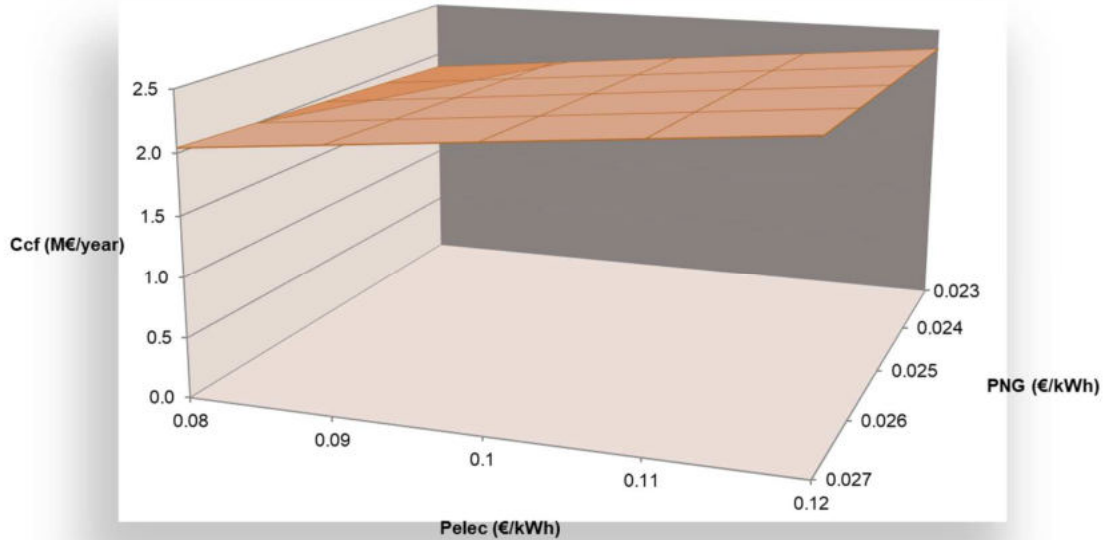


Figura 72. Coste del consumo anual en una fábrica convencional en función de los precios de la energía. Fuente: Elaboración propia).

4.4.1.2 Medidas de ahorro de agua

Cuando se plantea la necesidad de reutilizar el agua aparece una nueva necesidad térmica para destilar el agua con un rendimiento que en el estado del arte de la tecnología actual está en torno a $2,4 \cdot 10^5$ kJ/m³ (Artin Hatzikioseyan and Pavlina Kousi, 2003).

$$\dot{m}_w \cdot \eta_{MED} = Q_{MED} \dots \dots \dots (91)$$

Con esta nueva potencia térmica, las ecuaciones (92) y (93) sirven para calcular el aumento de la energía térmica derivada del ahorro de agua:



$$C_{o1f} = \sum_{i=1}^{8,760} (p_{ng} \cdot (Q_{tunnel\ kiln} + Q_{shuttle\ kiln} + Q_{boilers} + Q_{HVU's} + Q_{dryers} + Q_{MED}) + p_{elec} \cdot N_{elec_i}) \dots \dots \dots (92)$$

$$W_{o1f} = \sum_{i=1}^{8,760} (Q_{tunnel\ kiln} + Q_{shuttle\ kiln} + Q_{boilers} + Q_{HVU's} + Q_{dryers} + Q_{MED} + \frac{N_{elec_i}}{0.35}) \dots \dots \dots (93)$$

La potencia térmica requerida para le MED se muestra en la tabla 36.

Tabla 36. Necesidades para la destilación MED. Fuente:(Cuviella-Suárez, Carlos et al., 2019).

HEAT TO DISTILLATE FLUSHING WATER		
$\dot{m}_{distillate}$	7.62E-03	m ³ /s
h_{MED}	2.40E+05	kJ/m ³
Q_{MED}	1.829	kW

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 148 de 231

Los diferentes escenarios de precios se han probado con los siguientes resultados en la tabla 37 y figura 73.

Tabla 37. Coste anual y energía primaria en una fábrica optimizada con un MED para ahorrar agua para diferentes escenarios de precios de energía. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).

C_{oif} (€/año)	P_{elec} (€/kWh)					W_{oif} kWh/año
	0.08	0.09	0.1	0.11	0.12	
P_{NG} (€/kWh)	0.023	2,241,553	2,355,015	2,468,477	2,581,938	2,695,400
	0.024	2,299,547	2,413,009	2,526,470	2,639,932	2,753,394
	0.025	2,357,541	2,471,002	2,584,464	2,697,926	2,811,388
	0.026	2,415,534	2,528,996	2,642,458	2,755,920	2,869,382
	0.027	2,473,528	2,586,990	2,700,452	2,813,914	2,927,376

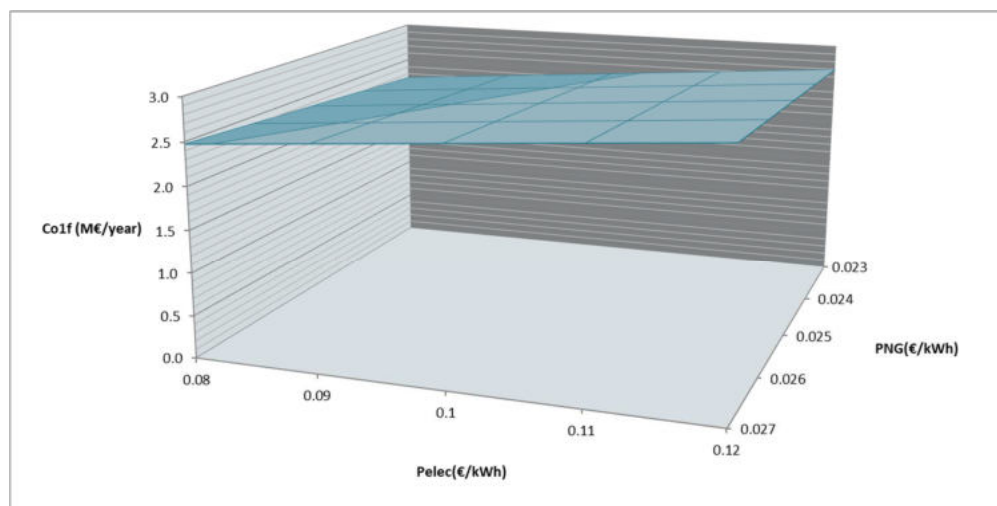


Figura 73. Coste del consumo anual en función de los precios de la energía para una fábrica con recuperación de agua, pero no de energía. Fuente: Elaboración propia).



4.4.1.3 Cálculo del calor necesario para pre-calentar el aire de combustión del horno

En la tabla 38 se muestran los gases de escape y el flujo de aire a través de las chimeneas del horno (Cuviella-Suárez et al., 2018).

Tabla 38. Condiciones termodinámicas del calor recuperado. Fuente:(Cuviella-Suárez, Carlos et al., 2019).

WASTED HEAT TO BE RECOVERED			
Stack	kW _{thermal}	kg/s	°C
Exhausting	460	1.51	327
Rapid cooling	373	0.45	868
Slow cooling	827	3.11	296

La entrada de aire para el horno es de 1,16 kg/s (Cuviella-Suárez et al., 2018).

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 149 de 231

Cuanto mayor sea la temperatura de precalentamiento, mayor será el ahorro de combustible, por lo que se escogen los flujos más calientes para este fin. Por lo tanto, el calor para calentar el aire de entrada se proporciona desde la chimenea de enfriamiento rápido (0,45 kg/s a 868 °C) y el resto (1,16-0,45 kg/s) se precalienta mediante la chimenea de humos de la GT a 500 °C. El cálculo de la temperatura más alta posible para precalentar se realiza mediante el balance de energía.

$$\dot{m}_a \cdot h_{a_p} = \dot{m}_{rc} \cdot h_{rc} + (\dot{m}_a - \dot{m}_{rc}) \cdot h_{GT_{ex}} \dots \dots \dots (94)$$

La potencia térmica consumida para precalentar el aire de combustión está dada por:

$$Q_{a_p} = \dot{m}_a \cdot h_{a_p} \dots \dots \dots (95)$$

A fin de optimizar el consumo del horno se busca la mayor temperatura posible de pre-calentamiento. La configuración más caliente de las mezclas de aire de la alimentación de aire al horno se muestra en la tabla 39.

Tabla 39. Características termodinámicas del aire pre-calentado. Fuente:(Cuviella-Suárez, Carlos et al., 2019).

PRE HEATING POWER FOR KILN INLET-AIR			
Air mixture	kW _t	kg/s	°C
From kiln rapid cooling	373	0.45	868
From GT exhausting	333	0.71	500
Pre-heated air	706	1.16	643

4.4.1.4 Energía primaria para una fábrica optimizada con potencia de cogeneración igual al promedio de potencia eléctrica anual

Suponiendo la configuración de la figura 71, el coste y la energía primaria se calculan como sigue:

- El grado de carga de la GT se calcula con la curva de demanda de energía eléctrica y la potencia de la turbina eléctrica de gas.

$$Load = \frac{N_{elec}}{N_{GT}} \dots \dots \dots (96)$$

- Cuando el grado de carga es inferior a 1, la turbina se sale del diseño y su eficiencia disminuye, pero es capaz de suministrar el 100% de la demanda eléctrica. Cuando la carga es mayor que 1, la turbina trabaja en el punto de diseño, pero la electricidad por encima de la potencia de la turbina debe comprarse en la red eléctrica.
- La eficiencia real de la turbina bajo operación sin carga se obtiene de la figura 34.
- Para los períodos donde $N_{GT} < N_{elec}$, la diferencia debe ser suministrada desde la red:

$$N_{network} = N_{elec} - N_{GT} \dots \dots \dots (97)$$

- De aquí se puede extraer el cálculo del gas consumido por la turbina:

$$G_{GT} = \frac{N_{GT}}{\eta_{GT}} \dots\dots\dots (98)$$

- Con el “heat-ratio” de la turbina se puede calcular el flujo de gases en el escape de la misma

$$Q_{GT} = heat_{ratio} \cdot N_{GT} \dots\dots\dots (99)$$

- Las potencias que consumen los hornos y la planta de destilación se obtienen de figura 71:

$$Q_{tunnel} = 1.444 \text{ kW} \dots\dots\dots (100)$$

$$Q_{shuttle} = 1.480 \text{ kW} \dots\dots\dots (101)$$

$$IF Q_{GT} \geq (1.829 - 118 + 333) THEN Q_{MED} = 0 \dots\dots\dots (102)$$

$$IF Q_{GT} < (1.829 - 118 + 333) THEN Q_{MED} = (1.829 - 118 + 333) - Q_{GT} \dots\dots\dots (103)$$

- Con todas las potencias ya calculadas, se pueden obtener la energía y el coste del ciclo anual

$$C_{o2f} = \sum_{i=1}^{8,760} (p_{ng} \cdot (G_{GT} + Q_{tunnel \ kiln} + Q_{shuttle \ kiln} + Q_{MED}) + p_{elec} \cdot N_{network_i}) \dots\dots\dots (104)$$

$$W_{o2f} = \sum_{i=1}^{8,760} \left(G_{GT} + Q_{tunnel \ kiln} + Q_{shuttle \ kiln} + Q_{MED} + \frac{N_{network_i}}{0,35} \right) \dots\dots\dots (105)$$

La potencia eléctrica promedio del año es 1.295 kW. En primera aproximación, se toma esta potencia como la de diseño de GT dentro de diferentes escenarios de precios con los siguientes resultados que se muestran en la tabla 40.

Tabla 40. Coste anual y energía primaria en una fábrica mejorada con un tamaño de GT como potencia eléctrica promedio durante un año para diferentes escenarios de precios de la energía. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2021).

C _{o2f} (€/año)	P _{elec} (€/kWh)					W _{o2f} kWh/año
	0.08	0.09	0.1	0.11	0.12	
P _{NG} (€/kWh)	0.023	1,488,513	1,500,987	1,513,462	1,525,937	1,538,411
	0.024	1,548,892	1,561,366	1,573,841	1,586,316	1,598,790
	0.025	1,609,271	1,621,745	1,634,220	1,646,694	1,659,169
	0.026	1,669,649	1,682,124	1,694,599	1,707,073	1,719,548
	0.027	1,730,028	1,742,503	1,754,978	1,767,452	1,779,927

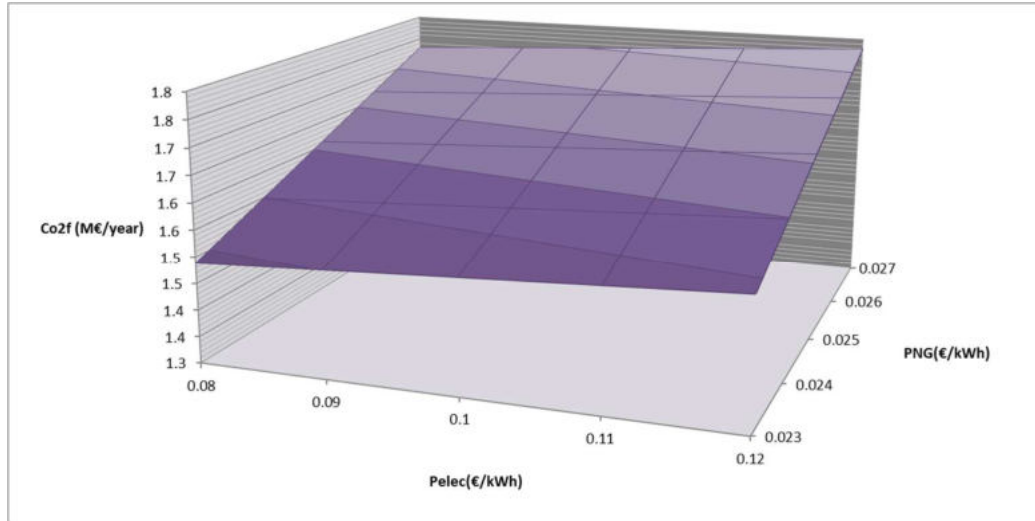


Figura 74. Coste del consumo anual en función de los precios de la energía para una fábrica con recuperación de agua, y cogeneración diseñada para la potencia media anual. Fuente: Elaboración propia).

4.4.1.5 Optimización de la energía en función de la potencia de la cogeneración

En la sección anterior, se consideró que la potencia de la turbina se dimensionaba con el promedio eléctrico del año. Sin embargo, la potencia consumida es variable, por lo que el dimensionamiento de la potencia eléctrica de la cogeneración debe ajustarse alternativamente para obtener la energía o el coste más bajos. El proceso para optimizar la energía implica un procedimiento iterativo mediante un método de gradiente descendente. En un primer paso se intentó definir la energía anual como una función polinómica de grado 5 de la potencia de la cogeneración mediante un ajuste por mínimos cuadrados de la forma:

$$W_{03f} = a_0 + a_1 \cdot N_{GT} + a_2 \cdot N_{GT}^2 + a_3 \cdot N_{GT}^3 + a_4 \cdot N_{GT}^4 + a_5 \cdot N_{GT}^5 \dots\dots\dots (106)$$



La derivada de esta función igualada a cero debe dar la potencia que minimiza la energía consumida:

$$\frac{dW_{03f}}{dN_{GT}} = 0 = a_1 + 2 \cdot a_2 \cdot N_{GT} + 3 \cdot a_3 \cdot N_{GT}^2 + 4 \cdot a_4 \cdot N_{GT}^3 + 5 \cdot a_5 \cdot N_{GT}^4 \dots\dots\dots (107)$$

El ajuste no resultó lo suficientemente preciso por lo que se optó finalmente por un método de gradiente descendente (GRG).

$$C_{03f} = \sum_{i=1}^{8,760} (p_{ng} \cdot (G_{GT} + Q_{tunnel\ kiln} + Q_{shuttle\ kiln}) + p_{elec} \cdot N_{network_i}) \dots\dots\dots (108)$$

$$W_{03f} = \sum_{i=1}^{8,760} \left(G_{GT} + Q_{tunnel\ kiln} + Q_{shuttle\ kiln} + \frac{N_{network_i}}{0,35} \right) \dots\dots\dots (109)$$

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 152 de 231

La Sección 3.5 describe la forma de encontrar la mejor configuración técnica considerando exclusivamente la energía primaria consumida. La tabla 41 muestra los valores correlacionados reales y LSA para energía primaria versus potencia GT, así como los errores correspondientes.

Tabla 41. Energía primaria en función de la potencia GT (valores reales y correlacionados. Fuente:(Cuviella-Suárez, Carlos et al., 2019)).

N_{GT} kW	W_{opr} kWh	LSA kWh	error p.u.
700	74,968,465	75,103,199	0.0018
800	72,519,158	72,382,421	-0.0019
900	70,214,336	70,066,388	-0.0021
1,000	68,118,017	68,101,956	-0.0002
1,100	66,348,951	66,449,387	0.0015
1,200	64,951,103	65,079,821	0.0020
1,300	63,897,086	63,972,752	0.0012
1,400	63,104,342	63,113,507	0.0001
1,500	62,546,445	62,490,717	-0.0009
1,600	62,203,965	62,093,793	-0.0018
1,700	61,987,185	61,910,405	-0.0012
1,800	61,920,403	61,923,956	0.0001
1,900	62,063,440	62,111,054	0.0008
2,000	62,402,689	62,438,992	0.0006
2,100	62,836,708	62,863,222	0.0004
2,200	63,303,829	63,324,831	0.0003
2,300	63,788,286	63,748,013	-0.0006
Minimum=	61,920,403	61,910,405	-0.0021
Maximum=	74,968,465	75,103,199	0.0020
Average=	65,127,906	65,127,907	0.0000

La tabla 42 proporciona los coeficientes calculados para la función polinómica

Tabla 42. Coeficientes de la función polinómica por un LSA. Fuente:(Cuviella-Suárez, Carlos et al., 2019)

Polynomial 5th	Coefficients
a0=	1.1393E+08
a1=	-9.4609E+04
a2=	8.0618E+01
a3=	-4.4781E-02
a4=	1.5052E-05
a5=	-2.1037E-09

La figura 75 representa la función correlacionada versus la real. Como se puede apreciar, la aproximación es satisfactoria:

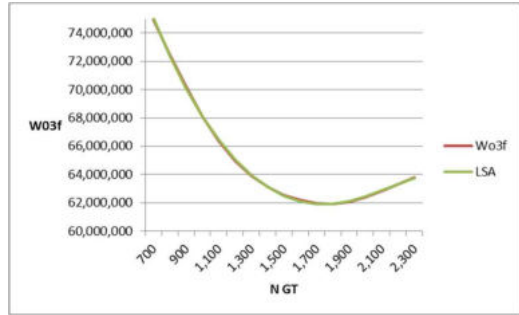


Figura 75. Energía primaria como función de la potencia de la TG $N_{elec\ GT}$. Fuente: (Cuviella-Suárez, Carlos et al., 2019).

La tabla 43 muestra la diferencia entre la energía primaria calculada por los métodos LSA o GRG.

Tabla 43. Energía primaria para diferentes potencias GT (real y LSA). Fuente:(Cuviella-Suárez, Carlos et al., 2019)

MINIMUM OF THE PRIMARY ENERGY		
	by LSA	by GRG
$N_{elec\ GT\ optimal} =$	1,742	1,785
$DW_{of}/DN_{elec\ GT} =$	1.00E-03	
$W_{of} =$	61,893,275	61,917,783
	kWh/year	

4.4.1.6 Optimización económica en función de los precios de la energía

El proceso de optimización desde el punto de vista económico depende de dos variables (precios de gas y eléctrico), por lo que no es posible llevarlo a cabo por mínimos cuadrados. El proceso se resuelve mediante un algoritmo de minimización por gradiente descendente, donde la función bivalente es establecida mediante una red neuronal de acuerdo con el esquema de la figura 76.

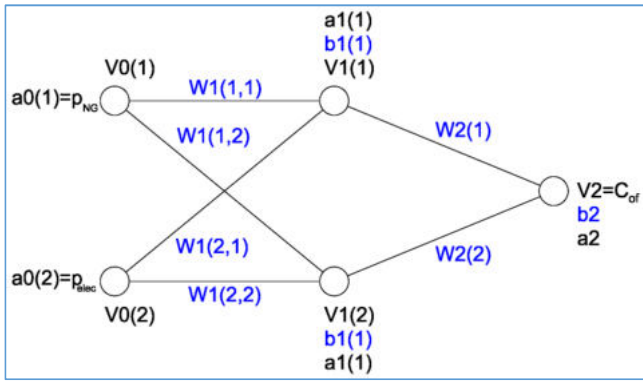




Figura 76. Esquema de red neuronal para la correlación $C_{of} = f(P_{NG}, P_{elec})$. Fuente: (Cuviella-Suárez, Carlos et al., 2019).

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 154 de 231

La función de correlación es entonces:

$$V0(i) = \ln(a(i)) \quad (i = 1,2) \dots\dots\dots (110)$$

$$a1(j) = b1(j) + \sum_{i=1}^2 a0(i,j) \cdot W1(i,j) \quad (j = 1,2) \dots\dots\dots (111)$$

$$V1(j) = e^{a1(j)} \quad (j = 1,2) \dots\dots\dots (112)$$

$$C_{o4f} = a2 = V2 = b2 + \sum_{j=1}^2 V1(j) \cdot W2(j) = b2 + \sum_{j=1}^2 W2(j) \cdot e^{b1(j)} \cdot \prod_{i=1}^2 a0(i)^{W1(i,j)} \dots\dots\dots (113)$$

La ANN está definida por los parámetros en azul: b1 (j), W1 (i, j), b2 y W2 (j) que deben aproximarse iterativamente a la solución óptima donde el error cuadrático entre la salida correlacionada y la real es menor que la tolerancia fijada para detener el proceso de iteración. Una vez encontrado el conjunto de parámetros óptimos, la ANN dará como salida el coste resultante para las dos variables independientes de entrada; los precios de las respectivas energías.

El proceso se lleva a cabo con un conjunto de valores de entrenamiento conocidos, "N", donde hay dos entradas definidas para los precios de la energía y la salida correspondiente real para el coste total anual.

$$C_{o4f_n} = f(p_{NG_n}, p_{elec_n}) \dots\dots\dots (114)$$

Este conjunto de valores de entrenamiento se obtiene resolviendo "N" veces el sistema de ecuaciones en la sección 4.4.1.4 para diferentes combinaciones de precios de gas natural y electricidad. Debido a la complejidad del sistema, no se puede resolver directamente. Cada valor de entrenamiento debe calcularse mediante otro proceso iterativo, suponiendo una potencia inicial óptima para los precios indicados y luego ajustándolo a la mejor solución, minimizando el coste mediante un método de gradiente descendente.

A continuación, la red neuronal se entrena con este conjunto de valores para minimizar el error de diferencia entre el coste correlacionado y el real.

Finalmente, la función correlacionada es:

$$C_{o4f} = b2 + W2(1) \cdot e^{b1(1)} \cdot P_{NG}^{W1(1,1)} \cdot P_{elec}^{W1(2,1)} + W2(2) \cdot e^{b1(2)} \cdot P_{NG}^{W1(1,2)} \cdot P_{elec}^{W1(2,2)} \dots\dots\dots (115)$$

La energía se calcula para cada potencia de la cogeneración optimizada como se describe en la sección 4.4.1.4.

Se han probado diferentes escenarios de precios con los resultados mostrados en la tabla 44. El consumo de energía primaria varía a medida que se cambia la potencia de la turbina buscando la optimización de coste. La tabla muestra estos valores que han sido utilizados para definir la red neuronal.



 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 155 de 231

Tabla 44. Coste anual y energía primaria en una fábrica mejorada con un GT de tamaño óptimo para minimizar el coste por el período de un año para diferentes escenarios de precios de energía. Fuente:(Cuviella-Suárez, Carlos et al., 2019).



P_{NG} €/kWh	P_{elec} €/kWh	N_{elec GT} kW	C_{o4f} €/year	W_{o4f} kWh/year
0.023	0.08	1,815	1,425,785	61,927,797
0.023	0.09	1,831	1,426,710	61,940,908
0.023	0.1	1,844	1,427,509	61,955,793
0.023	0.11	1,855	1,428,201	61,971,244
0.023	0.12	1,863	1,428,818	61,984,277
0.024	0.08	1,808	1,487,407	61,923,791
0.024	0.09	1,826	1,488,398	61,936,271
0.024	0.1	1,838	1,489,243	61,948,486
0.024	0.11	1,850	1,489,978	61,963,905
0.024	0.12	1,859	1,490,627	61,977,557
0.025	0.08	1,802	1,549,010	61,921,138
0.025	0.09	1,820	1,550,066	61,931,439
0.025	0.1	1,833	1,550,956	61,942,958
0.025	0.11	1,845	1,551,736	61,957,088
0.025	0.12	1,855	1,552,421	61,971,244
0.026	0.08	1,795	1,610,592	61,918,964
0.026	0.09	1,813	1,611,712	61,926,717
0.026	0.1	1,829	1,612,653	61,938,972
0.026	0.11	1,840	1,613,476	61,950,836
0.026	0.12	1,851	1,614,200	61,965,329
0.027	0.08	1,790	1,672,154	61,918,090
0.027	0.09	1,808	1,673,332	61,923,792
0.027	0.1	1,824	1,674,334	61,934,581
0.027	0.11	1,835	1,675,198	61,945,107
0.027	0.12	1,846	1,675,961	61,958,407

El conjunto resultante de valores de entrenamiento para el ANN se toma de la tabla 40. Con estos valores, los coeficientes obtenidos después del entrenamiento del ANN se muestran en la tabla 45.

Tabla 45. Coeficientes de la ANN que representa la función bivalente $Co4f=f(PNG, Pelec)$. Fuente:(Cuviella-Suárez, Carlos et al., 2019)

ANN Coefficients	
W1(1,1)=	0
W1(1,2)=	0
W1(2,1)=	0
W1(2,2)=	0.0708528
W2(1)=	1.4165484
W2(2)=	4.1788884
b1(1)=	0
b1(2)=	6.2417886
b2=	6.926885

El error máximo con solo 25 puntos de entrenamiento resulta 0,75%.

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 156 de 231

4.5 PUBLICACION 5: “Exergoeconomics in the sanitary-ware industry to reduce energy and water consumptions”

En concordancia con la secuencia de la investigación presentada en la sección 3.3, esta publicación representa el resumen de resultados en lo que a eficiencia energética se refiere. Se realiza un modelo matemático, tanto de la fábrica convencional como de la optimizada, componente a componente, como ya se ha establecido en las publicaciones anteriores. No obstante, en esta publicación se enfatiza el carácter energético introduciendo el análisis exergético avanzado. Mientras que en un análisis convencional sólo se identifican los balances de energía y de exergía, en un avanzado se mide la mejora potencial en cada uno de los elementos mediante la inclusión del término “*exergía destruida evitable*”. En todo proceso termodinámico aparece inherentemente una determinada cantidad de exergía destruida durante el balance del proceso. Esto se debe a la degradación de la calidad de la energía durante el proceso entre las entradas y las salidas. El valor de esta energía degradada marca la diferencia entre el rendimiento energético y el exergético. En determinadas condiciones de proceso, la exergía destruida puede reducirse mediante mejoras tecnológicas. En cualquier caso, nunca puede eliminarse completamente en los procesos reales, dado que los flujos energéticos de salida siempre tendrán una exergía menor que los de entrada debido a las irreversibilidades inherentes a la termodinámica. Estas dos fracciones de la exergía destruida representan la “*evitable*” y la “*no evitable*” y un análisis avanzado permite cuantificar la mejora potencial de eficiencia e identificar los puntos donde más se puede reducir la exergía destruida con menores costes de inversión.

4.5.1 Análisis exergoeconómico avanzado

El conjunto de fórmulas matemáticas ha sido tomado de (Caglayan and Caliskan, 2018) por la similitud entre los procesos descritos. Se ha aplicado este procedimiento en esta tesis, ampliando los límites del proceso que involucra a toda la fábrica y transfiriéndolo a la industria de cerámica sanitaria.

Balance de masa



$$\sum_{in} \dot{m}_{in} = \sum_{out} \dot{m}_{out} \dots\dots\dots (116)$$

Balance de energías

$$Q_{in} + \sum_{in} \dot{m}_{in} \cdot h_{in} = W_{out} + \sum_{out} \dot{m}_{out} \cdot h_{out} \dots\dots\dots (117)$$

Balance de exergías

$$Ex_f + \sum_{in} Ex_{in} = Ex_p + \sum_{out} Ex_{out} + Ex_l + Ex_d \dots\dots\dots (118)$$

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 157 de 231

$$Ex_{gas} = \dot{m} \left\{ \left[q_p (T - T_0) - T_0 \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right] + RT_0 \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) \right\} \dots\dots\dots (119)$$

$$Ex_{liquid,solid} = \dot{m} \left\{ \left[q_p (T - T_0) - T_0 \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right] - v_m (P - P_0) \right\} \dots\dots\dots (120)$$

$$Ex_{NG}^{ch} = LHV_{NG} \cdot \left[1,033 + 0,0169 \frac{n_H}{n_C} - \frac{0,0698}{n_C} \right] \dots\dots\dots (121)$$

Eficiencias

$$\eta_{en} = \frac{\sum_{useful,output} E_i}{\sum_{input} E_i} \dots\dots\dots (122)$$

$$\eta_{ex} = \frac{\sum_{useful,output} Ex_i}{\sum_{input} Ex_i} \dots\dots\dots (123)$$

Análisis exergoeconómico

$$C_{in} = C_{out} \dots\dots\dots (124)$$

$$C_{in} = \sum_{in} c_{in} \cdot Ex_{in} \dots\dots\dots (125)$$

$$C_{out} = \sum_{out} c_{out} \cdot Ex_{out} \dots\dots\dots (126)$$

$$y_d = \frac{Ex_d}{Ex_{ft}} \dots\dots\dots (127)$$



$$r = \frac{c_p - c_f}{c_f} \dots\dots\dots (128)$$

Este conjunto de fórmulas se aplica a cada componente de ambas configuraciones de fábrica para resolver su modelo exergético. Posteriormente, se integran todos los modelos de equipos en el conjunto de procesos de cada una de las dos fábricas tipo. Las hipótesis referentes a datos y parámetros de cada subproceso provienen de catálogos comerciales y literatura técnica sobre la maquinaria requerida para cualquiera de ellos. (*Ceramic Technology Sanitary-ware*, 2010) y (“Reference Document on Best Available Techniques in the Ceramic Manufacturing Industry,” 2007) son las principales fuentes de estos datos.

La resolución del sistema de componentes en cada caso se resume en la tabla 46.

Tabla 46. Resultados del análisis exergético. Fuente: (Elaboración propia)

RESULTADOS EXERGOECONOMICOS				
CONJUNTO FABRICA		CF	OF	
E _{NG}	kW	7.934	7.699	Energía gas natural
E _f	kW	10.529	9.641	Energía entradas
E _p	kW	3.114	4.879	Energía productos
η _{en}	p.u.	0,2957	0,5060	Rendimiento energético
EX _{NG}	kW	8.179	7.936	Exergía gas natural

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 158 de 231

Ex_{out}	kW	3.659	3.688	Exergía salidas
Ex_f	kW	8.240	7.998	Exergía entradas
Ex_p	kW	1.433	2.387	Exergía productos
Ex_d	kW	4.581	4.309	Exergía destruida
η_{ex}	p.u.	0,1739	0,2985	Rendimiento exergético
y_d	p.u.	0,5560	0,5388	Coefficiente destrucción de exergía
Ex_{d_av}	kW	470	246	Exergía destruida evitable
C_f	kW	8.179	7.936	Coste exergético entradas
C_p	kW	8.179	7.936	Coste exergético productos
c_f	m.u./kW	1,0000	1,0000	Coste específico entradas
c_p	m.u./kW	5,7089	3,3240	Coste específico productos
r	p.u.	4,7089	2,3240	Coste diferencial exergía relativo

La figura 77 resume los flujos resultantes

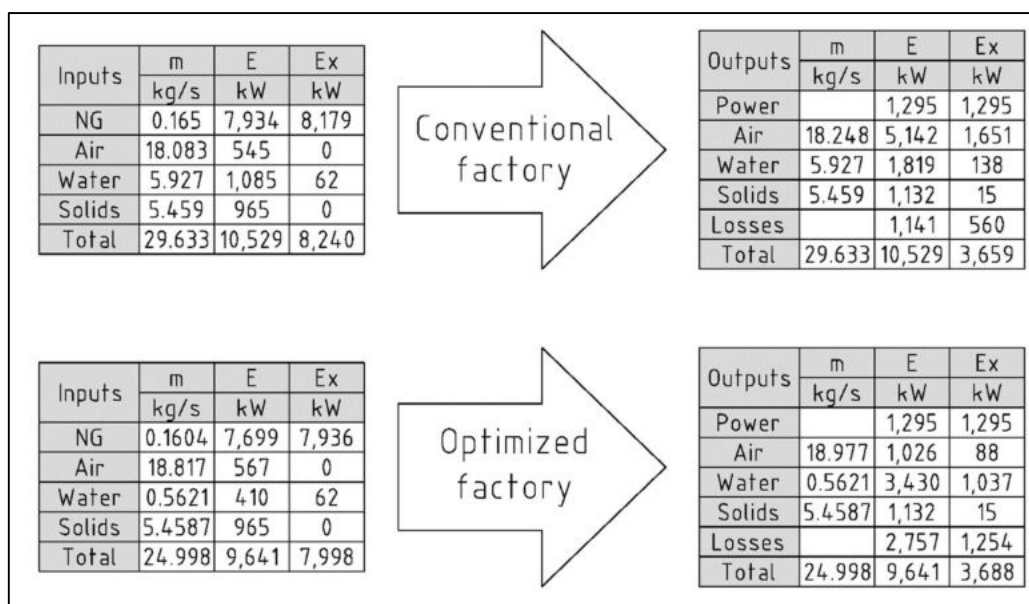






Figura 77. Resumen de entradas-salidas en las fábricas convencional y optimizada. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2019b).

La exergías de entrada y salida en la fábrica convencional son respectivamente de 8.240 kW y 3.659 kW, por lo tanto, la exergía total destruida es de 4.581 kW. La exergía de gas natural es de 8.179 kW. El caudal total de agua es de 5,93 kg/s incluyendo el lavado de los moldes, así como la humedad del aire, el agua contenida en las piezas verdes y el agua inyectada en los secaderos.

En la fábrica optimizada, aunque existen algunas pequeñas diferencias, las salidas de algunos subprocesos se utilizan para entradas en otros subprocesos. Por lo tanto, las entradas y salidas de fábrica en general no son iguales a la suma de ellas para cada subproceso. En este caso, la exergía global de entrada es 7.998 kW y la de

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 159 de 231

salida 3.688 kW. La exergía destruida es de 4.310 kW. La exergía de gas natural es de 7.936 kW. El agua de lavado también aparece en esta tabla, pero en este caso ya se obtiene caliente tras el proceso de destilación, por lo que resultan innecesarias las calderas de gas. La cantidad total de agua desionizada se ha reducido, excepto la fracción eliminada con la salmuera residual excedente de la destiladora.

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 160 de 231

5 TRABAJOS PUBLICADOS

Las publicaciones que integran la presente tesis cumplen con los requisitos establecidos en el Documento aprobado por el Comité de Dirección de la Escuela Internacional de Doctorado de la Universidad Nacional de Educación a Distancia (EIDUNED), en su reunión de 16 de enero de 2017, y por la Comisión de Investigación y Doctorado de la UNED, con fecha 21 de febrero de 2017 para ser considerados válidas en la tesis doctoral presentada por compendio de publicaciones. Dichos requisitos son los siguientes:

1. El compendio de publicaciones estará formado por un mínimo de 3 artículos. Al menos dos de ellos deben estar publicados y el tercero aceptado. En este caso, los tres artículos han sido publicados con anterioridad a la presentación de esta tesis.
2. Los artículos han de ser publicados en revistas de índices de impacto en los dos primeros cuartiles de la relación de revistas del ámbito de la especialidad del Programa en el que está inscrita dicha tesis y referenciadas en la última relación publicada por el *Journal Citation Reports* (SCI y/o SSCI) y de *SCOPUS*. Los tres artículos han sido publicados en una revista con índice de impacto en los dos primeros cuartiles. Se ha seleccionado la revista “*Journal of Cleaner Production*” por su alto factor de impacto y la evolución creciente durante varios años consecutivos según se muestra en el ANEXO I donde la editorial de la revista (Elsevier) notifica al Director de la tesis el aumento de factor de impacto igual a 10.9 en 2019 a 12.9 en 2020.
3. Todos los artículos deben estar publicados con fecha posterior a la primera matrícula de tutela académica en la EIDUNED. En este caso la primera matrícula se produjo en el curso académico 2014/2015 (octubre 2014) y los artículos se han publicado entre octubre de 2018 y enero 2021.
4. El doctorando o doctoranda debe ser primer firmante o segundo, en este último caso, el primero debe ser el director o directora de la tesis. En todas las publicaciones que integran la tesis doctoral, el doctorando es primer firmante.

A continuación, en las tabla 47, tabla 48 y tabla 49 se muestran todos los datos correspondientes a cada una de las publicaciones incluidas en esta tesis por compendio de artículos.



 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 161 de 231

Tabla 47. Datos del primer trabajo científico publicado: "Management tool to optimize energy and water consumption in the sanitary-ware industry"

Datos sobre la publicación del trabajo científico		
Título de la publicación	<i>Management tool to optimize energy and water consumption in the sanitary-ware industry</i>	
Autores	Carlos Cuviella-Suárez Antonio Colmenar-Santos David Borge-Díez África López-Rey	
Afiliación de los autores	Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control, UNED	
Revista	<i>Journal of Cleaner Production</i>	
Estado de publicación	Publicado. Volume 197, Part 1, 1 October 2018, Pages 280-296	
D.O.I.	https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.195	
Índices de impacto <i>Journal Citation Reports</i> de la revista en el año 2019 (último índice publicado)		
<i>Engineering, environmental</i>	8/53	85
<i>Environmental sciences</i>	19/265	93
<i>Green & Sustainable science & technology</i>	7/49	86
Índice de impacto	7,246	
Quartil	Q1	Q1
Índices de impacto <i>Scopus</i> de la revista en el año 2019 (último índice publicado)		
<i>CiteScore 2019 All publication types</i>	10.9	
<i>SCImago Journal Rank (SJR) 2019</i>	1,89	
<i>Source Normalized Impact per Paper (SNIP) 2019</i>	2,394	
<i>CiteScore rank and Percentile per category</i>	CiteScore rank	Percentile
<i>Engineering: Industrial & manufacturing engineering</i>	9/340	97
<i>Environmental sciences: General environmental sciences</i>	4/210	98
<i>Energy: Renewable Energy, Sustainability and the Environment</i>	18/179	90

En los anexos; ANEXO II:I, ANEXO III: y ANEXO IV: se incluyen los siguientes documentos relativos a la publicación del primer trabajo científico:

- ANEXO II: Copia de la publicación.
- ANEXO III: Certificado de la publicación.
- ANEXO IV: Informes relativos con los índices de impacto.



Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 162 de 231

Tabla 48. Datos del segundo trabajo científico publicado: "Heat recovery in sanitary-ware industry applied to water and energy saving by multi-effect distillation"

Datos sobre la publicación del trabajo científico		
Título de la publicación	<i>Heat recovery in sanitary-ware industry applied to water and energy saving by multi-effect distillation</i>	
Autores	Carlos Cuviella-Suárez Antonio Colmenar-Santos David Borge-Díez África López-Rey	
Afiliación de los autores	Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control, UNED	
Revista	<i>Journal of Cleaner Production</i>	
Estado de publicación	Publicado. Volume 213, 10 March 2019, Pages 1322-1336	
D.O.I.	https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.269	
Índices de impacto <i>Journal Citation Reports</i> de la revista en el año 2019 (último índice publicado)		
<i>Engineering, environmental</i>	8/53	85
<i>Environmental sciences</i>	19/265	93
<i>Green & Sustainable science & technology</i>	7/49	86
Índice de impacto	7,246	
Quartil	Q1	Q1
Índices de impacto <i>Scopus</i> de la revista en el año 2019 (último índice publicado)		
<i>CiteScore 2019 All publication types</i>	10,9	
<i>SCImago Journal Rank (SJR) 2019</i>	1,89	
<i>Source Normalized Impact per Paper (SNIP) 2019</i>	2,394	
<i>CiteScore rank and Percentile per category</i>	CiteScore rank	Percentile
<i>Engineering: Industrial & manufacturing engineering</i>	9/340	97
<i>Environmental sciences: General environmental sciences</i>	4/210	98
<i>Energy: Renewable Energy, Sustainability and the Environment</i>	18/179	90

En el ANEXO V., ANEXO VI: y ANEXO VII: se incluyen los siguientes documentos relativos a la publicación del segundo trabajo científico:

- ANEXO V: Copia de la publicación.
- ANEXO VI: Certificado de la publicación.
- ANEXO VII: Informes relativos con los índices de impacto.





 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 163 de 231

Tabla 49. Datos del tercer trabajo científico publicado: “*Reduction of Water and Energy Consumption in Sanitary-Ware industry by Absorption Machine Operated with Recovered Heat*”

Datos sobre la publicación del trabajo científico		
Título de la publicación	<i>Reduction of Water and Energy Consumption in Sanitary-Ware industry by Absorption Machine Operated with Recovered Heat</i>	
Autores	Carlos Cuviella-Suárez Antonio Colmenar-Santos David Borge-Díez África López-Rey	
Afiliación de los autores	Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control, UNED	
Revista	<i>Journal of Cleaner Production</i>	
Estado de publicación	Publicado. Volume 213, 10 March 2019, Pages 1322-1336	
D.O.I.	https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.269	
Índices de impacto <i>Journal Citation Reports</i> de la revista en el año 2019 (último índice publicado)		
<i>Engineering, environmental</i>	8/53	85
<i>Environmental sciences</i>	19/265	93
<i>Green & Sustainable science & technology</i>	7/49	86
Índice de impacto	7,246	
Quartil	Q1	Q1
Índices de impacto <i>Scopus</i> de la revista en el año 2019 (último índice publicado)		
<i>CiteScore 2019 All publication types</i>	10,9	
<i>SCImago Journal Rank (SJR) 2019</i>	1,89	
<i>Source Normalized Impact per Paper (SNIP) 2019</i>	2,394	
<i>CiteScore rank and Percentile per category</i>	CiteScore rank	Percentile
<i>Engineering: Industrial & manufacturing engineering</i>	9/340	97
<i>Environmental sciences: General environmental sciences</i>	4/210	98
<i>Energy: Renewable Energy, Sustainability and the Environment</i>	18/179	90

En el ANEXO VIII:, ANEXO IX:, ANEXO X: y ANEXO XI: se incluyen los siguientes documentos relativos a la publicación del tercer trabajo científico:

- ANEXO VIII: Copia de la publicación.
- ANEXO IX: Certificado de la publicación.
- ANEXO X: Informes relativos con los índices de impacto.
- ANEXO XI: Invitación como ponente en congreso “International Conference on Environmental Science and Green Energy” en París



Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 164 de 231

5.1 **Publicación 1: “*Management tool to optimize energy and water consumption in the sanitary-ware industry*”**

5.1.1 **Resumen de la publicación en español**

Con los años, la industria de la cerámica ha sido ampliamente estudiada. Sin embargo, se ha prestado poca atención al área particular de la fabricación de artículos sanitarios cerámicos que, como cualquier proceso cerámico, representa un consumo intenso de energía y agua. El objetivo de este artículo es analizar y cuantificar cómo y dónde se consumen los recursos por medio de la modelización de todo el proceso con el resultado de un mapa de consumos distribuido por todas las secciones del proceso general. Una vez localizados y cuantificados los puntos de consumo, se establece un mapa global de flujos energéticos individuales modelando termodinámicamente cada subproceso relevante a través de un balance de masa y energía. El artículo se centra en el análisis de este mapa y los flujos residuales a fin de establecer posibles vínculos entre procesos cuyos residuos puedan ser fuente para otros con menor exigencia de calidad, especialmente desde el punto de vista térmico a fin de minimizar los recursos primarios. Los resultados muestran que casi un tercio de la energía y las emisiones se pueden ahorrar. Por otro lado, también se constata que en la producción con tecnología de moldes de resina es posible la reducción de la mitad del agua. Como primer artículo, su función prioritaria es establecer una identificación de esta industria en cuanto a recursos como base de partida para el posterior estudio de todas las posibilidades de reducciones que se puedan acometer. Además, establece la referencia con la que se han de comparar todas las soluciones optimizadas permitiendo una medida de mejora en cada caso, no arbitraria y apropiadamente parametrizada.

El artículo comienza con la explicación detallada del proceso cerámico de artículos sanitarios desde un punto de vista de consumo de energía y de agua y analiza la intensidad del sector local y globalmente. Mediante la modelización termodinámica de los procesos y su forma de operación realiza un cálculo analítico de los consumos requeridos, tanto de agua como de energía y de las emisiones correspondientes. Con el agregado de todos los modelos de los subprocesos, establece el modelo global de la fábrica en lo que a recursos se refiere. Este modelo se realiza para las dos tecnologías de producción más extendidas en la actualidad; una con moldes de yeso y otra con moldes de resina. Con el modelo generalizado, se obtiene el grado de consumo segregado por sección de producción o sub-proceso para una fábrica genérica cuyo escalado local y global permite la estimación de ahorros a nivel mundial.

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 165 de 231



5.1.2 Resumen de la publicación en inglés

Over the years, the ceramic industry has been extensively studied. However, little attention has been paid to the particular area of ceramic sanitary ware manufacturing which, like any ceramic process, represents great energy and water degrees of consumption. This article aims to analyze and quantify how and where resources are consumed by modeling the entire process with the result of a consumption map distributed through manufacturing sections of the main production line. By means of a thermodynamic model of each relevant sub-process through a balance of mass and energy, a map of individual energy flows is established once the consumption locations are identified. The article focuses on the analysis of this map and the residual thermal flows in order to establish possible links between processes whose residues can be a source for others with lower quality demand, especially from the thermal point of view, in order to minimize primary resources. The results show that almost a third of the total energy and emissions can be saved. On the other hand, it is also verified that in for the resin mold technology it is feasible to reduce a half of the total amount of required water. The priority of this article is to establish an identification of this industry in terms of resources as a starting point for the subsequent study of all the possibilities of reductions that may be undertaken. Furthermore, it establishes the standard reference against which all optimized solutions must be compared, allowing for a measure of improvement in each case, not arbitrary and appropriately parameterized.

The article begins with the detailed explanation of the ceramic process of sanitary ware from a point of view of energy and water consumption and analyzes the intensity of the sector, local and globally. By means of the thermodynamic modeling of the processes and their way of operation, it has been carried out an analytical calculation of the required consumption, both water and energy, and the corresponding emissions. Assembling all models together, it can be stated the global model of the factory in terms of resources. This model is achieved for the two most widespread production technologies nowadays based either, in plaster or resin molds. This model provides segregated consumptions per production section or sub-process. The result can be local or globally scaled in order to assess the impact of this industry worldwide.

5.1.3 Conclusiones de la publicación

Como se ha repetido a lo largo de la tesis, la industria de la cerámica es un consumidor intensivo de materias primas, energía y agua. No existe hasta la fecha un estudio claro y descriptivo de la forma en que los recursos son utilizados. Este artículo tiene como objetivo añadir al estado actual del arte, en lo que a recursos para la producción de sanitario cerámico se refiere, el conocimiento, cuantificación e

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 166 de 231



identificación de la gestión de los recursos necesarios. Por lo tanto, la contribución principal es proporcionar la herramienta para llevar a cabo este objetivo permitiendo optimizar el diseño y la explotación de las plantas. Los resultados más notables de este estudio son:

- Se pone de manifiesto la relevancia de los procesos de producción de sanitarios cerámicos respecto a la sostenibilidad del sector al identificar, cuantificar y determinar dónde y cómo se consumen los recursos.
- El modelo de cada sub-proceso analizado en conjunto dentro del proceso global permite distinguir la relevancia de cada uno dentro del sistema y su impacto en las potenciales mejoras de eficiencia.
- Mediante los resultados de consumo de recursos se han identificado y cuantificado los puntos clave para mejorar la eficiencia de los recursos con el fin de sugerir posibles estrategias dedicadas a su reducción.
- En el artículo se pone de manifiesto cómo el consumo y el medio ambiente están estrechamente vinculados.
- Un tercio de la energía total de producción podría ahorrarse directamente simplemente recuperando el calor residual del horno y utilizándolo en otros procesos térmicos substituyendo el uso de combustible. Utilizando el mapa de consumo, se ha permitido identificar puntos de ahorro y, cuantificar la tasa de posibles reducciones de energía y agua.

Las limitaciones y los estudios futuros pueden mencionarse como:

- El artículo sólo se ha centrado en calcular los consumos convencionales y se han sugerido formas de reducción, pero no se ha calculado el resultado de posibles soluciones para comparar efectivamente la diferencia.
- Esta investigación no ha entrado en detalles sobre cómo evaluar la reducción de recursos. Otros futuros trabajos deberían considerar y caracterizar las posibles soluciones.
- Esta investigación sugiere la posibilidad de obtener ahorros económicos por medio de la mejora de eficiencia. Un análisis termo económico podría ser desarrollado para cuantificarlos.
- Se ha sugerido en el artículo la posibilidad de ahorrar agua con el calor residual. Este punto es particularmente interesante para llevar a cabo una investigación referente a la eficiencia hídrica del sistema.

Como resumen cabe decir que, conocida la forma, cantidad y localización de los consumos de la planta, pueden sugerirse diferentes soluciones de mejora de la eficiencia basadas en la recuperación de calor.



 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 167 de 231

Por lo tanto, la aplicabilidad de esta herramienta al modelar procesos de fabricación es un medio adecuado para diseñar la planta de producción más conveniente en cada contexto desde la perspectiva medioambiental y de sostenibilidad. Las decisiones industriales y económicas se toman teniendo en cuenta el consumo de recursos, los impactos ambientales de los mismos y, finalmente, la forma en que ambos conceptos están vinculados para conseguir una industria más eficiente y sostenible y un entorno más limpio a su alrededor.

5.2 **Publicación 2: “*Heat recovery in sanitary-ware industry applied to water and energy saving by multi-effect distillation*”**

5.2.1 **Resumen de la publicación en español**

La tecnología de colado con molde de resina requiere una ingente cantidad de agua para el lavado de moldes, que además debe tener una calidad elevada. Es práctica habitual desechar esta agua una vez utilizada. Conceptualmente es un agua no contaminada que ha adquirido sales en disolución y partículas básicamente inorgánicas en suspensión. Mediante un tratamiento adecuado es susceptible de regenerarse para ser reutilizada. El hecho de que el coste del proceso sea superior al coste del agua hace es la causa de que finalmente acabe como un efluente más. Este artículo tiene como objetivo mostrar la forma de aplicar la recuperación del calor residual del horno a un sistema de destilación multi-efectos para reutilizar la mayor parte del agua de lavado. La configuración propuesta es una planta de destilación multi-efectos (MED) adaptada para funcionar con calor recuperado procedente de las chimeneas del horno. La investigación se basa en la simulación computarizada del acoplamiento de los sistemas termodinámicos del calor recuperado y de la planta destiladora bajo diferentes parámetros de operación. Los resultados obtenidos muestran la configuración óptima dependiendo de las variables térmicas que podrían alcanzar hasta casi el 92% del agua necesaria en comparación con la tecnología convencional. El punto de partida es un análisis comparativo entre las dos tecnologías de colado (moldes de yeso versus resina). A partir de este punto se describe y cuantifica el modo en que la resina se comporta en su función filtradora como molde para justificar la demanda de agua de lavado. Posteriormente se realiza una somera comparación del sistema propuesto versus el alternativo de ósmosis inversa que es el más extendido actualmente en las fábricas de sanitario cerámico. Una vez justificada la conveniencia de la destilación, se efectúa el análisis de modelos termodinámicos para el horno como fuente de calor y para

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 168 de 231



la destiladora como regeneradora de agua. Para el horno se analiza el proceso térmico para cada una de las demandas individuales en su interior:

- Calentamiento de las masas sólidas; piezas, soportes, refractario y vagonetas.
- Calentamiento de los reactivos de la combustión; gas natural (básicamente metano), aire de combustión en exceso del 10%.
- Calentamiento del aire de techo insuflado como generador de turbulencia y reductor de gradiente térmico en el interior del túnel.
- Calentamiento de los aires de enfriamiento rápido y lento.
- Pérdidas a través de las paredes, techo y suelo como combinación de radiación, convección y conducción.

El horno se compone de módulos de 3 metros de longitud, para cada uno de los cuales se establecen los cálculos de balances con las demandas calculadas previamente. De estos cálculos resultan los flujos de gases y aires calientes a través de las tres chimeneas de escape que adecuadamente combinados conforman un flujo único de calor recuperado. Este flujo es la fuente de calor suministrada al primer efecto de la destiladora donde se intercambia la energía con el agua a recuperar para producir la evaporación que generará el reciclado del agua en el lado evaporador del efecto. En el lado condensador, este vapor se condensa parcialmente, cediendo su calor latente al agua de alimentación antes de ser introducida en el efecto. Los efectos de la destiladora se superponen en cascada hasta un condensador donde todo el resto de vapor no condensado previamente en los efectos anteriores es finalmente condensado cediendo su calor latente al agua de alimentación. La eficiencia del sistema se incrementa intercalando un precalentador del agua de alimentación antes del primer efecto de la destiladora. Para cada celda (efecto) se realiza un balance de masas y energía componiendo un complejo sistema de ecuaciones que es resuelto por iteración con el código simulador.

5.2.2 Resumen de la publicación en inglés



The resin mold casting technology requires a huge amount of water for flushing molds, which must also have a high quality. It is common practice to reject this water after used. Conceptually, it can be considered as clean water but the content of dissolved salts and particles in suspension which basically are inorganic. It may be regenerated by means of an appropriated treatment. The cost of the process is higher than the cost of water. This is the reason because finally, it is rejected as an effluent. This article aims to show how to apply the recovery of residual heat from the kiln to a multi-effect distillation system

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 169 de 231

to reuse most of the molds flushing water. The proposed configuration is a multi-effect distillation plant (MED) adapted to operate with recovered heat from the kiln stacks. The research is based on a computer simulation coupled the thermodynamic kin and distiller systems operating under different parameters. The results obtained show the optimal configuration depending on the thermal variables that could reach up to almost 92% of the necessary water compared to conventional technology. The starting point is a comparative analysis between the two casting technologies (plaster versus resin mold). From this point on, it is justified the demand of flushing water for the mold by analyzing the behavior of the resin as filtering media. Subsequently, a brief comparison of the proposed system versus reverse osmosis system which currently is the most widespread in ceramic sanitary ware factories, is made. Once the convenience of the distillation is justified, thermodynamic models are analyzed for the kiln as the heat source and for the distiller as the water regenerator. For the kiln, the thermal process is analyzed for each of the individual demands inside the tunnel:

- Heating of solid masses; ware, supports, refractory and carts.
- Heating the combustion reagents; natural gas (basically methane), combustion air in excess of 10%.
- Heating of the roof air supplied as a turbulence generator and thermal gradient reducer inside the tunnel.
- Heating of rapid and slow cooling.
- Thermal losses through walls, ceiling and floor as a combination of radiation, convection and conduction.

The kiln is made up of 3 meters long modules. Thermal and mass balances are made for each with the previously calculated demands. From these calculations they are derived flows of hot gases and airs through the three exhaust chimneys that properly combined, make up the recovered heat flow. This is the heat source supplied to the first effect of the distiller where the energy is exchanged with the water to be recovered producing the evaporation that will generate recycling of the water on the evaporator side of the effect. On the condenser side, this vapor partially condenses, yielding its latent heat to the feeding water before being introduced into the effect. The effects of the distiller are cascaded to a condenser where all the rest of the steam not previously condensed in the previous effects is finally condensed, yielding its latent heat to the feed water. The efficiency of the system is increased by inserting a preheater of the feed water before the first effect of the distiller. For each cell (effect), mass and energy balances are made, composing a complex system of equations that is solved by iteration with the simulator code.

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 170 de 231



5.2.3 Conclusiones de la publicación

El artículo pone de manifiesto una vez más el intensivo consumo de recursos del sector cerámico. Se puede concluir que existe un gran potencial en cuanto a la posibilidad de reducción de consumo de recursos y mejora de la eficiencia. Este artículo muestra una aplicación directa y específica para la reducción de consumo de agua. El estudio muestra una forma eficaz y novedosa en este sector para recuperar agua que usualmente es desechada en los procesos actuales. La aplicabilidad de este concepto es ampliamente extensible a la mayoría de las plantas industriales actuales y futuros proyectos de fabricación. Es un hecho que el agua juega un papel fundamental en el proceso de fabricación de cerámica. Históricamente, sin embargo, no ha sido una gran preocupación ya que era un recurso fácil y no costoso. No obstante, en la actualidad, está empezando a adquirir un nuevo rol dentro del marco generalizado de escasez hídrica por lo que resulta una cuestión de gran relevancia para el desarrollo de un futuro sostenible para esta área industrial. El desempeño económico de las empresas depende cada vez más de la gestión del agua desde un punto de vista ambiental y también de coste. Esta gestión del agua desempeña un papel importante en la gestión ambiental que progresivamente se va imponiendo en la toma de decisiones de gestión corporativas. En este sentido, esta investigación pretende aportar una técnica específica para reducir el consumo total de agua de lavado de moldes mediante que pueda ser considerada en una buena organización de la gestión medioambiental. SDEWES (“*International Center for Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*”) propone el conocido concepto de reutilización mediante la integración de los residuos de un proceso para utilizarlo en otro como recurso. De esta forma se consigue mejorar la eficiencia y cumplir con el objetivo de conseguir una industria más sostenible en la fabricación de artículos sanitarios cerámicos. Las limitaciones de la investigación están claramente relacionadas con la solubilidad y saturación de la sal. Actualmente, este tema es objeto de mucha investigación dentro del campo de la desalinización. En este sentido, todos los nuevos avances técnicos en este campo serían aplicables en la mejora y desarrollo de esta investigación.

5.3 Publicación 3: “*Reduction of Water and Energy Consumption in Sanitary-Ware industry by Absorption Machine Operated with Recovered Heat*”

5.3.1 Resumen de la publicación en español



La fabricación de artículos sanitarios tiene una característica especial basada en los diferentes niveles de temperatura de cada uno de los procesos térmicos en la línea de producción. Este artículo basa en

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 171 de 231

este hecho la novedad de la investigación de combinar el calor recuperado del horno con un ciclo de absorción para condensar el agua evaporada durante la producción de artículos sanitarios en los escapes de los secaderos y de las centrales de acondicionamiento de aire por calefacción. La técnica utilizada para el análisis es la computarización de un modelo termodinámico del sistema y sus componentes para evaluar el consumo de recursos. El modelo propuesto se aplica a las dos tecnologías más extendidas en la fabricación de aparatos sanitarios cerámicos con objeto de reducir el uso de gas natural en un 25% y el uso total de agua en un 16%. Durante el proceso de fabricación, la barbotina líquida que se ha de colar en los moldes contienen aproximadamente un tercio de su peso de agua dependiendo de la densidad. En el modelo de la investigación, se han considerado 1.750 kg/cm³. Con este valor, la cantidad de agua contenida es un 48 por ciento del peso seco del producto cerámico, lo que supone 32,43 por ciento de agua en la barbotina. El agua de esa barbotina ha de eliminarse escalonadamente a lo largo de los diferentes procesos en la línea de producción de la siguiente forma:

- 56,25% se elimina durante el colado a través del molde.
- 2,08% inmediatamente después del desmoldeo en la sala de colado por aireación con las condiciones higrométricas del periodo de colado.
- 6,25% por aireación en la sala de colado con las condiciones higrométricas del periodo de secado de moldes.
- 35,42% en el secadero según la curva predeterminada de secado.

La evacuación del agua del molde tiene lugar en estado líquido en el caso de molde de resina, por lo que no se considera en este artículo. Sin embargo, en un molde de yeso, esta agua ha de evaporarse durante el ciclo de secado de moldes, así como el resto de agua que se evapora en las sucesivas fases de producción mencionadas. Finalmente, estos vapores terminan en las chimeneas de renovación de aire de la sala de colado o en la del secadero. Y éste es el objetivo de la investigación, la recuperación de esta agua por condensación con una máquina enfriadora de absorción operada con el aire caliente recuperado de las chimeneas del horno. El planteamiento es analizar las cargas térmicas de la fábrica añadiendo las específicas de la máquina de absorción para discernir en qué casos la recuperación de calor puede satisfacer completamente la demanda térmica y en caso contrario valorar el calor extra que ha de suministrarse de modo convencional. El análisis se hace para los dos tipos de fábrica según la tecnología de colado y para las dos posibilidades de suministro térmico; con gas natural o con calor recuperado del horno. Debido a la estacionalidad de funcionamiento de las máquinas de acondicionamiento de aire, el estudio se realiza a lo largo de un año natural para comprobar las diferencias de comportamiento del sistema en épocas cálidas o frías, así como secas o húmedas.

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 172 de 231



También se realiza un análisis de sensibilidad respecto a la temperatura ambiental y la radiación solar, factores variables estacionalmente que afectan a la demanda térmica de calefacción y a la capacidad evaporativa del aire ambiental.

5.3.2 Resumen de la publicación en inglés

Ceramic sanitary ware manufacturing presents special characteristic because of the different temperature levels every thermal process on the production line. This article bases on this fact the novelty of the research in order to combine the heat recovered from the kiln with an absorption cycle to condense the evaporated water during the production of sanitary ware throughout exhausts of dryers and heating air conditioning systems. The technique used to analyze the proposal is the computerization of a thermodynamic model of the system and its components to assess resources consumption. The proposed model is applied to the two most widespread technologies in the manufacture of ceramic sanitary ware in order to reduce the use of natural gas by 25% and the total use of water by 16%. During the manufacturing process, the water content of the slip to be cast into the molds is approximately one third of the weight depending on the density. Considered density in this research has been 1.750 kg/cm³. With this value, the amount of water contained is 48 percent of the dry weight of the final ceramic product. This equals 32,43 percent of water content in the slip. This water has to be eliminated in stages throughout the different processes in the production line as follows:

- 56,25% is removed during casting through the mold.
- 2,08% immediately after demolding via ventilation in the casting room as per the hygrometric conditions of the casting period.
- 6,25% via ventilation in the casting room as per the hygrometric conditions of the mold drying period.
- 35,42% in the dryer according to the predetermined drying curve.

The evacuation of the water from the mold takes place in a liquid state in the case of a resin mold, therefore it is not considered in this article. However, in a plaster mold, this water has to be evaporated during the mold drying cycle, as well as the rest of the water that is evaporated in the successive production stages mentioned. Finally, these vapors end up in the air renovation chimneys of the casting room or dryer. This is the main aim of the research, the recovery of this water by condensation with an absorption chiller machine operated with the hot air recovered from the kiln stacks. The approach is to analyze the thermal loads of the factory adding the specific ones of the absorption machine to conclude in which cases the heat recovery can completely supply the thermal demand and otherwise, to assess

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 173 de 231

the extra heat to be supplied in a conventional way. The analysis is made for the two types of factory according to the casting technology and for the two possibilities of thermal supply, either with natural gas or recovered heat. Due to the seasonality of operation of the air heating machines, the study is carried out over a calendar year to compare the differences in behavior of the system in hot or cold seasons, as well as dry or humid seasons.



A sensitivity analysis is also carried out with respect to ambient temperature and solar radiation, as seasonally variable factors which affect the thermal demand for heating and the evaporative capacity of ambient air.

5.3.3 Conclusiones de la publicación

Los resultados más notables del artículo son:

- La investigación muestra la forma de vincular equipos desde el punto de vista térmico para optimizar el consumo de energía primaria.
- La recuperación de agua implica un aumento de energía. Sin embargo, con la aplicación de una máquina de absorción, la energía global puede reducirse significativamente hasta en un 27%.
- En la optimización de una fábrica de artículos sanitarios se puede obtener una reducción en el consumo de energía y agua a través de la técnica de recuperación de calor.
- El consumo de energía se reduce en más del 25% y el agua necesaria para la elaboración de pasta y esmalte que resulta evaporada en los procesos de secado y calefacción, se puede recuperar por completo, lo que representa hasta el 24% del agua total requerida en una fábrica. Las emisiones de CO₂ se reducen proporcionalmente a las de combustible.
- La investigación demuestra que la implementación de la máquina de absorción proporciona ahorro de energía en cualquier configuración de las propuestas además del agua recuperada. Se entiende que es respecto a una fábrica convencional donde se pretenda recuperar el agua.
- Esta investigación complementa la de (Cuviella-Suárez et al., 2019a) en la que se proponía el ahorro de agua líquida por medio de destilación térmica.
- Esta investigación contribuye notablemente al concepto “*cero emisiones*” en la industria de artículos sanitarios y al aumento de la eficiencia energética.



Las limitaciones de la investigación y recomendaciones para futuros trabajos pueden resumirse como:

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 174 de 231

- En esta investigación, solo se ha considerado el horno túnel. Sin embargo, el horno intermitente es una solución habitual para reparar artículos en un segundo incendio que podría ser agregado al sistema para obtener más ahorros térmicos.
- El alcance de esta investigación considera solo el ahorro de recursos. Un análisis del impacto económico de la inversión sería muy útil, teniendo en cuenta el progresivo aumento del precio del agua y su valoración como un bien cada vez más escaso.
- Esta investigación no ha considerado las energías renovables que se pueden aplicar para mejorar mejor la eficiencia global de la fábrica.
- Aunque esta investigación se ha centrado en la industria de artículos sanitarios, sus conclusiones se pueden aplicar a cualquier sector donde se pueda lograr una combinación de calor recuperado y emisiones de vapor.
- Se ha realizado un análisis de sensibilidad para temperatura y radiación. Sería aconsejable llevar a cabo un análisis combinado multivariable que incluya la humedad.

Las técnicas aplicadas para mostrar el potencial de ahorro e identificar y cuantificar los equipos con mayor impacto en la posibilidad de reducir la energía han sido el procedimiento de modelado de los procesos y la ingeniería térmica (Maheshwari et al., 2019). En este sentido, esta investigación contribuye a ampliar la investigación realizada en (Cuviella-Suárez et al., 2018) y (Cuviella-Suárez et al., 2019a) en la realización del modelado de las fábricas y la cuantificación de sus ahorros de energía térmica y agua.

La sostenibilidad es hoy en día un punto clave al diseñar nuevas plantas de fabricación. Por lo tanto, el consumo de recursos, el impacto ambiental y la forma en que ambos conceptos están vinculados para una producción más limpia deben tenerse en cuenta en cualquier decisión industrial y económica que se tome sobre las instalaciones de fabricación y en este sentido, esta investigación aporta una herramienta útil a esa finalidad.

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 175 de 231

6 OTRAS APORTACIONES CIENTÍFICAS DERIVADAS DIRECTAMENTE DE LA TESIS DOCTORAL

Dentro del trabajo de investigación de esta tesis doctoral y en la misma línea de desarrollo que las publicaciones principales, se han abordado otras publicaciones encaminadas al objetivo fundamental de la investigación de encontrar soluciones de reducción de consumos que ayuden a materializar la optimización del uso de recursos en la producción de aparatos sanitarios cerámicos. El resultado de estas líneas de desarrollo se ha plasmado en la publicación en revistas científicas de dos artículos de investigación.

Un resumen de cada una de las publicaciones y los datos correspondientes a cada una de ellas se incluyen en los apartados siguientes.



6.1 Artículo “*Sanitary-ware factories: heat recovery strategies to optimize energy and water consumption*”

6.1.1 Datos de la publicación

Los datos correspondientes a la publicación del artículo y la revista donde se ha publicado se detallan en la tabla 50.

Tabla 50. Datos del segundo trabajo científico publicado:” *Sanitary-ware factories: heat recovery strategies to optimize energy and water consumption*”



Datos sobre la publicación del trabajo científico	
Título de la publicación	<i>Sanitary-ware factories: heat recovery strategies to optimize energy and water consumption</i>
Autores	Carlos Cuviella-Suárez Antonio Colmenar-Santos David Borge-Díez Enrique Rosales-Asensio
Afiliación de los autores	Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control, UNED
Revista	<i>Energy Procedia</i>
Estado de publicación	Publicado. Volume 157, January 2019, Pages 719-736
D.O.I.	https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.238

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 176 de 231

Índices de impacto <i>Journal Citation Reports</i> de la revista en el año 2019 (último índice publicado)		
Categoría	<i>Energy</i>	<i>Energy (Miscellaneous)</i>
Índice de impacto	0,44	
Quartil	--	--
Índices de impacto <i>Scopus</i> de la revista en el año 2019 (último índice publicado)		
<i>CiteScore 2018 All publication types</i>	1,15	
<i>SCImago Journal Rank (SJR) 2018</i>	0,468	
<i>Source Normalized Impact per Paper (SNIP) 2018</i>	--	
<i>CiteScore rank and Percentile per category</i>	CiteScore rank	Percentile
<i>Energy Procedia</i>	--	--

6.1.2 Resumen de la publicación

La fabricación de artículos sanitarios tiene una característica particular específica del consumo de energía desde el punto de vista térmico. Los requisitos de calor y los niveles de temperatura a través de los diferentes subprocesos en la secuencia de fabricación se distribuyen de tal manera que una red adecuada de calor recuperado puede ahorrar hasta un tercio del consumo de energía primaria de la fábrica. La mitad de la demanda térmica total se destina al proceso de cocción a lo largo de un horno túnel del que las tres cuartas partes se liberan como gases de escape y aires calientes a través de las diferentes chimeneas con un nivel térmico adecuado para ser recuperado en el resto de procesos térmicos. En este artículo se aborda una reducción de recursos basada en la cogeneración de electricidad y calor. Partiendo del supuesto de que el mapa de consumos eléctricos y térmicos de la fábrica son conocidos se plantea una combinación de residuos térmicos provenientes de los procesos propios de la producción (cocción de la cerámica) con el de la planta de cogeneración. El resultado es excesivo para la demanda de consumidores térmicos secundarios en la planta (secaderos y calefacción), por lo que se plantea el aprovechamiento del residuo para la recuperación de agua mediante destilación multi-efecto. El problema principal para optimizar el dimensionamiento de la planta es la no simultaneidad de las curvas de carga eléctrica y térmica. Debido a la naturaleza de ambos tipos de energía, el almacenamiento no resulta prácticamente viable, por lo que el tamaño de la planta de cogeneración ha de ser adecuado a satisfacer la mayor cantidad posible de suministro eléctrico sin tener exceso de calor residual que



 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 177 de 231

no haya posibilidad de aprovechar. El punto de partida es la caracterización de generación eléctrica de la cogeneración definida mediante la curva de carga eléctrica y la curva de rendimiento de la turbina. Cuando la turbina trabaja por debajo de su potencia nominal, el rendimiento de la misma cae. Esto produce un consumo de gas y un calor residual mayores a los que corresponderían linealmente con mismo rendimiento. Una planta grande trabajará mucho tiempo fuera de las condiciones óptimas (con mal rendimiento) pero tendrá un mayor grado de cobertura eléctrica. En cambio, una planta pequeña trabajará la mayor parte del tiempo a plena carga con buen rendimiento, pero tendrá una tasa de cobertura más pequeña. Es necesario encontrar el compromiso de tamaño para optimizar los recursos de energía primaria. Esta optimización se realiza desde 2 perspectivas; la energética que minimiza el consumo de energía, y la económica, que minimiza el coste de dicha energía. Por otro lado, la medida de ahorro se aborda en diferentes etapas:

- Cálculo de la energía necesaria en una fábrica convencional.
- Cálculo del incremento de energía en una fábrica convencional en la que se añade el consumo energético de recuperar el agua vía destilación.
- Cálculo de la reducción de consumo de energía cuando parte del calor residual del horno se aprovecha para precalentar los aires de combustión y de techo de entrada al horno.
- Cálculo del consumo de energía cuando se implementa una cogeneración dimensionada de acuerdo a la media anual de potencia eléctrica según su curva de demanda.
- Cálculo de la potencia de la cogeneración que daría el mínimo de consumo de energía mediante la derivación de la función Energía=f (potencia).
- Cálculo de la potencia de la cogeneración que daría el mínimo coste de energía mediante la derivación en parciales de la función Coste=f (Precio gas, precio electricidad). En este caso y por ser una función bivalente, se afronta la optimización mediante una correlación en forma de red neuronal con dos entradas correspondientes a los precios del gas y electricidad y una salida correspondiente al coste anual de producción.

6.1.3 Conclusiones de la publicación

Este artículo tiene como objetivo mostrar cómo aplicar un mapa de recursos dentro de una fábrica convencional de sanitarios para cuantificar las reducciones alcanzables de agua y energía primaria. En este sentido, contribuye a proporcionar una herramienta práctica para diseñar una fábrica eficiente desde la perspectiva de la energía y el agua. Las conclusiones directas son:



Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 178 de 231

- La investigación describe la configuración de los equipos para optimizar el consumo de agua y energía y la forma en que sus elementos consumidores se vinculan recíprocamente desde un punto de vista energético.
- Los flujos de calor residuales se cuantifican para derivar la disponibilidad de calor recuperado en cada momento entre los diferentes consumidores térmicos.
- Se comprueba que la reducción de agua implica un aumento de energía. Sin embargo, con la aplicación de una cogeneración, la energía global primaria puede reducirse significativamente hasta un 31%.
- La red neuronal calculada para correlacionar la potencia eléctrica de la turbina con los precios de la energía es una herramienta práctica para encontrar el mejor diseño al decidir la nueva construcción de una fábrica a partir del escenario más probable que se pueda dar en los mercados energéticos.
- En el cálculo de cogeneración para mínimo consumo de energía, ésta será invariable, a diferencia de los costes que son variables en función de la evolución de los mercados. Por lo general, la variación de precios siempre es al alza, por lo que la reducción de costos aumenta a medida que aumentan los precios.

Como limitaciones a la investigación realizada en este artículo y como posibles futuros estudios relacionados cabe mencionar:

- El estudio se ha centrado en la recuperación térmica del horno túnel, ya que funciona de forma continua. Por el contrario, el horno intermitente opera en ciclos discontinuos desde temperatura ambiente hasta la de proceso y de nuevo a temperatura ambiente. Este procedimiento hace que sea difícil aprovechar el calor recuperado de él. Sin embargo, puede resultar interesante agregar esta fuente de calor al sistema propuesto en esta investigación para aumentar las reducciones de energía.
- El alcance de esta investigación incluye el cálculo de reducción de costes. Sin embargo, se debe realizar una inversión importante para aplicar la técnica de reducción. Un análisis económico completo debería contemplar los costes de inversión y operación en el estudio para determinar la viabilidad del proyecto.
- El agua se está convirtiendo en un recurso escaso, por lo que el precio del agua tiene una tendencia de crecimiento. El estudio no lo ha tenido en cuenta, pero este coste debería ser añadido al de las energías para determinar el óptimo económico y hacer más viable la inversión.
- El precalentamiento del aire de entrada al horno se ha limitado a la temperatura proporcionada por los calores recuperados. Sin embargo, una temperatura de entrada mayor disminuiría el consumo de gas del horno. La implementación de una fuente alternativa de calor de alta calidad supondría una importante mejora en la eficiencia de los hornos.

La sostenibilidad es hoy en día un punto clave para diseñar y explotar las plantas productivas. Por lo tanto, el consumo de recursos, los impactos ambientales y la forma en que ambos conceptos están vinculados para una producción más limpia deben tenerse en cuenta en cualquier decisión industrial y económica que se tome sobre

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 179 de 231

las nuevas instalaciones de fabricación. Esta investigación tiene como objetivo dotar a la industria de una herramienta de modelización y optimización para el diseño de plantas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente.

En el ANEXO XIII: y ANEXO XIII: se incluyen los siguientes documentos relativos a esta publicación:

- ANEXO XII: Copia de la publicación.
- ANEXO XIII: Certificado de la publicación.



6.2 Artículo “*Exergoeconomics in the sanitary-ware industry to reduce energy and water consumptions*”

6.2.1 Datos de la publicación

Los datos correspondientes a la publicación del artículo y la revista donde se ha publicado se detallan en la tabla 51.

Tabla 51. Datos del segundo trabajo científico publicado: “*Exergoeconomics in the sanitary-ware industry to reduce energy and water consumptions*”

Datos sobre la publicación del trabajo científico	
Título de la publicación	<i>Exergoeconomics in the sanitary-ware industry to reduce energy and water consumptions</i>
Autores	Carlos Cuviella-Suárez Jorge Juan Blanes Peiró David Borge-Díez Antonio Colmenar-Santos
Afiliación de los autores	Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control, UNED
Revista	<i>AIP Conference Proceedings</i>
Estado de publicación	Publicado. AIP Conference Proceedings 2190, 020061 (2019). Published Online: 11 December 2019
D.O.I.	https://doi.org/10.1063/1.5138547
Índices de impacto <i>Journal Citation Reports</i> de la revista en el año 2019 (último índice publicado)	

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 180 de 231



Categoría	<i>Physics and Astronomy</i>	<i>Physics and Astronomy (Miscellaneous)</i>
Índice de impacto	0,40	
Quartil	--	--
Índices de impacto <i>Scopus</i> de la revista en el año 2019 (último índice publicado)		
<i>CiteScore 2018 All publication types</i>	--	
<i>SCImago Journal Rank (SJR) 2018</i>	0,182	
<i>Source Normalized Impact per Paper (SNIP) 2018</i>	--	
<i>CiteScore rank and Percentile per category</i>	CiteScore rank	Percentile
<i>Energy Procedia</i>	--	--

6.2.2 Resumen de la publicación

La fabricación de artículos sanitarios de cerámica es un sector industrial dentro del campo de la cerámica que a nivel mundial demanda más de 100.000 TJ de energía primaria y 21.000 dam³ de agua por año. Este artículo tiene como objetivo cuantificar el nivel alcanzable de mejora en la industria del sanitario cerámico mediante la aplicación de ingeniería térmica al proceso de fabricación y la forma de hacerlo para recuperar parte del agua del proceso y reducir el consumo total de energía primaria. Este artículo complementa el anterior con la realización de un modelo termodinámico de cada elemento componente de la fábrica que permite comparar la calidad exergética de entradas y salidas de cada uno de ellos a fin de interconectarlos de manera en que los flujos residuales de cada uno puedan ser reaprovechados como alimentación térmica de otros lo que redundará en una reducción importante de energía primaria y de agua. El análisis exergético avanzado ha sido la técnica seleccionada aplicada a todos los subprocesos térmicos que comprenden la línea de producción. Esta investigación muestra que el 20% de la exergía de entrada en una fábrica convencional es recuperable. Muestra, además cómo aun incrementando la demanda térmica a efectos recuperar agua por destilación puede reducirse un 3% de la energía primaria y el 100% del agua de lavado para los moldes.

6.2.3 Conclusiones de la publicación

El artículo trata de demostrar mediante el análisis exergético cómo una fábrica convencional de artículos sanitarios cerámicos puede ser más eficiente mediante la aplicación de ingeniería térmica.

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 181 de 231

La energía primaria se reduce 3% de 7.934 kW a 7.699 kW y se ahorran 112.000 m³ de agua por año. Esta reducción implica casi 1 Gg de reducción de CO₂.

Con respecto al ahorro de agua, este artículo sólo ha considerado el efluente residual. Sin embargo, existe una interesante cantidad de agua a recuperar a partir de las chimeneas de escape de secaderos y acondicionadores de calefacción, por donde se emite toda el agua evaporada procedente de la barbotina. Esto representa el 20% del agua total consumida y su recuperación. Este estudio podría constituir una investigación muy interesante para un enfoque futuro dentro de este tema.

El análisis exergético avanzado ha permitido cuantificar la mejora que se puede obtener y compararla con el máximo posible en el estado actual del arte por medio de los conceptos de exergía destruida “*evitable*” y “*no evitable*”. Asimismo, ha servido para identificar los equipos con mayores posibilidades de reducir la exergía y cuantificar en qué medida se puede conseguir resultando una herramienta de diseño muy útil en la toma de decisiones empresariales relativas a nuevas instalaciones de producción.

En el ANEXO XIV: y ANEXO XV: se incluyen los siguientes documentos relativos a esta publicación:

- ANEXO XIV: Copia de la publicación.
- ANEXO XV: Certificado de la publicación.

6.3 Artículo “*Tri-generation system to couple production to demand in a combined cycle*”

Aunque este artículo no corresponde al periodo de la matrícula del doctorando y por tanto no aplica como parte de la investigación, se ha considerado oportuno incluirlo como otra aportación científica relacionada con la tesis. porque está en la misma línea de conocimiento y ha servido como prelude de la presente tesis. El artículo fue realizado y publicado durante el periodo de formación del Máster Universitario en Tecnologías Industriales de la UNED, que sirve como acceso al programa de Doctorado en el que se enmarca la presente tesis.

6.3.1 Datos de la publicación

Los datos correspondientes a la publicación del artículo y la revista donde se ha publicado se detallan en la tabla 52.





Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 182 de 231

Tabla 52. Datos del segundo trabajo científico publicado: ” Tri-generation system to couple production to demand in a combined cycle”

Datos sobre la publicación del trabajo científico		
Título de la publicación	<i>Tri-generation system to couple production to demand in a combined cycle</i>	
Autores	Carlos Cuviella-Suárez Antonio Colmenar-Santos Manuel Castro Gil	
Afiliación de los autores	Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control, UNED	
Revista	<i>Energy</i>	
Estado de publicación	Publicado. En Abril de 2012. Vol 40 Issue 1. Pags. 271-290.	
D.O.I.	https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.073	
Índices de impacto <i>Journal Citation Reports</i> de la revista en el año 2019 (último índice publicado)		
Categoría	<i>Energy</i>	<i>Energy</i>
Índice de impacto	6,082	
Quartil	Q1	--
Índices de impacto <i>Scopus</i> de la revista en el año 2020 (último índice publicado)		
<i>CiteScore 2019 All publication types</i>	--	
<i>SCImago Journal Rank (SJR) 2019</i>	2,166	
<i>Source Normalized Impact per Paper (SNIP) 2019</i>	2,012	
<i>CiteScore rank and Percentile per category</i>	CiteScore rank	Percentile
<i>Energy</i>	9,9	--

6.3.2 Resumen de la publicación



La publicación plantea la cogeneración frente a un mercado eléctrico en el que las energías renovables no parecen ser la solución definitiva frente al impacto medioambiental, aunque si tienen una tendencia creciente en cuanto a su hegemonía productiva. La cogeneración, en todas sus variantes, tiene que ser parte de la solución

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 183 de 231

a este enfoque a través de la estrategia de optimizar la gestión del exceso de energía térmica para la producción de energía eléctrica. Mediante esta política, con toda la complejidad asociada, el consumo total de combustible se puede reducir aproximadamente un 60% mediante la energía recuperada a través del condensador de la central eléctrica. Este trabajo tiene como objetivo aplicar una metodología estadística con el fin de distribuir consumo durante el ciclo de producción para que se vea lo menos afectado posible. La inclusión de agua mediante la destilación permite que el sistema gestione la energía térmica residual para transferir energía de unos períodos pico a otros valles, aplanando la curva de demanda global y dando solución a la confrontación de demanda y producción.

6.3.3 Conclusiones de la publicación

La aportación más innovadora de este trabajo es la de acoplar las curvas de generación y demanda. Se desarrolla una metodología estadística basado en datos reales eléctricos y meteorológicos que a pesar de ser valores continuos durante cortos periodos de tiempo (30 min de discretización), sirve para simular curvas de demanda y producción continuas. La segunda contribución innovadora es integrar la destilación de agua permitiendo consumir cualquier energía residual no destinada a la generación de electricidad, calefacción ni acondicionamiento de aire dentro de un concepto que podría denominarse tetrageneración como extensión de la trigeneración que contempla la electricidad, calefacción y frío. Con esta estrategia, el consumo de energía primaria se optimiza, minimizando también el impacto medioambiental. Es importante señalar que la dimensión de este proyecto no es habitual. Sin embargo, la forma en que los métodos analíticos y sintéticos obtienen datos y calculan resultados es perfectamente aplicable a cualquier dimensión. El concepto de la instalación es utilizar la máxima cantidad de energía primaria consumida mediante la reutilización del calor residual, devolviendo al medio ambiente un residuo térmico final del menor grado exergético posible. Esto deriva en dos efectos positivos. En primer lugar, la energía primaria se minimiza. En segundo lugar, el impacto ambiental es minimizado también, ya que no hay necesidad de disipar el calor proveniente de los ciclos de la turbina, lo que hace que el impacto térmico sea menor en el entorno que rodea la planta como sucede en las centrales térmicas convencionales. Admitiendo que alrededor del 50% de la energía primaria consumida en una planta convencional se devuelve al medio ambiente mediante disipación de calor, es obvio que una tendencia al alza de las plantas de cogeneración conlleva un consumo global de energía primaria tendente a mitad del actual. El artículo señala este hecho como un objetivo como en los futuros enfoques de plantas de energía eléctrica. La producción de energía sería más respetuosa con el medio ambiente reduciendo la contaminación por CO₂. Este artículo pretende ser un ejercicio de diseño dirigido a minimizar el consumo de combustibles de origen fósil en

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 184 de 231

el contexto actual de generación de energía “no limpia”. Esta no es la solución óptima, ya que sigue basándose en combustión fósil. Pero es un paliativo frente a la contaminación ambiental por emisión de CO₂.

En el ANEXO XVI: y ANEXO XVII: se incluyen los siguientes documentos relativos a esta publicación:

- ANEXO XVI:: Copia de la publicación.
- ANEXO XVII: Certificado de la publicación.

6.4 Publicación del libro “*Water and Energy Use in Sanitary-ware Manufacturing - Process Modelling for Greater Efficiency*”

Como resultado de las publicaciones relacionadas con la tesis y el interés suscitado en los editores de “Springer Nature Switzerland AG”, los autores de las publicaciones han sido requeridos por la mencionada editorial para la elaboración de un libro que describa el uso del agua y la energía en el sector industrial de la producción de artículos sanitarios cerámicos. En la actualidad el libro está en edición y a la venta bajo los términos del contrato contraído entre los autores y la editorial.

En los siguientes anexos se incluyen los documentos relativos al libro:

ANEXO XVIII: Contrato de publicación

ANEXO XIX: Certificación firma electrónica de contrato

ANEXO XX: Formulario de propuesta del libro

ANEXO XXI: Tabla propuesta de contenidos

ANEXO XXII: Propuesta de sinopsis

ANEXO XXIII: Flyer del editor de la puesta a la venta del libro

La portada y metadatos del libro se presentan en la tabla 53. portada y metadatos del libro “water and energy use in sanitary-ware manufacturing”.



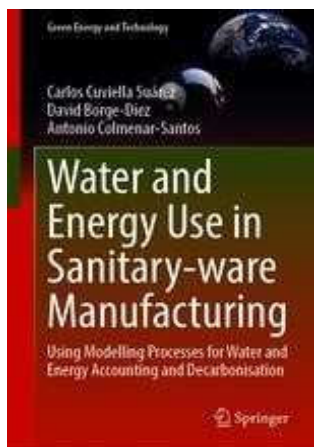
 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 185 de 231

Tabla 53. Portada y metadatos del libro “Water and Energy Use in Sanitary-ware Manufacturing”



Título editorial	Water and Energy Use in Sanitary-ware Manufacturing
Subtítulo	Using Modelling Processes for Water and Energy Accounting and Decarbonisation
Autores	Carlos Cuviella Suárez David Borge-Diez Antonio Colmenar-Santos
Tema serie	Green Energy and Technology
Editor	Springer International Publishing
eBook ISBN	978-3-030-72491-7
Hardcover ISBN	978-3-030-72490-0
Series ISSN	1865-3529
Tema libro	Energy Efficiency
Link Editorial:	https://www.springer.com/gp/book/9783030724900



6.5 Documentos de aplicación práctica de los conocimientos y conclusiones de la tesis en la industria cerámica de artículos sanitarios

Como aplicación de todo el conocimiento y conclusiones de la tesis doctoral, el autor ha presentado a la empresa ROCA SANITARIO S.A. los documentos “*Aplicación práctica de medidas de reducción de consumos en la industria de productos sanitarios cerámicos*” y “*Optimización de los consumos de agua y energía en la Industria Cerámica Sanitaria y la Reducción de Emisiones de CO₂*” en los que se establecen las pautas a seguir en una industria de este sector a fin de mejorar su eficiencia, optimizar los consumos de agua y energía y reducir los costes. Además, se incluye el estudio económico de inversión individualizado para cada una de las propuestas valorando la inversión inicial versus los ahorros anuales y estableciendo los periodos de retorno simple de cada una de las soluciones.

6.5.1 Resumen del documento “*Aplicación práctica de medidas de reducción de consumos en la industria de productos sanitarios cerámicos*”

En este documento se presentan todas las técnicas de ahorro energético que se pueden aplicar a una fábrica de artículos sanitarios cerámicos. La exposición se hace por secciones de producción de una forma secuencial acorde al proceso general en la línea de fabricación correspondiente a:



1. Primeras materias
2. Preparación de pastas
3. Preparación de esmaltes
4. Modelado y moldes

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 186 de 231

5. Colado
6. Acondicionamiento de colado
7. Secado
8. Esmaltado
9. Cocción
10. Control final
11. Oficinas
12. Almacén
13. Servicios

En cada una de las mencionadas secciones se caracterizan los consumos a partir del análisis de cada uno de los equipos, sus potencias nominales y condiciones de funcionamiento. A partir de esta caracterización se proponen las medidas correctoras procedentes a la reducción de consumos de acuerdo con las características de cada proceso. Las medidas consideradas son:

- Mejora de la eficiencia de motores eléctricos a fin de consumir menos energía eléctrica de entrada para la misma energía mecánica de salida.
- Aplicación de regulación de velocidad por variación de frecuencia en los motores eléctricos a fin de reducir el consumo eléctrico donde la velocidad de accionamiento no sea crítica.
- Substitución de iluminación convencional por iluminación “LED” con mejor eficiencia lumínica y eléctrica.
- Regulación y control de iluminación por presencia y nivel lumínico exterior a fin de reducir el consumo eléctrico durante las horas de luz exterior o de acuerdo a la presencia de personas en el local.
- Incremento del aislamiento térmico en equipos de calefacción, secaderos, hornos, etc.
- Regulación higrotérmica de la ventilación en equipos donde tenga lugar evaporación a fin de reducir la cantidad exterior de aire para el secado.
- Recuperación térmica de gases y aires en horno para reutilizar en secaderos y calefacción.
- Pre calentamiento de los aires de techo y combustión en los hornos.
- Regulación térmica adecuada del horno para minimizar la entrada de aires de enfriamiento y de turbulencia.

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 187 de 231

- Optimización de la carga del horno para optimizar los flujos de calor internos y la densidad de carga mediante la sustitución de materiales refractarios de alto calor específico (cordierita) por otros de menor calor específico (carburo de silicio).
- Implementación de energías alternativas de forma local, en particular fotovoltaica de autoconsumo.
- Implementación de cogeneración con aprovechamiento del calor residual para la recuperación de agua de proceso por medio de destilación multi-efecto o bien de condensación de vapor por absorción.
- Cogeneración con ciclos no convencionales (Rankine) a fin de aprovechar flujos térmicos de baja calidad.

Para cada una de las mejoras se ha valorado el coste y el ahorro obtenido a fin de obtener el periodo de retorno simple como indicador de valoración de la inversión.



Este documento resulta una herramienta de comparación tanto en el diseño de nuevas instalaciones como la reconversión de las existentes cuando se pretende analizar la viabilidad de un proyecto de sostenibilidad mejora de eficiencia.

6.5.2 Resumen del documento “Optimización de los consumos de agua y energía en la Industria Cerámica Sanitaria y la Reducción de Emisiones de CO₂”

Este documento resulta de la aplicación del anterior y resume las inversiones individuales, así como añade el planteamiento y valoración global de mejora de la fábrica secuencial desde el punto de partida de una fábrica convencional a una totalmente optimizada mediante las siguientes fases:

- OPTIMIZACION OP-1. Aplicación de las inversiones independientes en cada equipo que no están interrelacionadas y no vinculan flujos de recuperación.
- OPTIMIZACION OP-2. Añade el precalentamiento del horno con calor recuperado de las chimeneas, así como la reutilización de este calor en secaderos y centrales de acondicionamiento de aire.
- OPTIMIZACION OP-3. Añade una planta de cogeneración con recuperación de calor residual para tratamiento de agua reutilizada mediante destilación térmica multi-efecto y condensación de vapor por absorción.



En cada fase se aplica la inversión correspondiente y se calculan el ahorro y el periodo de retorno correspondiente. Se puede ver como las fases 1 y 2 son siempre interesantes, con un mayor o menor retorno de inversión. En el caso de la fase 3, se puede ver que el consumo de energía es mayor que la fábrica convencional,

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 188 de 231

pero a cambio se reutiliza toda el agua de proceso. Este hecho hace que el retorno de inversión dependa fuertemente del coste del agua y además de la reutilización completa del calor residual. La inversión de la fase 3 está directamente vinculada a estas restricciones

En el ANEXO XXIV: y ANEXO XXV: se incluyen los mencionados documentos.

La compañía ROCA SANITARIO S.A. autoriza al autor de la tesis a publicar en la misma los mencionados documentos como se muestra en el ANEXO XXVI:.

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 189 de 231

7 CONCLUSIONES



Siguiendo la secuencia de fases de la tesis y concordando con la secuencia de las publicaciones, se pueden analizar las conclusiones obtenidas en el proceso de optimización de recursos en la producción de aparatos sanitarios que se desprenden respectivamente de cada una de las publicaciones.

Tras la elaboración de la herramienta de análisis y los resultados obtenidos, cabe señalar que hay una serie de valores concluyentes tras la aplicación del método que sirven para cuantificar los ahorros obtenidos por cada una de las medidas propuestas. Estas conclusiones atañen directamente a la unidad de fabricación como tal. Cuando estos valores se extrapolan a la fabricación global y a efectos externos a la propia fábrica, se obtiene una serie de conclusiones más conceptuales o cualitativas que cuantitativas que justifican la necesidad de implantación de sistemas de análisis como el de esta tesis entre las medidas corporativas dedicadas a promover y desarrollar las políticas medioambientales y de sostenibilidad de una economía más eficiente y cuidadosa con el medioambiente. Estas conclusiones son concordantes con los objetivos propuestos en la sección 3.2.

7.1 CONCLUSIONES DIRECTAMENTE VINCULADAS A LA PRODUCCION DE ARTICULOS SANITARIOS CERAMICOS

Como se ha visto en los apartados precedentes, la industria de la cerámica es un consumidor intensivo de materias primas, energía y agua. Existe mucha literatura vinculada a la fabricación de otros tipos de productos cerámicos desde diferentes puntos de vista, incluyendo el del ahorro de recursos consumidos. No es así en el campo de la cerámica de artículos sanitarios. A tal efecto se ha visto la necesidad de agregar conocimiento e investigación al estado actual del arte en lo que se refiere al uso de energía y agua en la industria cerámica y en este sentido se puede concluir que:

- Esta tesis ha ampliado el mapa del ahorro de energía proporcionado por (Cuviella-Suárez et al., 2018) utilizándolo para calcular los ahorros reales y ha contribuido a extender el trabajo realizado allí al aplicar la herramienta de gestión directamente a las fábricas modeladas, y cuantificar sus ahorros de GN.
- Se establece un mapa de consumos tanto cualitativo como cuantitativo a fin de facilitar la gestión de flujos térmico que han de conducir a la reducción global.
- A la vista del mapa de consumos, se han identificado los puntos clave para mejorar la eficiencia del proceso, cuantificado los ahorros potenciales y sugerido las posibles estrategias para reducirlos.
- Los flujos de calor recuperados se cuantifican para derivar el calor disponible hacia los diferentes consumidores térmicos según la demanda de calor en cada momento.



Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 190 de 231

- Se sugieren diferentes métodos de mejora de eficiencia energética y de recursos, así como estrategias de reducción de consumo de recursos mediante la implementación de recuperación de calor y agua en los procesos de fabricación, conformando una herramienta muy valiosa para la gestión medioambiental de la empresa. Por lo tanto, la aplicabilidad de la herramienta es clara en el diseño de las nuevas plantas de fabricación para que sean más eficientes y sostenibles permitiendo a la empresa establecer una filosofía de fabricación optimizada y las estrategias para conseguirlo.
- Se ha visto que, dependiendo de las circunstancias, la eficiencia energética de una fábrica optimizada respecto a una convencional puede llegar a casi el 50%.
- Aunque la reducción de energía queda definida una vez realizado el diseño óptimo de la planta, el coste varía constantemente con el precio de la energía. Como, por lo general, la variación de precios siempre es al alza, se puede concluir que la reducción de costes aumenta a medida que aumentan los precios.
- Esta tesis ha demostrado cómo una fábrica convencional de sanitarios cerámicos puede ser más eficiente simplemente aplicando los principios de la ingeniería térmica desde una perspectiva termodinámica que analiza las transferencias de calor y la calidad de la energía térmica, así como del agua.
- En la comparación realizada entre los resultados analíticos de la tesis y los datos de instalaciones reales extraídos de la literatura, se ha comprobado que el modelo es apropiado para el análisis propuesto en esta tesis en el campo industrial estudiado.
- Las condiciones particulares de la intensidad de los recursos en la industria sanitaria proporcionan una condición óptima para acercarse al nexo agua-energía donde, en teoría, el agua podría reutilizarse casi a una tasa del 100% en un campo industrial que actualmente es un gran consumidor de ambos, energía y agua.

Entre las conclusiones aplicables a una unidad de fabricación individualmente, se puede destacar:

7.1.1 Conclusiones respecto al calor residual de los hornos



- El calor recuperado de los hornos puede potencialmente suministrar al resto de los consumidores térmicos dependiendo de las circunstancias de operación. Esto es absolutamente correcto para una fábrica con moldes de resina, donde los requisitos de calefacción son bastante más bajos que en la de moldes de yeso. En ésta última, la demanda térmica varía de tal manera que, durante la noche, los hornos no pueden suministrarla. Esto se debe principalmente a la punta de demanda térmica de la calefacción para secar los moldes de producción en la sala de colado.

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 191 de 231

- En cualquier caso, la recuperación del calor disponible hacia los consumidores y los hornos precalentando el aire de combustión disminuye el consumo total de GN en un 39,62% en PMF y un 46,23% en RMF.
- Aunque las pérdidas de calor a través de los cerramientos del horno podrían potencialmente proporcionar calor recuperable, esta práctica no es económicamente viable y no está dentro del alcance de esta tesis.
- Es importante remarcar que el precalentamiento del aire de combustión reduce el 27,21% del consumo de GN del horno túnel y el 24,44% del horno intermitente que se deduce de la cantidad disponible para el resto los consumidores. Este hecho produce que la cantidad de calor recuperado finalmente se reduzca. Esto no deja de ser un ahorro en el consumo global de gas.
- Una estrategia para reducir las puntas de demanda a lo largo del ciclo diario de operación puede ser la realización de un desfase en los ciclos de trabajo de los equipos individualmente con lo que se aprovecha mayor cantidad de calor recuperado y se obtiene una mejor eficiencia debido al aplanamiento de la curva de demanda. Así se reduce la necesidad de almacenamiento de calor residual de unos períodos a otros y en consecuencia el rendimiento de la propia recuperación.
- Mediante el almacenamiento del calor en los periodos de exceso para ser utilizado en los de defecto se consigue aumentar más el porcentaje de reducción de consumo. En una fábrica de moldes de yeso, este hecho no supone un obstáculo, pues el calor recuperado normalmente es deficitario. Por el contrario, en la de resina, se puede ver cómo se ha obtenido una ligera mejora del 1% de la reducción del consumo cuando se utiliza en los periodos de defecto calor almacenado durante los de exceso.



7.1.2 Conclusiones respecto a la reducción de consumo de agua

- Esta tesis muestra una manera adecuada para ahorrar la mayor parte del agua de este sector industrial. Por lo tanto, la aplicabilidad de este concepto es ampliamente extensible a la mayoría de las plantas industriales actuales y futuras.
- Los resultados de una contabilidad del agua en el marco de la gestión ambiental que respalda las decisiones de gestión corporativas ponen de manifiesto la relevancia que este tema comienza a tener. En este sentido, esta tesis proporciona una técnica específica para reducir el consumo total de agua del lavado de moldes efluído en forma líquida. Por otro lado, proporciona un método para recuperar el consumo de agua emitido en forma de vapor a través de chimeneas a lo largo del proceso general. Se considera el concepto de SDEWES de mejorar la eficiencia mediante la integración de los residuos de

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 192 de 231

un proceso a otro, utilizándolo como recurso, con el objetivo de una industria más sostenible de fabricación de artículos sanitarios.



- El agua es muy importante para el proceso de fabricación de cerámica. Históricamente, no ha sido una gran preocupación ya que era un recurso fácil de obtener y no costoso. Pero actualmente, se está convirtiendo en una fuerte restricción para un futuro sostenible de esta área industrial. El resultado económico de las empresas está comenzando a depender en gran medida de su necesidad por motivos ambientales y económicos.
- Respecto a la recuperación del efluente líquido cabe destacar que potencialmente se puede conseguir una reducción casi completa del agua de lavado de moldes (que junto con el rechazo de su proceso durante el tratamiento de ósmosis inversa representa más del 90% del consumo total en lo que a lavado se refiere).
- En referencia a la destilación cabe decir que existen ciertas limitaciones técnicas (Nannarone et al., 2017) y se ha demostrado que:
 - al aumentar el número de efectos o la diferencia de temperatura en las células, se mejora la eficiencia, por lo que el rendimiento general sería mejor.
 - La superficie total de transferencia de calor es poco dependiente del número de efectos.
- Por otro lado, existen varias restricciones principales que limitan el número de efectos, por lo que el diseño de la destilación (C. Frantz, C and Seifert, 2015) se realiza de acuerdo con los siguientes criterios:
 - cuanto mayor es la temperatura de la fuente de calor, mayor es la relación de ganancia o eficiencia (“*Gained Output Ratio*”).
 - exceder los límites de solubilidad de la salmuera dentro de los tubos produciría incrustaciones y, por lo tanto, una caída importante en el rendimiento. La temperatura máxima de la salmuera es de 70 °C para evitar la utilización de anti-incrustantes.
 - la temperatura de la salmuera dentro del último efecto debe ser al menos 3 °C mayor que la temperatura de alimentación.
 - la diferencia de temperatura de la salmuera entre dos efectos debe ser mayor que 2,25 °C y menor que 5 °C.
 - el aumento de la temperatura del agua dentro del condensador debe ser mayor que 3 °C y menor que 10 °C.
 - y, por supuesto, el coste de capital de la inversión es una limitación importante en el diseño para aumentar el número de efectos

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 193 de 231

- Respecto a la recuperación de agua evaporada, la tesis demuestra que implica un aumento del consumo de energía en todos los casos. Sin embargo, con la aplicación de una máquina de absorción, la energía global puede reducirse significativamente hasta en un 27% respecto a la que sería necesaria con métodos convencionales.
- La combinación de la recuperación de agua evaporada junto con la líquida de lavado de moldes supone casi la totalidad del consumo hídrico de la fábrica, por lo que la tesis puede enmarcarse dentro de la calificación de la política del concepto “*cero emisiones*” en la industria de artículos sanitarios.

7.1.3 Conclusiones respecto al acoplamiento de una cogeneración

- Mediante la incorporación de una cogeneración al sistema, se produce un incremento de calor residual a costa de un incremento de gas necesario para la turbina. Este aumento de energía recuperable permite la reducción de consumo de agua. De la combinación de ambos factores resulta un balance neto de ahorro de energía primario respecto a sistemas convencionales.
- El acoplamiento se explica en diferentes etapas para comprender cómo se logran las reducciones. A partir de la fábrica convencional donde no se han llevado a cabo medidas de reducción, se han simulado los siguientes pasos para cuantificar los ahorros de agua y energía:
 - En la primera etapa, se ha abordado la reducción de agua aumentando la energía térmica necesaria para la destilación.
 - En la segunda etapa, se introduce la planta de cogeneración en el sistema para reducir la energía primaria total. Como primera aproximación, el GT se ha dimensionado como el promedio eléctrico del consumo anual.
 - En la tercera etapa, la GT se ha optimizado para minimizar la energía primaria total consumida.
 - En una cuarta etapa, como alternativa, la optimización de la GT se ha llevado a cabo desde el punto de vista económico dependiendo del precio de la energía, donde la mejor GT puede diferir de la GT óptimo de energía. Es importante reducir la energía primaria desde el punto de vista de la sostenibilidad y el medioambiente para las empresas. Sin embargo, debe lograrse dentro de parámetros económicos definidos. De lo contrario, la sostenibilidad de la empresa se ve comprometida.
- Se han utilizado métodos avanzados de optimización como es el caso de una red neuronal diseñada para correlacionar la potencia de la turbina con los precios de la energía como herramienta práctica para encontrar el mejor diseño al decidir la nueva construcción de una fábrica conocido el escenario más probable de mercados energéticos.



Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 194 de 231

7.1.4 Conclusiones respecto al análisis exergoeconómico

- Mediante el análisis exergoeconómico de una fábrica optimizada versus una convencional, se ha cuantificado el ahorro en condiciones reales según la tecnología existente y el máximo de ahorro teórico (“*condiciones inevitables*”) con la mejor tecnología disponible en cada caso.
- Se ha visto que las diferencias entre la fábrica convencional y la optimizada residen en la autoproducción de energía eléctrica y la recuperación de calores residuales con la inclusión de nuevos elementos de tratamiento de agua mediante procesos térmicos. El consumo de gas se eleva debido a la central de producción eléctrica. Por otro lado, se reduce debido a la recuperación de calor de los hornos. El equilibrio global es positivo desde el punto de vista de la reducción. Además, la energía eléctrica no se suministra a precio público, lo que deriva un importante ahorro económico, así como la reducción de agua que también implica una mejora ambiental.
- Por medio del análisis de exergía avanzado se ha optimizado la fábrica convencional reconduciendo los flujos de exergía a través de los diferentes elementos con el fin de reutilizarlos aprovechando la exergía residual procedente de los hornos. En cuanto a la eficiencia, se puede ver cómo se mejora el comportamiento del sistema cuando se recupera el calor residual. Como consecuencia de este hecho, se reducen la tasa de exergía destruida y el coste de la exergía del producto.
- Mediante la técnica de análisis exergético se ha facilitado una mejor comprensión del potencial de ahorro y poder identificar y cuantificar los equipos con mayor posibilidad de reducción de energía. En este sentido, este estudio ha contribuido a extender el trabajo realizado en (Cuviella-Suárez et al., 2019a) y (Cuviella-Suárez et al., 2018) al aplicar el análisis exergético avanzado a las fábricas tipo y cuantificar sus potenciales ahorros de energía primaria y agua.

7.2 CONCLUSIONES VINCULADAS A LA SOSTENIBILIDAD Y MEDIOAMBIENTE

- Las decisiones industriales y económicas se toman teniendo en cuenta el consumo de recursos, los impactos ambientales de las mismas y, finalmente, la forma en que ambos conceptos están vinculados para una industria más eficiente y sostenible y un entorno más limpio a su alrededor. Y esta tesis pretende colaborar en este objetivo general como un medio para ayudar en el desempeño de una industria más limpia, eficiente y sostenible.
- La sostenibilidad es hoy en día un punto clave para diseñar y explotar plantas de fabricación. Por lo tanto, el consumo de recursos, los impactos ambientales y la forma en que ambos conceptos están vinculados para una producción más limpia deben tenerse en cuenta en cualquier decisión industrial y

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 195 de 231

económica que se tome sobre las instalaciones de fabricación. Esta tesis tiene como objetivo apoyar tal esfuerzo para ser desarrollado.



- Mediante la reducción de la energía primaria se mejora la sostenibilidad de la industria, ya que las emisiones de CO₂ asociadas también se reducen.
- Como se indica en (Cuviella-Suárez et al., 2018), 116.641 TJ por año se dedican a artículos sanitarios en todo el mundo. El 80% de esta energía es energía térmica que podría reducirse en un 47,54%. Eso produce 44.361 TJ por año de GN que se ahorrará además de las emisiones de CO₂ correspondientes. Por lo tanto, existe un amplio campo para implementar esta tecnología en todo el mundo, proporcionando un negocio más sostenible y rentable a partir la fabricación de artículos sanitarios.
- Se ha cuantificado el potencial porcentaje de ahorros de hasta el 50% para la energía y casi la totalidad del agua. Cuando se aplican estos factores a los consumos globales del sector estimados en (Cuviella-Suárez et al., 2018) como se puede ver en la tabla 54 se puede apreciar el marcado impacto de esta industria y la potencial mejora medioambiental.

Tabla 54. Consumos y emisiones estimados en la fabricación de cerámica sanitaria. Fuente: (Cuviella-Suárez et al., 2018)

	PLASTER MOLD TYPE			RESIN MOLD TYPE		
	ENERGY TJ/year	WATER dam ³ /year	CO ₂ Gg/year	ENERGY TJ/year	WATER dam ³ /year	CO ₂ Gg/year
SPAIN	334	61	26.36	285	483	22
EU	19,702	3,579	1,555	16,819	28,470	1,307
World	116,641	21,188	9,207	99,576	168,552	7,739

7.3 LIMITACIONES Y FUTURA INVESTIGACION



- Esta tesis ha limitado los ahorros a las técnicas de recuperación de calor (Broberg Viklund, 2015). Sin embargo, hay otras posibilidades de obtener mejoras en la eficiencia que se pueden implementar debido a la alta dependencia de la energía térmica de este sector industrial (Caglayan and Caliskan, 2018) como pueden ser: la cogeneración, energías renovables, ciclos orgánicos Rankine (ORC)... Estos últimos son otra fuente potencial de investigación, ya que pueden ejecutarse con niveles de temperatura media muy adecuados para temperaturas residuales de gases del horno (Ustaoglu et al., 2017).
- Como del punto de vista medioambiental, toda mejora de eficiencia de la recuperación térmica (Colmenar-Santos et al., 2016a) siempre tiene un el impacto en el aspecto económico cuya incidencia en la sostenibilidad es crucial. El alcance global de esta investigación considera solo el ahorro de recursos. Un análisis del impacto económico de la inversión sería muy útil, teniendo en cuenta el progresivo aumento del precio de los recursos; electricidad, combustibles y agua y su valoración como

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 196 de 231

un bien cada vez más escaso. Aunque el análisis exergético ha aportado una ayuda innegable en la identificación y cuantificación de los puntos de interés en la mejora de eficiencia, la tesis no ha profundizado en el coste de las inversiones acometidas para realizar la optimización.



- El punto central de la tesis es la recuperación térmica del horno túnel ya que funciona de forma continua. El horno de intermitente opera en ciclos cuya temperatura varía desde temperatura ambiente a temperatura máxima de proceso y de nuevo hasta temperatura ambiente. Este procedimiento hace que sea difícil aprovechar el calor recuperado de él. Sin embargo, puede resultar interesante desarrollar con más detalle la forma óptima de aprovechar esta fuente de calor al sistema propuesto de esta tesis para aumentar las reducciones de energía. El precalentamiento del aire de entrada al horno se ha limitado a la temperatura proporcionada por los calores recuperados. Sin embargo, una temperatura de entrada mayor disminuiría el consumo de gas del horno. Se podría estudiar una fuente alternativa de calor de alta calidad para mejorar la eficiencia de los hornos.
- En el alcance de la tesis y en relación a la desalinización de agua, las limitaciones están claramente relacionadas con la solubilidad y la saturación de sales disueltas. Actualmente, este tema es objeto de mucha investigación, por lo tanto, todos los nuevos avances técnicos en este último serían utilizables dentro del ámbito de esta tesis.
- Como punto final cabe resaltar que el conjunto de esta tesis, así como sus conclusiones podrían ser aplicadas a cualquier sector de consumo intensivo de energía térmica y de agua donde se pueda lograr una combinación de calor recuperado y reciclado de agua.

Como punto final se considera importante mencionar y resaltar la aportación que esta tesis supone para el desarrollo de la competitividad y sostenibilidad en la industria moderna y futura dentro del campo de la producción de artículos sanitarios cerámicos y pretende estimular la realización de futuras investigaciones en la misma línea de estudio que desarrollen desarrollar nuevas técnicas para mejorar aún más la eficiencia (Berg, 2015). Según la OMS, 2.300 millones de personas de más de 7.300 millones no tenían instalaciones de saneamiento básicas como inodoros o letrinas en 2015. En 2013, el Vicesecretario General de la ONU emitió un llamamiento a la acción sobre saneamiento que incluye como objetivo en 2025 la eliminación de la defecación al aire libre. Lograr el acceso universal a una fuente básica de agua potable parece estar al alcance, pero el acceso universal al saneamiento básico requerirá esfuerzos adicionales (“WHO Sanitation,” June 19). Esto significa que se fabricarán miles de millones de artículos sanitarios a corto plazo, por lo que se deben diseñar mejores fábricas con las tecnologías más avanzadas y eficientes que sean capaces de optimizar el impacto ambiental en aquellos países en desarrollo donde más se desarrollará esta industria.



 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuiella Suárez	10/03/2021	Página 197 de 231

8 REFERENCIAS



- Akinbode, F.O., 1995. Energy utilization in the clay and pottery processing industries in Nigeria. *Energy* 20, 585–587. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(94\)00086-I](https://doi.org/10.1016/0360-5442(94)00086-I)
- Ammar, Y., Li, H., Walsh, C., Thornley, P., Sharifi, V., Roskilly, A.P., 2013. Reprint of “Desalination using low grade heat in the process industry: Challenges and perspectives.” *Applied Thermal Engineering*, Includes Special Issue: PRO-TEM Special Issue 53, 234–245. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.11.010>
- André Lluís Helleno, Aroldo José Isaias de Moraes, Alexandr Tadeu Simon, 2016. Integrating sustainability indicators and Lean Manufacturing to assess manufacturing processes: Application case studies in Brazilian industry. *Journal of Cleaner Production* 1–12.
- Arjen Y. Hoekst, 2014. Water Scarcity Challenges to Business. *Scientific American*.
- Artin Hatzikioseyan, Pavlina Kousi, 2003. Modelling and thermodynamic Analysis of a Multi-effect Distillation (MED) Plant for Seawater Desalination. *ResearchGate*.
- Berg, S.V., 2015. Energy efficiency in developing countries: Roles for sector regulators. *Energy for Sustainable Development* 29, 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2015.10.002>
- Bigerna, S., Bollino, C.A., Micheli, S., 2016. Renewable energy scenarios for costs reductions in the European Union. *Renewable Energy* 96, Part A, 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.024>
- Boharb, A., Allouhi, A., Saidur, R., Kousksou, T., Jamil, A., Mourad, Y., Benbassou, A., 2016. Auditing and analysis of energy consumption of an industrial site in Morocco. *Energy* 101, 332–342. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.035>
- Bonacina, F., Corsini, A., De Propriis, L., Marchegiani, A., Mori, F., 2015. Industrial Energy Management Systems in Italy: State of the Art and Perspective. *Energy Procedia*, 70th Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, ATI2015 82, 562–569. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.871>
- Bontempi, E., 2017. Raw Materials Substitution Sustainability, *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*. Springer International Publishing.
- Brailsford, S.C., Eldabi, T., Kunc, M., Mustafee, N., Osorio, A.F., 2019. Hybrid simulation modelling in operational research: A state-of-the-art review. *European Journal of Operational Research* 278, 721–737. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.10.025>
- Broberg Viklund, S., 2015. Energy efficiency through industrial excess heat recovery—policy impacts. *Energy Efficiency* 8, 19–35. <https://doi.org/10.1007/s12053-014-9277-3>
- Brückner, S., Liu, S., Miró, L., Radspieler, M., Cabeza, L.F., Lävemann, E., 2015. Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies. *Applied Energy* 151, 157–167. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.147>
- Bulletin of Ceramic Spanish Society [WWW Document], 2004. URL http://boletines.secv.es/upload/2007013192112.contenido_adicional.pdf (accessed 12.2.16).
- C. Frantz, C. Seifert, B., 2015. Thermal Analysis of a Multi Effect Distillation Plant Powered by a Solar Tower Plant - ScienceDirect. Presented at the International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, SolarPACES 2014, pp. 1928–37. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.190>
- Caglayan, H., Caliskan, H., 2018. Energy, exergy and sustainability assessments of a cogeneration system for ceramic industry. *Applied Thermal Engineering* 136, 504–515. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.02.064>
- Ceramic Technology Sanitary-ware, 2010th ed, 2010. . SACMI IMOLA S.C.
- Ceramic World Review 114/2015 [WWW Document], 2015. URL <http://www.ceramicworldweb.it/cww-it/magazines/ceramic-world-review-1142015/> (accessed 12.2.16).

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 198 de 231



- ceramic-industry-roadmap-paving-the-way-to-2050.pdf [WWW Document], 2012. URL <http://cerameunie.eu/topics/cerame-unie-sectors/cerame-unie/ceramic-industry-roadmap-paving-the-way-to-2050/?media=4249&f=Ceramic%20Roadmap%20to%202050%20EN.pdf> (accessed 12.2.16).
- Ceramics - Growth - European Commission [WWW Document], 2017. . Growth. URL /growth/sectors/raw-materials/industries/non-metals/ceramics_en (accessed 12.2.16).
- CERAMIN PROJECT: Energy saving concepts for the European ceramic industry [WWW Document], 2009. . Intelligent Energy Europe. URL <https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/en/projects/ceramin> (accessed 8.2.18).
- Chen, Q., M, K.Ja., Li, Y., Chua, K.J., 2018. Experimental and mathematical study of the spray flash evaporation phenomena. *Applied Thermal Engineering* 130, 598–610. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.018>
- Chernozubov, V.B., Zaoostrovsky, F.P., Shatsillo, V.G., Golub, S.I., Novilov, E.P., Tkach, V.I., 1966. Prevention of scale formation in distillation desalination plants by means of seeding. *Desalination* 1, 50–60. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)84007-2](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)84007-2)
- Christ, K.L., Burritt, R.L., 2017. Water management accounting: A framework for corporate practice. *Journal of Cleaner Production* 152, 379–386. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.147>
- Christos, Agrafiotis, Theocharis, Tsoutsos, 2001. Energy saving technologies in the European ceramic sector: a systematic review - ScienceDirect. *Applied Thermal Engineering* 21, 1231–1249. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(01\)00006-0](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(01)00006-0)
- Ciacco, E.F.S., Rocha, J.R., Coutinho, A.R., 2017. The energy consumption in the ceramic tile industry in Brazil. *Applied Thermal Engineering* 113, 1283–1289. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.068>
- Cioccolanti, L., Savoretti, A., Renzi, M., Caresana, F., Comodi, G., 2015. Design and test of a single effect thermal desalination plant using waste heat from m-CHP units. *Applied Thermal Engineering* 82, 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.02.047>
- Colla, V., Branca, T.A., Rosito, F., Lucca, C., Vivas, B.P., Delmiro, V.M., 2016. Sustainable Reverse Osmosis application for wastewater treatment in the steel industry. *Journal of Cleaner Production, Special Volume: SDEWES 2014 - Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems* 130, 103–115. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.025>
- Colmenar-Santos, A., Rosales-Asensio, E., Borge-Diez, D., Collado-Fernández, E., 2016a. Evaluation of the cost of using power plant reject heat in low-temperature district heating and cooling networks. *Applied Energy* 162, 892–907. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.161>
- Colmenar-Santos, A., Zarzuelo-Puch, G., Borge-Diez, D., García-Diéguez, C., 2016b. Thermodynamic and exergoeconomic analysis of energy recovery system of biogas from a wastewater treatment plant and use in a Stirling engine. *Renewable Energy* 88, 171–184. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.001>
- Communication Environmental Website | GREEN STORY | TOTO [WWW Document], n.d. URL <http://www.toto.co.jp/greenchallenge/technology/story/14/en/> (accessed 12.2.16).
- Cuviella-Suárez, C., Borge-Diez, D., Colmenar-Santos, A., 2021. *Water and Energy Use in Sanitary-ware Manufacturing: Using Modelling Processes for Water and Energy Accounting and Decarbonisation, Green Energy and Technology*. Springer International Publishing.
- Cuviella-Suárez, C., Colmenar-Santos, A., Borge-Diez, D., López-Rey, Á., 2021. Reduction of water and energy consumption in the sanitary ware industry by an absorption machine operated with recovered heat. *Journal of Cleaner Production* 292, 126049. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126049>
- Cuviella-Suárez, C., Colmenar-Santos, A., Borge-Diez, D., López-Rey, Á., 2019a. Heat recovery in sanitary-ware industry applied to water and energy saving by multi-effect distillation. *Journal of Cleaner Production* 213, 1322–1336. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.269>
- Cuviella-Suárez, C., Colmenar-Santos, A., Borge-Diez, D., López-Rey, Á., 2018. Management tool to optimize energy and water consumption in the sanitary-ware industry. *Journal of Cleaner Production* 197, Part 1, 280–296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.195>

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 199 de 231



- Cuviella-Suárez, C., Colmenar-Santos, A., Castro-Gil, M., 2012. Tri-generation system to couple production to demand in a combined cycle. *Energy* 40, 271–290. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.073>
- Cuviella-Suárez, C., Peiró, J.J.B., Borge-Díez, D., Colmenar-Santos, A., 2019b. Exergoeconomics in the sanitary-ware industry to reduce energy and water consumptions. *AIP Conference Proceedings* 2190, 020061. <https://doi.org/10.1063/1.5138547>
- Cuviella-Suárez, Carlos, Colmenar-Santos, Antonio, Borge-Díez, David, Rosales-Asensio, Enrique, 2019. Sanitary-ware factories: heat recovery strategies to optimize energy and water consumption. *Energy Procedia, Technologies and materials for Renewable Energy, Environment and sustainability* 157, 719–736. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.238>
- Dastgerdi, H.R., Whittaker, P.B., Chua, H.T., 2016. New MED based desalination process for low grade waste heat. *Desalination* 395, 57–71. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.05.022>
- Delpéch, B., Axcell, B.P., Jouhara, H., 2017. A review on waste heat recovery from exhaust in the ceramics industry. *E3S Web of Conferences* 22, 00034. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172200034>
- Dubreuil, A., Assoumou, E., Bouckaert, S., Selosse, S., Marzi, N., 2013. Water modeling in an energy optimization framework – The water-scarce middle east context. *Applied Energy, Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems* 101, 268–279. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.032>
- Effenberger, F., Hilbert, A., 2016. Towards an energy information system architecture description for industrial manufacturers: Decomposition & allocation view. *Energy* 112, 599–605. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.106>
- El Ebaidi, Saad K., 2013. WATER CHEMICAL ANALYSIS FOR DIFFERENT STAGES IN TOBRUK DESALINATION PLANT. Presented at the The 13 th International Conference on Materials Science and its Applications in Oil and Gas Industries, Benghazi.
- Escasez de agua en la union europea [WWW Document], 2010. URL http://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/factsheets/water_scarcity/es.pdf (accessed 12.2.16).
- European Commission - PRESS RELEASES - Press release - 2030 climate and energy goals for a competitive, secure and low-carbon EU economy [WWW Document], 2016. URL <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-final-energy-consumption-by-mode/2030-climate-and-energy-goals> (accessed 12.2.16).
- European Commission - PRESS RELEASES - Press release - Sustainable Development: EU sets out its priorities [WWW Document], 2016. URL http://europa.eu/rapid/press-release_IP-16-3883_en.htm (accessed 6.12.19).
- Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T., Melin, T., 2007. State-of-the-art of reverse osmosis desalination. *Desalination* 216, 1–76. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.12.009>
- Galati, M., Iuliano, L., Salmi, A., Atzeni, E., 2017. Modelling energy source and powder properties for the development of a thermal FE model of the EBM additive manufacturing process. *Additive Manufacturing* 14, 49–59.
- Ge, Z., Yang, C., Liu, Y., Du, X., Yang, L., Yang, Y., 2014. Analysis of plate multi-effect distillation system coupled with thermal power generating unit. *Applied Thermal Engineering* 67, 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.072>
- Giacone, E., Mancò, S., 2012. Energy efficiency measurement in industrial processes. *Energy* 38, 331–345. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.11.054>
- Giuseppe Ingarao, 2017. Manufacturing strategies for efficiency in energy and resources use: The role of metal shaping processes. *Journal of Cleaner Production* 142, 2872–2886.
- Goldemberg, J., 1994. An energy manual for practicing engineers. *Energy for Sustainable Development* 1, 59. [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60056-3](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60056-3)
- Growth - European Commission - Publications 2008 [WWW Document], 2008. URL <http://ec.europa.eu/growth/tools->

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 200 de 231



- databases/newsroom/cf/itemdetail.cfm?item_id=3440&lang=en&title=FWC-Sector-Competitiveness-Studies---Competitiveness-of-the-Ceramics-Sector (accessed 12.2.16).
- Grubbström, R.W., 2015. On the true value of resource consumption when using energy in industrial and other processes. *International Journal of Production Economics*, Current Research Issues in Production Economics 170, Part B, 377–384. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.07.011>
- Habib, M.A., Hasanuzzaman, M., Hosenuzzaman, M., Salman, A., Mehadi, M.R., 2016. Energy consumption, energy saving and emission reduction of a garment industrial building in Bangladesh. *Energy* 112, 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.062>
- Jatinder Madan, Maesh Mani, Jae Hyun Lee, Kevin W. Lyons, 2014. Energy performance evaluation and improvement of unit-manufacturing processes: injection molding case study. *Journal of Cleaner Production* 105, 157–170.
- Johansson, M.T., 2015. Improved energy efficiency within the Swedish steel industry—the importance of energy management and networking. *Energy Efficiency* 8, 713–744. <https://doi.org/10.1007/s12053-014-9317-z>
- Kaya, S., Küçükada, K., Mançuhan, E., 2008. Model-based optimization of heat recovery in the cooling zone of a tunnel kiln. *Applied Thermal Engineering* 28, 633–641. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.04.002>
- King, Alan G., 2001. *Ceramic Technology and Processing - 1st Edition*, 1st ed. Andrew, William. Elsevier.
- Lamine, C.M., Said, Z., 2014. Energy Analysis of Single Effect Absorption Chiller (LiBr/H₂O) in an Industrial Manufacturing of Detergent. *Energy Procedia, Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability (TMREES14 – EUMISD)* 50, 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.013>
- Lazzaretto, A., Andrea, T., 2001. Analytical and Neural Network Models for Gas Turbine Design and Off-Design Simulation. *International Journal of Thermodynamics* 4, 173–182. <https://doi.org/10.5541/ijot.78>
- Li, C., Goswami, D.Y., Shapiro, A., Stefanakos, E.K., Demirkaya, G., 2012. A new combined power and desalination system driven by low grade heat for concentrated brine. *Energy, Energy and Exergy Modelling of Advance Energy Systems* 46, 582–595. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.07.050>
- LIFE_ENVIP.pdf [WWW Document], 2012. URL http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n_proj_id=4630&docType=pdf (accessed 12.2.16).
- Lv, J., Gu, F., Zhang, W., Guo, J., 2019. Life cycle assessment and life cycle costing of sanitary ware manufacturing: A case study in China. *Journal of Cleaner Production* 238, 117938. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117938>
- Maheshwari, A., Prasad, V., Gudi, R.D., Biswas, P., 2019. Systems engineering based advanced optimization for sustainable water management in refineries. *Journal of Cleaner Production* 224, 661–676. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.164>
- Matsumoto, A., 2015. Slip-Casting by Water-Absorbing Resin Mold Enables Crack-Free CeRamic MoldiNg System And Products With Partially Different Thicknesses, in: Ohji, T., Singh, M., Halbig, M. (Eds.), *Advanced Processing and Manufacturing Technologies for Nanostructured and Multifunctional Materials II*. John Wiley & Sons, Inc., pp. 45–54. <https://doi.org/10.1002/9781119211662.ch6>
- May, G., Stahl, B., Taisch, M., Kiritsis, D., 2017. Energy management in manufacturing: From literature review to a conceptual framework. *Journal of Cleaner Production* 1–26.
- Merlin, K., Soto, J., Delaunay, D., Traonvouez, L., 2016. Industrial waste heat recovery using an enhanced conductivity latent heat thermal energy storage. *Applied Energy* 183, 491–503. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.007>
- Mezquita, A., Boix, J., Monfort, E., Mallol, G., 2014. Energy saving in ceramic tile kilns: Cooling gas heat recovery. *Applied Thermal Engineering* 65, 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.01.002>

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 201 de 231



- Miró, L., Brueckner, S., McKenna, R., Cabeza, L.F., 2016. Methodologies to estimate industrial waste heat potential by transferring key figures: A case study for Spain. *Applied Energy* 169, 866–873. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.089>
- Nabavi-Pelesaraei, A., Abdi, R., Rafiee, S., 2013a. Energy use pattern and sensitivity analysis of energy inputs and economical models for peanut production in Iran. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences* 5, 2193–2202.
- Nabavi-Pelesaraei, A., Rafiee, S., Mohtasebi, S.S., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Chau, K., 2019. Assessment of optimized pattern in milling factories of rice production based on energy, environmental and economic objectives. *Energy* 169, 1259–1273. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.106>
- Nabavi-Pelesaraei, A., Shaker-Kouhi, S., Dehpour, M., 2013b. Modeling and optimization of energy inputs and greenhouse gas emissions for eggplant production using artificial neural network and multi-objective genetic algorithm. *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research* 1478–1489.
- Nannarone, A., Toro, C., Sciubba, E., 2017. Multi-Effect Distillation Desalination Process: Modeling and Simulation, in: ResearchGate. Presented at the THE 30TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON EFFICIENCY, COST, OPTIMIZATION, SIMULATION AND ENVIRONMENTAL IMPACT OF ENERGY SYSTEMS, At San Diego, USA, San Diego, USA.
- NASA Climate Change [WWW Document], 2019. . Climate Change: Vital Signs of the Planet. URL <https://climate.nasa.gov/> (accessed 6.12.19).
- Nicolau, V. de P., Dadam, A.P., 2009. Numerical and experimental thermal analysis of a tunnel kiln used in ceramic production. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 31, 297–304. <https://doi.org/10.1590/S1678-58782009000400003>
- Ophir, A., Gendel, A., 1994. Adaptation of the multi-effect distillation (MED) process to yield high purity distillate for utilities, refineries and chemical industry. *Desalination* 98, 383–390. [https://doi.org/10.1016/0011-9164\(94\)00164-2](https://doi.org/10.1016/0011-9164(94)00164-2)
- Owen, A., Brockway, P., Brand-Correa, L., Bunse, L., Sakai, M., Barrett, J., 2017. Energy consumption-based accounts: A comparison of results using different energy extension vectors. *Applied Energy* 190, 464–473. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.089>
- Petek, J., Glavič, P., Kostevšek, A., 2016. Comprehensive approach to increase energy efficiency based on versatile industrial practices. *Journal of Cleaner Production* 112, Part 4, 2813–2821. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.046>
- Reference Document on Best Available Techniques in the Ceramic Manufacturing Industry, 2007.
- Rehfeldt, M., Fleiter, T., Toro, F., 2018. A bottom-up estimation of the heating and cooling demand in European industry. *Energy Efficiency* 11, 1057–1082. <https://doi.org/10.1007/s12053-017-9571-y>
- Roberts, F., 1978. The aims, methods and uses of energy accounting. *Applied Energy* 4, 199–217. [https://doi.org/10.1016/0306-2619\(78\)90003-X](https://doi.org/10.1016/0306-2619(78)90003-X)
- Roldán-Blay, C., Escrivá-Escrivá, G., Roldán-Porta, C., Álvarez-Bel, C., 2017. An optimisation algorithm for distributed energy resources management in micro-scale energy hubs. *Energy* 132, 126–135. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.038>
- Rosen, M.A., 2002. Clarifying thermodynamic efficiencies and losses via exergy. *Exergy, An International Journal* 2, 3–5. [https://doi.org/10.1016/S1164-0235\(01\)00054-1](https://doi.org/10.1016/S1164-0235(01)00054-1)
- Sa, A., Thollander, P., Cagno, E., 2017. Assessing the driving factors for energy management program adoption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 74, 538–547. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.061>
- Saidur, R., Hossain, M.S., Islam, M.R., Fayaz, H., Mohammed, H.A., 2011. A review on kiln system modeling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 2487–2500. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.020>

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 202 de 231

- Sathitbun-anan, S., Fungtammasan, B., Barz, M., Sajjakulnukit, B., Pathumsawad, S., 2014. Energy efficiency and greenhouse gas emission reduction potentials in sugar production processes in Thailand. *Energy for Sustainable Development* 23, 266–274. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2014.09.010>
- Schulze, M., Nehler, H., Ottosson, M., Thollander, P., 2016. Energy management in industry – a systematic review of previous findings and an integrative conceptual framework. *Journal of Cleaner Production* 112, Part 5, 3692–3708. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.060>
- Seferlis, P., Varbanov, P.S., Klemeš, J.J., 2015. Applied thermal engineering solutions through process integration, modelling and optimisation. *Applied Thermal Engineering* 89, 1001–1005. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.060>
- Sequía y consumo excesivo de agua en Europa — Agencia Europea de Medio Ambiente [WWW Document], n.d. URL <http://www.eea.europa.eu/es/pressroom/newsreleases/sequia-y-consumo-excesivo-de-agua-en-europa> (accessed 12.2.16).
- Shao, J., Taisch, M., Ortega Mier, M., 2016. A study on a configuration model for facilitating sustainable consumption: A case involving the automobile industry in Italy. *Journal of Cleaner Production* 137, 507–515. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.130>
- Shiralkar, K.Y., Kancharla, S.K., Shah, N.G., Mahajani, S.M., 2014. Energy improvements in jaggery making process. *Energy for Sustainable Development* 18, 36–48. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2013.11.001>
- Taylor, P.B., Wadkin, J.W., 1986. Industrial heat recovery projects supported through the energy efficiency demonstration scheme. *Journal of Heat Recovery Systems* 6, 83–92. [https://doi.org/10.1016/0198-7593\(86\)90175-X](https://doi.org/10.1016/0198-7593(86)90175-X)
- Thollander, P., Kimura, O., Wakabayashi, M., Rohdin, P., 2015. A review of industrial energy and climate policies in Japan and Sweden with emphasis towards SMEs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 50, 504–512. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.102>
- Tsatsaronis, G., Cziśla, F., Gao, Z., 2003. Avoidable thermodynamic inefficiencies and costs in energy conversion systems. Part 1: Methodology. *Proceedings of ECOS 2003* 2, 809–814.
- Uhlmann, E., Reinkober, S., Hollerbach, T., 2016. Energy Efficient Usage of Industrial Robots for Machining Processes. *Procedia CIRP, The 23rd CIRP Conference on Life Cycle Engineering* 48, 206–211. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.241>
- Urbaniec, K., Mikulčić, H., Duić, N., Lozano, R., 2016. SDEWES 2014 – Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. *Journal of Cleaner Production, Special Volume: SDEWES 2014 - Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems* 130, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.062>
- Ustaoglu, A., Alptekin, M., Akay, M.E., 2017. Thermal and exergetic approach to wet type rotary kiln process and evaluation of waste heat powered ORC (Organic Rankine Cycle). *Applied Thermal Engineering* 112, 281–295. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.053>
- van Vugt, M., Moye, A., Sivakumar, S., 2019. Computational modelling approaches to meditation research: why should we care? *Current Opinion in Psychology, Mindfulness* 28, 49–53. <https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2018.10.011>
- Various, 2014. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*, 8th ed. World Meteorological Organization.
- Vittorini, D., Cipollone, R., 2016. Energy saving potential in existing industrial compressors. *Energy* 102, 502–515. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.115>
- Vuckovic, G., Vukic, M., Stojilkovic, M., 2012. Avoidable and unavoidable exergy destruction and exergoeconomic evaluation of the thermal processes in a real industrial plant. *Thermal Science* 16, S433–S446. <http://dx.doi.org/10.2298/TSCI120503181V>
- Wang, X., El-Farra, N.H., Palazoglu, A., 2017. Optimal scheduling of demand responsive industrial production with hybrid renewable energy systems. *Renewable Energy, Special Issue: Control and Optimization of Renewable Energy Systems* 100, 53–64. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.051>

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 203 de 231

- Weisser, D., 2007. A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies. *Energy* 32, 1543–1559. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.01.008>
- WHO Sanitation [WWW Document], June 19. . WHO news-room fact sheets. URL <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/sanitation>
- Yin, Q., Du, W.-J., Ji, X.-L., Cheng, L., 2016. Optimization design and economic analyses of heat recovery exchangers on rotary kilns. *Applied Energy* 180, 743–756. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.042>
- Zhang, Y., Wang, J., Redemann, T., Specht, E., 2015. Thermal behavior of kiln cars while traveling through a tunnel kiln. *Advances in Mechanical Engineering* 7, 1687814015588468. <https://doi.org/10.1177/1687814015588468>
- Zhang, Z., 1997. Energy efficiency and environmental pollution of brickmaking in China. *Energy* 22, 33–42. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(96\)00078-3](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(96)00078-3)

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 204 de 231

9 “CURRICULUM VITAE” DEL DOCTORANDO



9.1 Titulaciones

- **2009-2012** Máster Oficial en Investigación en Tecnologías Industriales. Energía. UNED ETS Ingenieros Industriales. Proyecto fin de Máster de un programa de simulación termo-económica de una central termoeléctrica de ciclo combinado hibridada con energía solar.
- **2007-2009** Máster en Ciclos Combinados, Cogeneración y sistemas avanzados de Generación Eléctrica. Proyecto fin de Máster de un ciclo combinado con aprovechamiento térmico para climatización y destilación de agua de mar para suministro de una ciudad de vacaciones.
- **1983 - 1991** Escuela Técnica de Ingenieros Industriales de Gijón (Ingeniero Industrial Superior). Proyecto fin de carrera de un programa de gestión de costes de la mala calidad.



9.2 Experiencia profesional



- **Mayo 2016 – Actualidad:** Responsable de la gestión energética y Director de proyectos de nuevas instalaciones y eficiencia energética en el Departamento de Ingeniería de la empresa ROCA Sanitario S.A.
- **Marzo 2009 – Mayo 2016:** Director de proyectos de nuevas instalaciones y eficiencia energética en el Departamento de Ingeniería de la empresa ROCA Sanitario S.A.
- **Abril 2001 – Marzo 2009:** Director de proyectos de nuevas instalaciones en el Departamento de Ingeniería de la empresa ROCA Sanitario S.A.
- **Mayo 2000 – Abril 2001:** Realización de proyectos de instalaciones eléctricas en la empresa de distribución eléctrica DIMELSA S.L.
- **Noviembre 1999 – Mayo 2000:** Programación de una base de datos de gestión de la producción en la empresa de instalaciones eléctricas ELECTRONEC S.L.
- **Septiembre 1997 – Agosto 1999:** Director de proyecto expatriado en Moscú en la empresa McHUGH Int.
- **Agosto 1995 – Agosto 1997:** Director técnico en la empresa de instalaciones eléctricas ELECTRONEC S.L.
- **Noviembre 1994 – Agosto 1995:** Operador en una estación de DATABASE para digitalizar la red eléctrica urbana de Hidroeléctrica del Cantábrico (Actualmente EDP) en la empresa INGECA S.L.

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 205 de 231

- **Enero 1994 – Agosto 1994:** Director técnico en la empresa de instalaciones de gas ATECA S.L
- **Septiembre 93 – Diciembre 93:** Operador en una estación de DATABASE para digitalizar la red eléctrica urbana de Hidroeléctrica del Cantábrico (Actualmente EDP) en la empresa INGECA S.L.
- **Abril 93 – Julio 93:** Redacción de un manual de calidad en la empresa COHEGA S.A
- **Julio 90 – Julio 91:** Operador en una estación de CAD para digitalizar la red eléctrica urbana de Hidroeléctrica del Cantábrico (Actualmente EDP) en la empresa INGECA S.L.

9.3 Publicaciones

- Trigeneración con ciclo combinado, climatización y desalación. Revista DYNA ISSN: 0012-7361. Vol. 83, nº4 de Mayo 2008. Pag. 239-245.
- Trigeration system to couple production to demand in a combined cycle. ENERGY ISSN: 0360-5442. Vol. 40 Issue 1 pags. 271-290. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.06.195
- Thermal Power Plants, Advantages & Performance Assessment (Chapter 3). Oliver Hill Editor. Nova Science Publishers Inc. ISBN-10: 1536123048. ISBN-13: 978-1536123043
- Management tool to optimize energy and water consumption in the sanitary-ware industry. Journal of Cleaner Production. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.06.195. ISSN: 0959-6526. Volume 197, Part 1, 1 October 2018, Pages 280-296.
- Distributed Wind Energy Generation (Chapter 5). Series: Renewable Energy: Research, Development and Policies. Pub. Date: 2018 – November. ISBN: 978-1-53614-207-5. NOVA SCIENCE PUBLISHERS.
- Alternative Energy Systems in Buildings (Chapter 2). Series Energy Policies, Politics and Prices. Pub. Date: 2018 – December. ISBN: 978-1-53614-203-7. NOVA SCIENCE PUBLISHERS.
- Renewable Electric Power Distribution Engineering (Chapter 3) Series: Renewable Energy: Research, Development and Policies. Pub. Date: 2018 – December. ISBN: 978-1-53614-202-0. NOVA SCIENCE PUBLISHERS.
- Sanitary-ware factories: heat recovery strategies to optimize energy and water consumption. TMREES Conference Series: Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability. TMREE18 Int'l Conf. Athens-Greece/September 19-21, 2018. ENERGY PROCEDIA 157 (2019) 719-736. ISSN: 1876-6102.
- Heat recovery in sanitary-ware industry applied to water and energy saving by multi-effect distillation. Journal of Cleaner Production. Volume 213, 10 March 2019, Pages 1322-1336. ISSN: 0959-6526.
- Exergoeconomics in the sanitary-ware industry to reduce energy and water consumptions. TMREES Conference Series. Greece 4-6th of September. ISSN:1551-7616. AIP “American Institute of Physics” Conference Proceedings 2190, 020061 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5138547>.
- Reduction of Water and Energy Consumption in the Sanitary Ware Industry by an Absorption Machine Operated with Recovered Heat. Journal of Cleaner Production. ISSN: 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126049>
- Water and Energy Use in Sanitary-ware Manufacturing. Using Modelling Processes for Water and Energy Accounting and Decarbonisation. ISBN 978-3-030-72490-0. ISSN 1865-3529. Springer International Publishing. <https://www.springer.com/gp/book/9783030724900>

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 206 de 231

ANEXO I: Mensaje informativo de la Editorial SPRINGER al Director de tesis del incremento del factor de impacto de la revista “*Journal of Cleaner Production*”

[EXTERNAL] RV: The journal you published in has increased in quality

Antonio Colmenar <acolmenar@ieec.uned.es>

Vie 26/02/2021 10:18

Para: Carlos Cuiella <carlos.cuiella@roca.net>; 'David Borge-Diez' <david.borge@unileon.es>

WARNING - EXTERNAL EMAIL

Please do not click on any link or open any attachment unless the source of the email is trusted and the content is secure. If in doubt about the legitimacy of this email, please contact to ITSupport for validation.

Real Sender: **acolmenar@ieec.uned.es** Source Server: **mail-eopbgr00068.outbound.protection.outlook.com**

Saludos,



Dr. Antonio Colmenar Santos
Profesor Titular acreditado a Catedrático
Tel. 34-913987788
e-mail: acolmenar@ieec.uned.es

Web personal: <http://tinyurl.com/y3kqe4dy>

Dpto. de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Control, Telemática y Química Aplicada a la Ingeniería
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales / UNED
C/ Juan del Rosal, 12
Ciudad Universitaria, s/n
28040 Madrid - ESPAÑA

De: STMJ Metrics Team <service@author.email.elsevier.com>
Enviado el: jueves, 25 de febrero de 2021 14:32
Para: acolmenar@ieec.uned.es
Asunto: The journal you published in has increased in quality



If you are unable to view this message correctly, [click here](#)

CiteScore Tracker Update
We think the journal you chose is moving up

– here is why

Dear Author,

Good news. You published an article in **Journal of Cleaner Production** and its 2020 CiteScore looks on track to be higher than its 2019 CiteScore of **10.9**.

As per February 2021, the journal's 2020 CiteScore Tracker is already at **12.9**, an improvement over the previous year.

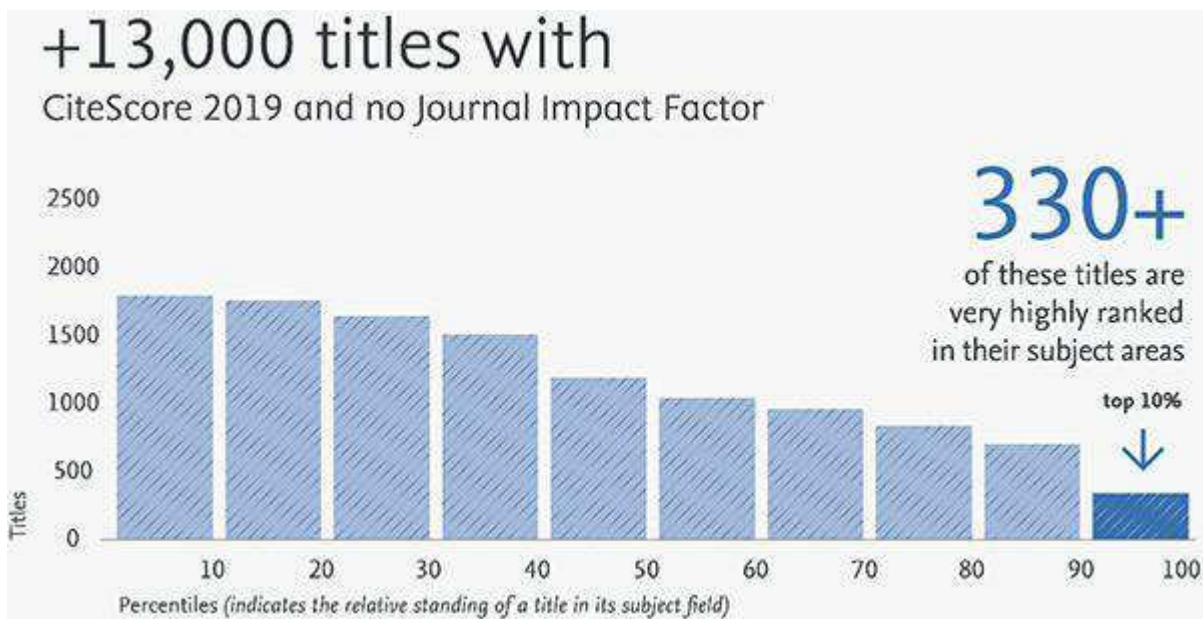
CiteScore includes a CiteScore Tracker for 2020, which is updated monthly, until the new annual value has been fully reached by June 2021.

Powered by Scopus, CiteScore is a simple way of measuring the citation impact of sources, such as journals. It is a comprehensive, current, clear and free set of metrics that support the research community.



For more information, visit the [CiteScore FAQ](#) on Scopus.

Did you know that there are over 13,000 titles which have a CiteScore 2019 but no Impact Factor? Of these 13,000 titles, more than 330 of the titles are very highly ranked (in the top 10%) of their specific subject area.



Find out more [here](#).

Use CiteScore metrics to:

- Evaluate the journal against its competitors
- Consider submitting your next paper



[See metrics & ranking](#)

With best regards,
STMJ Metrics Team

[Elsevier's Author Resources](#) help to discover the tools to support you on your research journey.

If your paper has been accepted for publication, you can track it using [Elsevier's Article Tracking service](#).

If you do not wish to receive any further Service messages, please send us an [email](#).





This is a Service message, sent to you by Elsevier STM Journals.

Copyright © 2021 Elsevier Limited All rights reserved. | [Elsevier Privacy Policy](#)
Elsevier Limited, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB UK

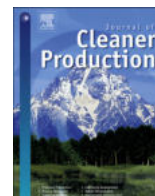
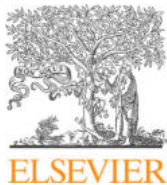
AVISO LEGAL. Este mensaje puede contener información reservada y confidencial. Si usted no es el destinatario no está autorizado a copiar, reproducir o distribuir este mensaje ni su contenido. Si ha recibido este mensaje por error, le rogamos que lo notifique al remitente.

Le informamos de que sus datos personales, que puedan constar en este mensaje, serán tratados en calidad de responsable de tratamiento por la UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA (UNED) c/ Bravo Murillo, 38, 28015-MADRID-, con la finalidad de mantener el contacto con usted. La base jurídica que legitima este tratamiento, será su consentimiento, el interés legítimo o la necesidad para gestionar una relación contractual o similar. En cualquier momento podrá ejercer sus derechos de acceso, rectificación, supresión, oposición, limitación al tratamiento o portabilidad de los datos, ante la UNED, [Departamento de Política Jurídica de Seguridad de la Información](#), o a través de la [Sede electrónica](#) de la Universidad.

Para más información visite nuestra [Política de Privacidad](#).

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 207 de 231

ANEXO II: *"Management tool to optimize energy and water consumption in the sanitary-ware industry"*. COPIA DE LA PUBLICACIÓN



Management tool to optimize energy and water consumption in the sanitary-ware industry



Carlos Cuviella-Suárez, Antonio Colmenar-Santos*, David Borge-Diez, África López-Rey

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control, UNED, Juan del Rosal, 12 – Ciudad Universitaria, 28040, Madrid, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 3 November 2017

Received in revised form

15 June 2018

Accepted 16 June 2018

Available online 21 June 2018

Keywords:

Ceramic industry

Energy saving

CO₂ emissions

Water saving

Sanitary-ware production

ABSTRACT

Over the years the ceramic industry has been widely studied. However, little attention has been devoted to the particular area of sanitary-ware manufacturing, although it is a great consumer of energy and water. The aim of this research is to analyze and quantify how and where energy and water are consumed by mapping the whole process. Once the key points and amounts of consumption are located, a global map of single flows is established by thermodynamically modeling every relevant sub-process as a balance of mass and energy. The research focuses on demonstrating that this modeled map can be optimized by diverting energy flows from one sub-process to another searching for the minimum incoming energy within the global process, which derives in a minimization of residual energy, waste water and emissions. Results show that almost one third of the energy and emissions can be saved and more than a half of the water can be saved as well in the resin mold technology of manufacturing. This research provides a tool to know how the resources are consumed in the sanitary-ware industry and show the possibilities to reduce them as well as the global impact.

© 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

One of the main environmental targets of the European Union (EU) is to reduce CO₂ emissions by 40% from 1990, and increase renewable energy by 27% up to 2030, as per press release in January 2014 (“European Commission - PRESS RELEASES - Press release - 2030 climate and energy goals for a competitive, secure and low-carbon EU economy,” 2014). Besides, there is a long term commitment that by 2050, the EU aims to cut its emissions substantially – by 80–95% compared to 1990 levels as part of the efforts required by developed countries as a group (European Commission, 2016a). This commitment includes some key proposals to achieve results like energy efficiency (Becchio et al., 2015), and a deep reform of the emissions trading system (ETS). In the XXI international conference about climate change, held in Paris in late 2015 an international agreement concerning the methods to reduce climate change cutting down total emissions to 45% was signed (European Commission, 2016b). This agreement could become a legally binding agreement if it is ratified by at least 50% of members who represent 55% of total emissions.

Other important factors affecting climate change are water

consumption (“Sequía y consumo excesivo de agua en Europa – Agencia Europea de Medio Ambiente,” 2009), the lack of water (Escasez de agua en la unión europea, 2011) and effluent discharges. In the near future water could become a scarce resource thus many regions might start to experience its supply as a problem. The EU has specially raised awareness about this matter, dedicating specific supporting programs for technologies development and environmental protection (European Commission - Environment - LIFE Programme, 2012). Some research is being devoted to this subject (Colmenar-Santos et al., 2016c).

Within this framework of energetical and environmental reforms, need arises for countries to start legal development in order to facilitate the fulfillment of their commitment (Thollander et al., 2015). In this regard, manufacturing companies must approach their modernization in terms of energy consumption (Bonacina et al., 2015). It is not just energy saving but a legal matter (Bigerna et al., 2016).

“Energy management” is a term which is developing into a very promising means to reduce, energy and related costs (Schulze et al., 2016). Though energy management is crucial in the current industrial network, some authors consider a wider perspective of the concept including other resources, raw materials and CO₂ emissions reduction. Indicators can be applied to quantify the environmental sustainability of raw materials substitution (Bontempi, 2017a; b). Embodied energy and CO₂ footprint are proper

* Corresponding author.

E-mail address: acolmenar@ieec.uned.es (A. Colmenar-Santos).

Abbreviations	
ACIMAC	Association of Italian Manufacturers of Machinery and Equipment of Ceramics
BAT	Best Available Technologies EU: European Union
BRIC	Brazil, Russia, India and China
ETS	Emissions Trading System
EU	European Union
HVU	Heating and Ventilation Unit
ISO	International Organization for Standardization
LNG	Liquefied Natural Gas
LPG	Liquefied Petroleum Gas
NAFTA	North America Free Trade Agreement
NG	Natural gas
pcs	Pieces
RH	Relative Humidity
R.O.	Reverse Osmosis
Sim Coeff	Simultaneity Coefficient
Use Coeff	Use Coefficient
yr	Year
<i>Formulae</i>	
\dot{m}_{a_i}	Inlet air mass flows (kg/s)
\dot{m}_{NG}	Inlet natural gas flow
\dot{m}_{g_j}	Outlet exhaust gas mass flows (kg/s)
W_{el_i}	Electrical input energy flows (kW)
W_{th_j}	Thermal input energy flows (kW)
W_{NG_k}	Natural gas thermo-chemical energy flow (kW)
W_{th_h}	Thermal output energy flows (kW)
W_{losses}	Thermal losses (kW)
\dot{m}_{ra}	Inlet roof air flow (kg/s)
\dot{m}_{ca}	Inlet combustion air flow (kg/s)
\dot{m}_{ea}	Inlet excess air flow (kg/s)
\dot{m}_{rc}	Inlet rapid cooling air flow (kg/s)
\dot{m}_{sc}	Inlet slow cooling air flow (kg/s)
\dot{m}_{cv}	Inlet contravec (air curtain) air flow (kg/s)
\dot{m}_{ex}	Outlet exhaust flow (kg/s)
\dot{m}_{exrc}	Outlet rapid cooling exhaust flow (kg/s)
\dot{m}_{exsc}	Outlet slow cooling exhaust flow (kg/s)
\dot{m}_{in}	Inlet mass flow (kg/s)
h_{in}	Inlet enthalpy flow (kW/s)
\dot{m}_{out}	Outlet mass flow (kg/s)
h_{out}	Outlet enthalpy flow (kW/s)
\dot{m}_{fa}	Inlet fresh air flow (kg/s)
\dot{m}_{exsa}	Outlet saturated air flow (kg/s)

indicators to evaluate the sustainability of the raw materials. In this research water is included as a valuable resource to be taken into consideration.

Due to the increasing price of energy and global interest in sustainability, the development of resources management is taking an important role as a support function in industrial companies. The impact of the energy in the final cost is increasingly providing relevance within the costs management. There are some key factors on which the management plan depends (Sa et al., 2017). Many new companies addressing energy related issues have been created during last few years. In fact, ISO released in June 2011 the standard ISO 50001, derived from ISO 9001 referring to energy management systems. The standard aims to help organizations continually reduce their energy use, and therefore their energy costs and their greenhouse gas emissions (Giacone and Mancò, 2012).

As a conclusion it can be said that the management and operation of a company's energy system is of great importance in order to position themselves as leader markets, providing long term company life throughout sustainability and cost reductions producing, finally an environmental impact reduction. The sanitary-ware industry lacks any research in this field. This paper aims to contribute to improve the competitiveness of this industrial sector providing a tool to achieve better performance and sustainability. It provides a practical tool to evaluate the consumptions of water and energy in the field of the sanitary-ware manufacturing to better design new future facilities.

The paper analyzes the state of the art in the field of sanitary-ware manufacturing concluding that two main technologies lead the production in modern factories. Consumptions are then analyzed for both of them by means of a proper mathematical model and results are compared. In view of the results key points to reduce consumptions are identified so they can be easily acted upon.

2. State of the art in the sanitary ware manufacturing

Looking for research in the field of resources management in manufacturing, it was found that no research in this field had been carried out related to sanitary-ware production. G. May et al. have

widely studied this subject over 365 articles published from 1995 to 2015 (May et al., 2016). They concluded that the integration of energy efficiency in manufacturing has been recognized as a means to foster economic and environmental performance, increase competitiveness and spur innovation. As stated in the introduction, energy and resource consumption is a major focus for industry, policy-makers, and society with manufacturing units and factories playing a critical role to achieve these targets but there is a lack of research in this regard for the sanitary-ware industry and this is the main aim of this study.

On the other hand, state of art sanitary-ware manufacturing has been studied in detail in the Reference Document on Best Available Techniques in the Ceramic Manufacturing Industry (BAT) (cer_bref_0807.pdf, 2007).

General process for the two most extended technologies, associated consumptions and the global impact for this particular industrial sector are described in Appendix A.

2.1. Aim of this research

From all the data collected, some conclusions were made:

- A great deal of energy is involved
- Thermal energy is about four times the electrical energy
- Electricity consumption is slightly greater in plaster molds manufacturing
- Water consumption is eight times greater in resin molds manufacturing

These relevant values are worth taking into account and study them with deep detail in order to find out the ways to reduce the different energy consumptions involved throughout the global process as some authors have suggested to integrate sustainability indicators and lean manufacturing to assess manufacturing processes (André Lluís Helleno et al., 2016).

In this research such analysis is going to be carried out by explaining the way the consumptions are produced as Habib et al. paper do regarding the garment industry in Bangladesh (Habib

et al., 2016).

This paper will consider plaster mold based factory type versus resin mold type as main developed current technologies (cer_bref_0807.pdf, 2007). Establishing this basis as a starting point and numerically modeling the consumption of every process to be described in terms of energy and water consumption, they will be calculated as the CO₂ emissions. From these results, the assessment will be constructed which has to be the main tool to design the most efficient factory in both types so as to quantify the potential energy and water savings (Communication Environmental Website | GREEN STORY | TOTO, 2014). Some authors have researched strategies for efficiency in energy and resources use for other industrial sectors like G. Ingarao has done for metal shaping (Giuseppe Ingarao, 2017). Ingarao suggests reducing overall CO₂ emissions by tackling the manufacturing sector as a relevant contribution to them. He describes the role of metal shaping processes in reducing the environmental impact across different stages of the metal components life.

Although some research has been developed about this matter, they are not focused on a particular sector of activity (Effenberger and Hilbert, 2016), although all of them are concerned about future scarcity (Grubbström, 2015). On the other hand there is some research regarding a specific industrial sector like Madan et al. for the injection molding industrial sector (Madan et al., 2014).

3. Methodology

The starting point to quantify the potential reduction is the assessment of the current consumptions of resources in conventional factories. Consumptions shown in Appendix A, Table A2, have been calculated by means of modeling every process through the entire production line for the two standard technologies and therefore, calculating the involved resources.

Models take into account mass and energy balances, so a system of equations is resolved for each process yielding an output of energy and mass wastes as shown in Equation (1) and Equation (2):

$$\sum_i \dot{m}_{a_i} + \dot{m}_{NG} = \sum_j \dot{m}_{g_j} \quad (1)$$

$$\sum_i W_{el_i} + \sum_j W_{th_j} + W_{NG_k} = \sum_h W_{th_h} + W_{losses} \quad (2)$$

Where:

- \dot{m}_{a_i} , \dot{m}_{NG} , \dot{m}_{g_j} , are the mass flows in kg/s of air inlets, natural gas inlet and exhaust gas outlets respectively

- W_{el_i} , W_{th_j} , W_{NG_k} , W_{th_h} , W_{losses} , are the energy flows in kW of electrical, thermal and natural gas inlets, thermal outlets and losses respectively.

The equations are established considering the thermodynamic states of each flow at both, inlet and outlet, including the losses and inefficiencies. Fig. 1 shows the methodology of the modeling procedure.

Once stated the resources demanded by conventional factories, the following action is to identify the potential reductions. The main clues to find them, is to go through the equations systems trying to eliminate as many inputs from the processes as possible. This can be achieved in different ways:

- Improve the efficiency of the machines
- Try to set renewable energies
- Try to find alternative technologies of every single process with less demand on resources
- Reusing wastes from one process to another instead of releasing it to the environment

Although resource reduction is a very common practice and it is widely researched (Roldán-Blay et al., 2017), the last point (reusing wastes among different processes) is not so extended within the sanitary-ware industry in a scientific point of view.

This is the basic aim of this research. The main idea is to map the entire process and characterize it by a mathematic model that can be easily utilized to optimize the global resources input. The global model consists of single sub-models which can interact with each other exchanging mass or energy flows. The mathematic research has shown that relevant amounts of energy can be exchanged between kilns, dryers and heating units in order to reduce the primary heating energy demands which result in an important CO₂ emission reduction (Colmenar-Santos et al., 2016d). Besides, the thermodynamic state of some wastes is more appropriate to be reused in some other sub-process. This characterization has been made possible by the mathematic modeling of the process which is where the innovation of this research lays.

After a comprehensive review, no research has been found about this matter within the sanitary-ware manufacturing, though some applications have been found referring to other fields of manufacturing (Galati et al., 2017).

The mathematic model seen as a tool of optimization is an important scientific advance to design new more efficient factories. It has shown that heat waste of the kiln can be reused to:

- Preheat the air to supply its combustion feeding resulting in less gas consumption.

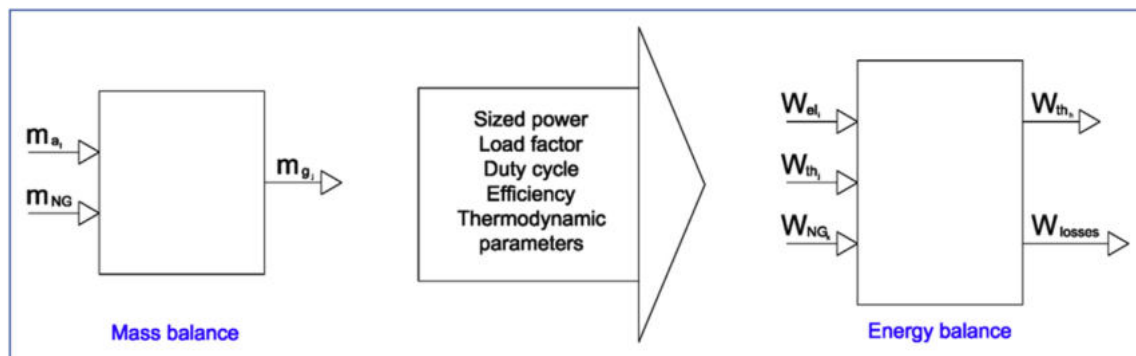


Fig. 1. Scheme of the models of processes.

- Be blown in the dryers reducing or eliminating their gas consumption.
- Be blown in the casting hall reducing gas consumption for heating.
- Heat a multi-effect distiller to desalinate water for molds washing.

This research has proved that almost 30% of the energy could be saved which equally applies to the corresponding emissions. The main and easiest way to achieve this is to reuse waste heat from the kiln as shown in sections 4.5 and 4.7.

4. Energy model

4.1. Electrical model

As stated in section 2 (see Fig. 1), the model the way to obtain the electrical assessment is to analyze all the electrical loads and their behavior throughout the duty cycle. The magnitudes to be characterized are:

- Power size and number of equipment units (kW)
- Duty cycle by means of “run-stop” hours
- Coefficients of use and simultaneity to get the averaged power
- Average power for every load (kW)
- The energy for one day and the whole year (MWh)
- Emissions of CO₂ from the electrical power generated in a fossil-fuel based power plant (t/year)

A data base is produced based on the electrical equipment and its characteristics in order to split up the powers and energies through the different areas or processes of each technological production line.

4.2. Thermal models

Thermal analysis is performed by examining every thermal load which is individually calculated as per the process requirements. Except the boilers, whose behavior is conventional and their power is not relevant, kilns, dryers and heating units are calculated from the thermal needs by modeling its behavior mathematically in order to conclude their thermal assessment (Saidur et al., 2011). Shuttle kiln assessment, is also neglected in thermal recovery terms since its unsteady nature does not permit us to benefit from its exhaust residual heat. Moreover, the size of the chamber is so reduced that no significant heat can be recovered.

4.2.1. Kiln model

As the tunnel kiln is running on a steady basis, it is convenient to consider taking advantage of its residual heat. The great amount of thermal power that flows through it is another reason to assess the energy flow. In brief, the kiln is run as a burner of natural gas along an insulated tunnel where air flow is run upwards in order to bring the ceramic pieces up to the point of vitrifying the glaze which is around 1250 °C. Three different air streams are led through it for cooling and firing the pieces as shown in Fig. 2.

The thermal power is basically devoted to heat ware, carts, supports, superstructure and auxiliary air flow up to designed temperature along the tunnel. All the heat capacity after the top of the curve (at about 1250 °C)(see Fig. 3.) is delivered downstream by cooling airs. On the other hand, a significant quantity of heat is lost throughout the insulation enclosures which mainly consist of refractory bricks and fiber liners.

The system to be resolved considers both, mass and energy balances as stated before.

The mass balance equals the air inlets (roof air, combustion and excess airs, rapid and slow cooling airs and contra-vec air), the natural gas mass inlet, and air outlets (exhausted gases and exhausted cooling airs), Equation (3).

$$\dot{m}_{ra} + \dot{m}_{ca} + \dot{m}_{ea} + \dot{m}_{rc} + \dot{m}_{sc} + \dot{m}_{cv} + \dot{m}_{ng} = \dot{m}_{ex} + \dot{m}_{exrc} + \dot{m}_{exsc} \tag{3}$$

On the other hand, the energy balance equals the thermal inlet energies and the sum of outlet energies and losses. Every term of the equation is calculated multiplying the mass flow by the enthalpy of it at the corresponding temperature, as shown in Equation (4):

$$\sum_{in} \dot{m}_{in} h_{in} = \sum_o \dot{m}_{out} h_{out} + W_{losses} \tag{4}$$

Considered energy inlets are:

- Roof, combustion, excess, rapid cooling, slow cooling and contra-vec (air curtain at the tunnel outlet) airs.
- Natural gas flow rated at 48,000 kJ/kg.
- Cars and superstructure, consisting of: ceramic pieces, supports, tables and plates.

Losses are calculated considering thermal transference from inside the kiln to outside including the three components of the heat transference; conduction, convection and radiation.

The model is based on a simple set of concepts whilst the solution is complex since the temperature varies along the tunnel.

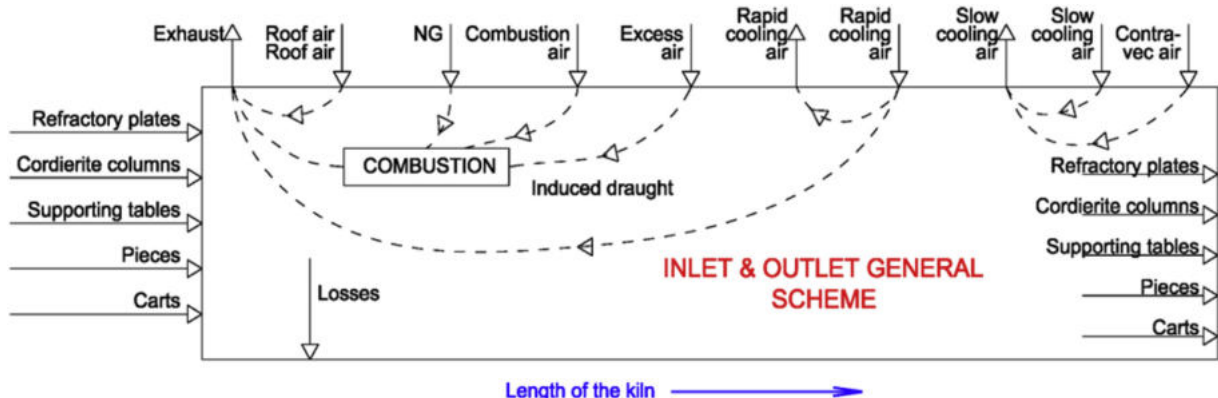


Fig. 2. Tunnel kiln model scheme.

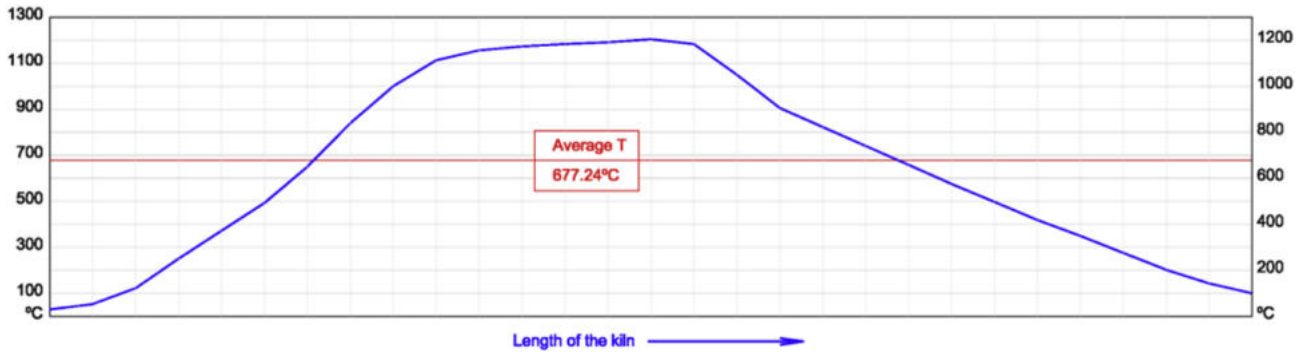


Fig. 3. Temperature distribution along the kiln.

Fig. 4 shows the net energy balance through the different sections of the tunnel.

4.2.2. Pieces dryer model

As the pieces are to be dried under specific parameters, the control of the dryer is essential to carry out the process with no losses. Table 1 shows the stages in the dryer as well as their flows of fluids and energy.

The thermal power of the dryers is basically geared to evaporate water from the pieces and to heat them up to the designed temperature in every stage of the drying process compensating the heat losses throughout the insulated enclosing panel. The constant flow of air needed to evaporate the water requires additional heat to reach the designed temperature inside the dryer. The dryer operation is shown in Fig. 5.

As this process is achieved in different stages to avoid the water flow to be cut from the core of the pieces, some moisture has to be produced in the beginning of the drying cycle. Essentially, a mix of heated air and water vapor which could be reused for other heating purposes is obtained.

The mass balance equals the air inlets (fresh, combustion and excess airs), the natural gas mass inlet, and air outlets (exhausted gases and saturated air). The water flow from pieces is considered within the energy balance but ignored in the mass balance. It does not affect the mass results since it is the same at both sides of Equation (5).

$$\dot{m}_{fa} + \dot{m}_{ca} + \dot{m}_{ea} + \dot{m}_{ng} = \dot{m}_{ex} + \dot{m}_{exsa} \quad (5)$$

Inlet energies are the air and natural gas enthalpies. The enthalpy of water contained within the pieces is computed at the

Table 1 Phases of drying cycle.

	Time h	Drying water kg/h	Air		Power kW
			kg/h	°C	
Phase 1	2	171	7432	37.78	207
Phase 2	3	160	4710	50.00	184
Phase 3	2	274	2588	75.00	322
Phase 4	3	229	828	90.00	241
Phase 5	1	0	0		0
Average		187	3332	58.69	212

inlet temperature, as well as the outlet where it is evaporated. It is shown in equation (6).

$$\sum_{in} \dot{m}_{in} h_{in} = \sum_o \dot{m}_{out} h_{out} + W_{losses} \quad (6)$$

As it was explained for the kiln model the losses are modeled as heat transference through the panels of the dryer.

4.2.3. Molds dryer model

Similarly to the pieces dryer, these dryers consist of the same concept as the air agitators and temperature. The operation parameters are shown in Fig. 6.

As it was explained for the pieces dryer, these dryers have to use thermal power to heat up the ware inside (molds), to evaporate the water contained and to compensate the thermal losses throughout the enclosures. The equations model could be repeated exactly as the pieces dryer.

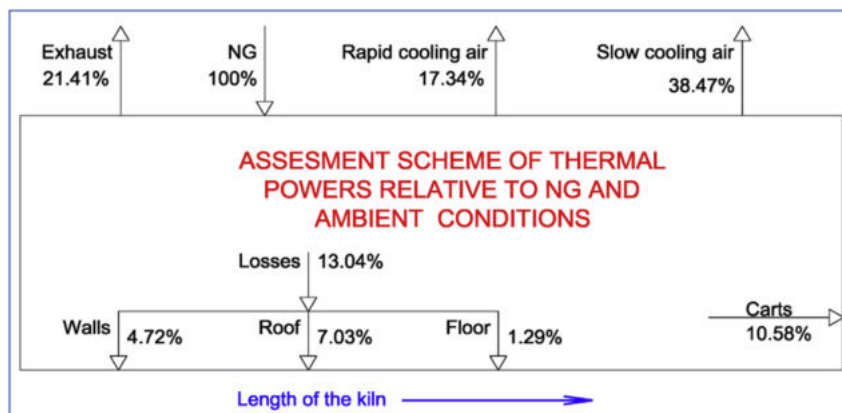


Fig. 4. Simplified Tunnel kiln model scheme.

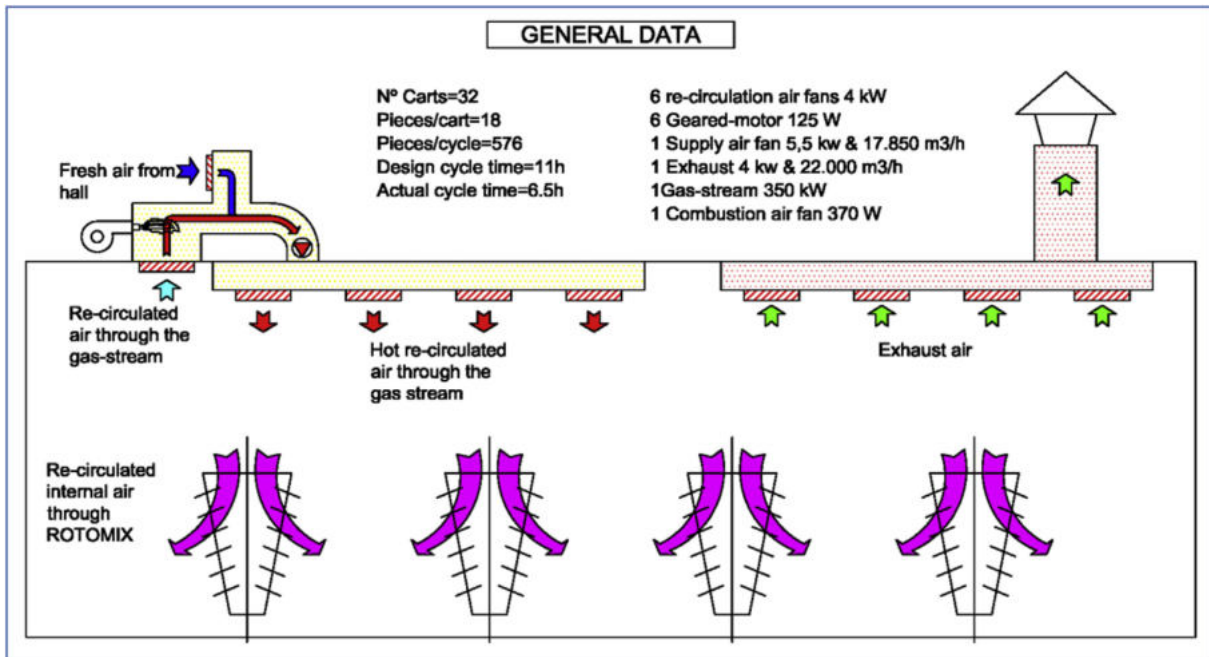


Fig. 5. Model scheme of pieces dryer.

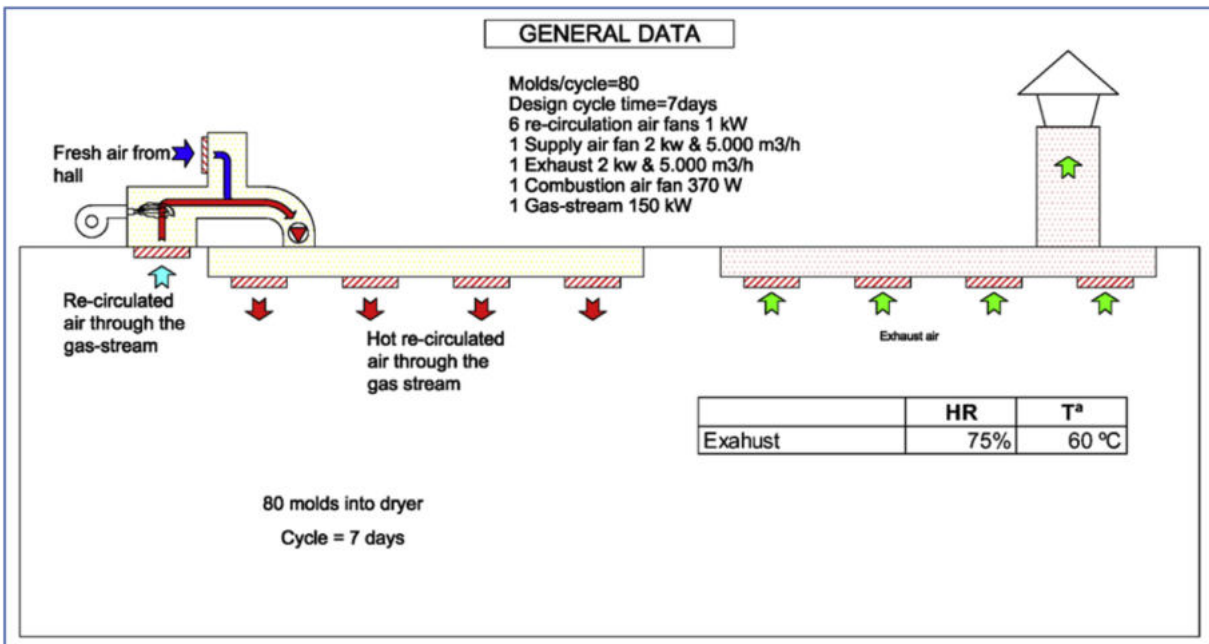


Fig. 6. Model scheme of molds dryer.

4.2.4. HVU model

In a casting hall humidity and temperature must be monitored in order to control the environment during the casting and the molds drying. For this reason, its behavior can be simulated as if the whole hall is a dryer where both, pieces and molds are to be dried and the humid air has to be removed outdoors. The scheme is shown in Fig. 7.

It can be assumed that power is devoted to heat ware, air, water evaporation as it was detailed for the dryers.

Since the casting hall can be compared to a great dryer, the mathematic model would be the same.

4.3. Water consumption model

As explained before, water is required for different stages within sanitary-ware production. In Fig. 8 the water assessment can be seen for a typical sanitary-ware factory.

Water is essentially used as the raw material for slip, glaze and plaster molds production but it is also needed for flushing the molds after every casting. Depending on the water supply quality, it is common to treat the water removing dissolved salts, which is an important inconvenience for both, molds operation and body of the pieces formation. Resin molds technology is quite more intensive

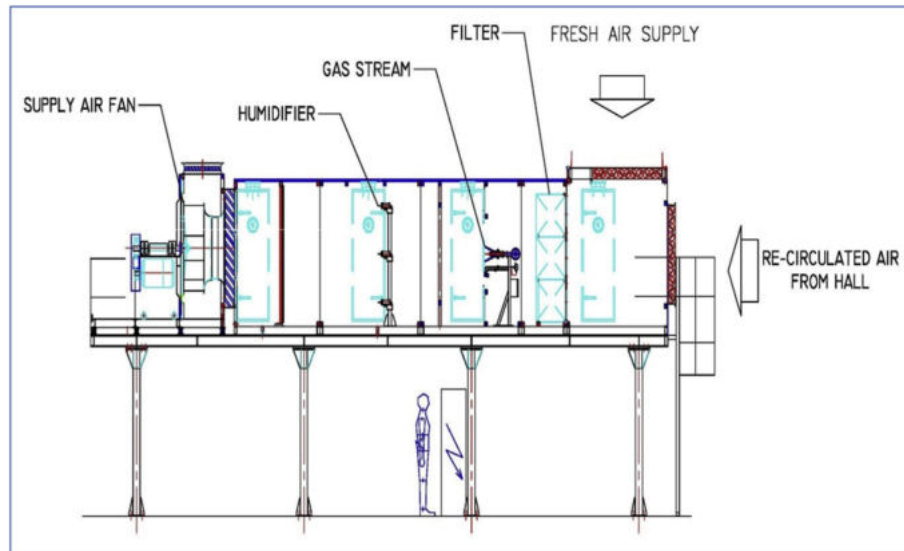


Fig. 7. HVU model scheme.

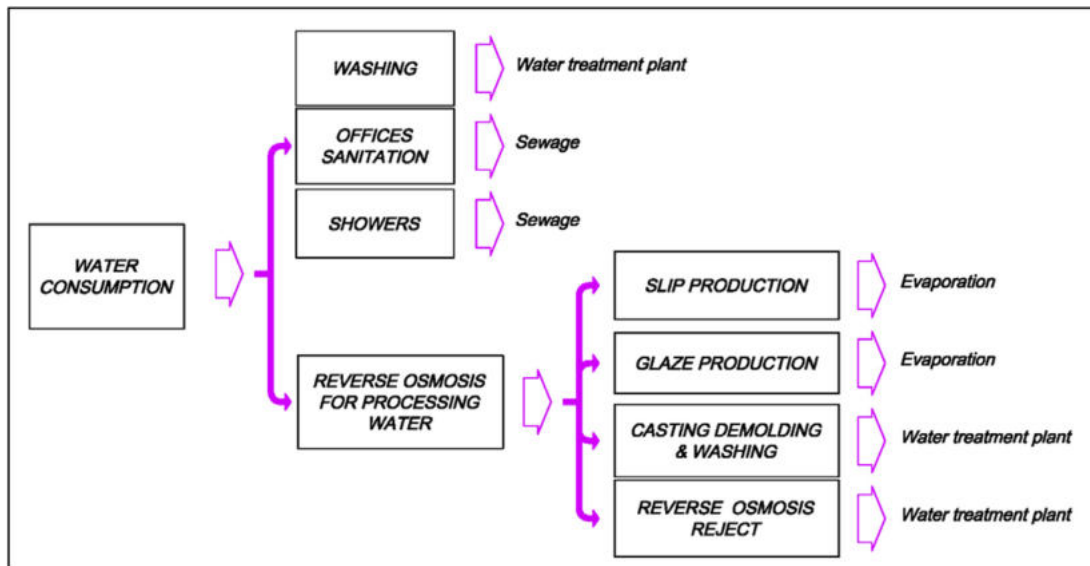


Fig. 8. Water consumption scheme.

than plaster type in terms of water usage. Since the process does not involve contamination of the water besides inorganic solid suspension particles and dissolved salts, it can be easily treated to be rejected to the sewage. On the other hand, the water containing salts is not easily treatable to re-use since its salt concentration increases with every cycle. Thus, water would degenerate progressively for production purposes.

The most common way to remove salts from water is reverse osmosis with no reuse of wasted water.

The equations system to assess the water consumption is by analysis of processes which include water in their operation and the subsequent mass balance.

- Water for slip production is calculated based on the composition formula of the ceramic slip which is about one third of the total wet weigh of the piece.
- Water for glaze production is estimated from the assumption of the glaze/slip ratio is one to nine kg of the final piece.

- Water for plaster molds making is calculated from the number of molds produced daily (average 80), their averaged weight is about 200 kg and the ratio water/plaster, is about 1 kg.
- Water for molds flushing within casting is quite different depending on the casting technology. For plaster molds, it is need about 5 dm³ per mold and cast. For resin molds the quantity is 180 dm³.
- Water for sanitary usage is estimated per the common standard ratios for basins, showers, etc.
- With the exception of sanitary water, the rest has to be treated to remove salts. 50% efficiency is assumed for the R.O.

4.4. CO₂ emissions model

To assess CO₂ emissions, both, electricity and thermal energies are taken into consideration to calculate their associated emissions (Zhou et al., 2016) considering different indexes or affecting drivers

(Shao et al., 2016). For natural gas burnt the stoichiometric rate of CO₂ is directly calculated from the natural gas that has to be burnt to produce the needed thermal power as follows, Equation (7).

$$1kj_{thermal} \cdot \frac{1kg CH_4}{48,000 kj} \cdot \frac{1kmol CH_4}{16kg CH_4} \cdot \frac{1kmol CO_2}{1kmol CH_4} \cdot \frac{44kg CO_2}{1kmol CO_2} \quad (7)$$

For the CO₂ produced by electrical power, it is calculated at a 35% efficiency of electrical production from a fossil-fuel based power plant upstream of the factory. Thus the factor to evaluate the CO₂ production is:

$$1kj_{electrical} \cdot \frac{1}{0.35} \cdot \frac{1kg CH_4}{48,000 kj} \cdot \frac{1kmol CH_4}{16kg CH_4} \cdot \frac{1kmol CO_2}{1kmol CH_4} \cdot \frac{44kg CO_2}{1kmol CO_2} \quad (8)$$

5. Results

In order to get consistent data so as to compare values, all the results have been calculated for a factory production capacity of 0.5 million pieces per year, which is a common size for a medium or even small sanitary-ware factory.

5.1. Electrical model results

From electrical databases a table is obtained for each type of plaster or resin molds based on each type of factory. As an example, Table 2 shows the compared general electrical consumption for the

Table 2
Electrical consumption compared for both technologies.

Electrical energy consumption 500,000 pcs/year	Plaster casting			Pressure casting		
	P_{nom} (kw)	$P_{average}$ (kw)	W_{year} (GJ/year)	P_{nom} (kw)	$P_{average}$ (kw)	W_{year} (GJ/year)
Section						
Raw materials	307.50	264	3512	307.50	264	3512
Slip preparation	367.75	314	4892	367.75	314	4892
Glaze preparation	154.78	104	1378	154.78	104	1378
Modeling & molds	136.56	83	1735	23.31	16	198
Casting	1010.63	544	7208	264.54	168	2221
Heating & ventilation	134.56	51	1008	134.56	51	1008
Drying	117.81	88	1712	117.81	88	1712
Glazing	76.72	58	740	76.72	58	740
Kilns	245.16	167	4527	240.16	164	4474
Sorting	50.11	33	597	40.11	26	457
Offices	154.69	105	712	154.69	105	712
Ware-house	23.13	17	204	23.13	17	204
Facilities	796.50	313	5852	796.50	313	5852
Total electrical energy=	3576	1606	34,077	2702	1295	27,360

Table 3
Thermal consumption compared for both technologies.

Thermal energy consumption 500,000 pcs/year	Plaster casting			Pressure casting		
	P_{nom} (kw)	$P_{average}$ (kw)	W_{year} (GJ/year)	P_{nom} (kw)	$P_{average}$ (kw)	W_{year} (GJ/year)
Section						
Raw materials						
Slip preparation						
Glaze preparation						
Modeling & molds	450	346	9716			
Casting				770	465	8703
Heating & ventilation	1600	1094	21,930	400	271	5428
Drying	800	425	8515	800	425	8515
Glazing						
Kilns	4650	3446	89,638	4650	3446	89,638
Sorting	400	80	1497	400	80	1497
Offices						
Ware-house						
Facilities	110	105	1396	110	105	1396
Total thermal energy=	8010	5496	132,692	7130	4791	115,177

different sub-process throughout the factory. The values have been calculated as a sum of the electrical powers of the machines for each process. The electrical model provides the averaged electrical consumption through a year in both types of factories. Pressure casting technology is more efficient than plaster by almost 20%. The main difference between the technologies is in modeling and casting processes.

5.2. Thermal model results

The natural gas requirements for both technologies are shown in Table 3. The thermal models provide the averaged thermal consumption through a year in both types of factories. Pressure casting technology results 13% more efficient than plaster technology. The main difference is in modeling, casting and heating processes.

5.2.1. Kiln model results

From the kiln assessment, it is deduced that more than a half of the 2 MW of natural gas burnt, are exhausted as gas and air heated flows as Table 4 shows. These flows can either be led outside the factory or to another process where thermal energy is required.

Fig. 9 illustrates how the majority of the output recoverable energy from the kiln is distributed. 76% of the heat is exhausted through the chimney and cooling stacks. Thus, it can be recovered either directly or through a heat exchanger towards other thermal processes. On the other hand, heat from carts, ware and losses through the walls could be recovered by different ways that are not scope of this research because they are not economically profitable.

Table 4
Mass and energy balance through tunnel kiln.

Inputs				Outputs			
Combustion	kg/s	°C	kw	Combustion	kg/s	°C	kw
NG	0.0448	30	2150.22	Exhaust	1.5500	327	506.85
Roof air	0.3120	30	9.36				
Combustion air	0.7690	30	23.07				
Excess air	0.0769	30	2.31				
Subtotal combustion =	1.2027		2184.95	Subtotal combustion =			506.85
COOLING				COOLING			
Rapid cooling	0.7930	30	23.79	Rapid cooling	0.4450	868	386.26
Slow cooling	1.6760	30	50.28	Slow cooling	3.1099	296	920.54
Contravec air	1.4339	30	43.02	Contravec air			
Subtotal cooling =			117.09	Subtotal cooling =			1306.80
SUPERSTRUCTURE				SUPERSTRUCTURE			
Refractory plates	0.1401	30	6.14	Refractory plates	0.1401	30	6.14
Cordierite columns	0.0199	30	0.87	Cordierite columns	0.0199	30	0.87
Supporting tables	0.1260	30	5.52	Supporting tables	0.1260	30	5.52
Pieces	0.4644	30	15.74	Pieces	0.4366	30	14.80
Subtotal superstructure & pieces =			28.27	Subtotal superstructure & pieces =			27.33
CARTS				CARTS			
Subtotal carts =			65.00	Subtotal carts =		100	253.92
				LOSES			
				Walls			106.11
				Roof			158.19
				Floor			29.09
				Subtotal losses =			293.39
THERMAL POWER			2395.31	THERMAL POWER			2388.29

Difference due to iterative calculation errors.

5.2.2. Pieces dryer model results

The results of the needed heat to evaporate the water remaining into the pieces are shown in Table 5, such as the actual evaporated water and the air to absorb this water. As per Table 1, this energy is varying from 30 to 90° and the averaged power is 212 kW with a maximum of 322 kW. This heat can easily be recovered from the kiln exhausting.

5.2.3. Molds dryer model results

Air flow to absorb the water from evaporation has to be heated up. Air and evaporated water are shown in Tables 6 and 7.

The molds dryer acts quite like a pieces dryer. Warm air is blown into the chamber about less than 60° during a duty cycle of 7 days, so the water from plaster is removed in a homogeneous way to avoid crack on the ware. The averaged heat power results 115 kW that can be also recovered from the kiln exhausting by means of an automatically controlled air mixer to balance the air mix up to 60°.

5.2.4. HVU model results

As explained in 3.2.4. HVU have to be able to evaporate water

Table 5
Water, air and energy flows for a complete drying cycle.

	Drying water kg	Air kg	Water humidifier kg	Energy GJ
Phase 1	343	14,863	10.16	1.49
Phase 2	480	14,131	4.80	1.99
Phase 3	549	5177	0.00	2.32
Phase 4	686	2485	0.00	2.61
Phase 5	0	0	0.00	0.00
Total	2057	36,656	14.97	8.41

Table 6
Energy consumption for a complete drying cycle.

	Energy GJ	Power kW
Losses	3.86	6.38
Water vaporization	57.87	95.68
Air heating	8.07	13.34
TOTAL	69.80	115.41

Table 7
Water and air flows for a complete drying cycle.

	kg	kg/h
Water to evaporate	24,276	144.50
Air required to dry	212,370	1264.11

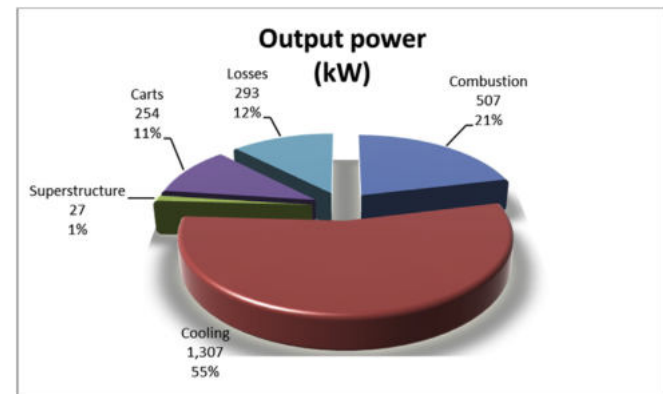


Fig. 9. Distribution of output energy from kiln.

from pieces, and plaster molds, as well as to heat the air to increase its psychrometric capacity while maintaining the environment within the casting hall. Knowing the environmental parameters of casting hall, a proper automatized system would be able to optimize the energy requirements (Colmenar-Santos et al., 2013). Thermal and mass balances are shown in Table 8.

In the same way than dryers, this process can change the thermal power source from gas to recovered heat from the kiln.

5.3. Water model results

Studying the differences of processing from the point of view of water requirements, it can be learnt that gross water requirement is much greater for resin mold technology as can be seen in Table 9. Though plaster molds making requires a considerable amount of water, it is negligible versus resin mold flushing. The difference is in casting. Resin casting consumes almost 8 times more water than plaster. Whereas resin improves the productivity and energy consumption, water consumption penalizes resin technology unless this amount of water is reused as suggested in section 4.8.

5.4. CO₂ emissions results

From electrical and thermal energy, the calculated results of the CO₂ emissions for both technologies are shown in Table 10.

As CO₂ model is based in direct calculation from fuel combustion, pressure casting technology appears cleaner since its thermal requirements for casting hall heating are lower. Resin molds technology is almost 16% cleaner than plaster.

5.5. Main results

Figs. 10 and 11 show the final energy and water balance for the two types of factories studied.

After a detailed analysis of the factories requirements, it can be deduced that great amounts of energy (mainly thermal) and water are demanded to produce sanitary ware. Besides, the exhaust residual heats carry enough energy to be reused within the production processes, yet their enthalpy level is adjusted to be sequentially recovered in a thermal cascade (Peng and Liu, 2009).

It has been shown in Figs. 10 and 11 the amount of energy and water needed for both types of factories as well as the emissions produced by them. These quantities define one single factory sized at half a million pieces per year. The results show that pressure molds technology is more efficient from the energetic point of view

Table 8

Water, air and energy flows through a casting hall.

	Air			Plaster			Resin		
	Time	RH(%)		Power	m _{air}	m _{water}	Power	m _{air}	m _{water}
	h	°C		kW	kg/h	kg/h	kW	kg/h	kg/h
Casting	10	25	75%	128	5583	84	123	5583	84
Drying	14	40	50%	846	28,431	695	144	3443	84
Average		34	60%	547	18,911	440	135	4335	84

Table 9

Water consumption results for both technologies.

Section	Plaster casting	Pressure casting
500,000 pcs/year	m ³ /year	m ³ /year
Raw materials	46	46
Slip preparation	5108	5108
Glaze preparation	671	671
Modeling & molds	1632	70
Casting	6714	112,964
Heating & ventilation		
Drying		
Glazing	464	464
Kilns		
Sorting	46	46
Offices	110	110
Ware-house	58	58
Facilities R.O.	15,480	120,734
TOTAL WATER CONSUMPTION=	30,329	240,271

Table 10

CO₂ emissions compared for both technologies.

Section	Plaster casting		Pressure casting	
	CO ₂ (Mg _{CO2} /year)		CO ₂ (Mg _{CO2} /year)	
	Electrical	Thermal	Electrical	Thermal
Raw materials	575		575	
Slip preparation	801		801	
Glaze preparation	226		226	
Modeling & molds	284	557	32	
Casting	1180		364	499
Heating & ventilation	165	1256	165	311
Drying	280	488	280	488
Glazing	121		121	
Kilns	741	5136	732	5136
Sorting	98	86	75	86
Offices	117		117	
Ware-house	33		33	
Facilities	958	80	958	80
Total CO₂ Emissions=	5578	7602	4479	6599

and from the perspective of the emissions. For the water consumption, pressure molds technology is not clean enough unless the water to flush molds can be reused.

5.6. Global assessment

As stated before, in 2014, the global sanitary ware production reached 349.3 million pieces where 59 million were produced in Europe. In Spain, the total production was about 1 million pieces. With the assessed factory models; emissions, energy and water demands can be deduced globally for the sanitary ware industry. In Table 11, the figures for these productions are shown:

5.7. Potential improvements

From Fig. 10, it can be deduced that, roughly, the exhausted heat from the kiln (1707 kW) would be enough to supply the rest of the heat demands within a plaster molds factory. The total demand besides the kilns themselves is about 1863 kW (dryers and HVU's). Thus, this quantity could be saved which is about one of the total energy, which can be equally applied to the corresponding emissions. One over three GJ per year is an important amount of energy that means as well a considerable amount of money to be saved as per Table 11 data. Some research has been done about this matter (Utlu, 2015)

Additionally, one third of emissions would be reduced. This would be another source of economical savings (Hasan et al., 2016) supported with real data (Chiaroni et al., 2016), since CO₂ emissions are to may be punishable by local regulations.

For a resin molds based factory there would be a surplus of thermal energy that could be diverted to air conditioning by means of an absorption chiller, for instance.

Even, the heat from the kiln exhaust could be redirected to preheat combustion air. Through this configuration, the kiln gas consumption would be greatly reduced.

In the event that there was excess heat during some periods, it could be stored for later use (Merlin et al., 2016).

From the electrical point of view, 1606 electrical kW are required in a plaster mold factory compared to 1295 for a resin molds one. Considering a total power plant of co-generation, up to 3 thermal GW based on a 35% electrical efficiency and 60% thermal efficiency could be produced. Admitting an exhaust temperature of about 450 °C from the generator this amount of thermal energy could be completely reused throughout factory, although the kiln would need extra heating in order to reach the 1250 °C needed to fire the ware (Sipilä, 2016).

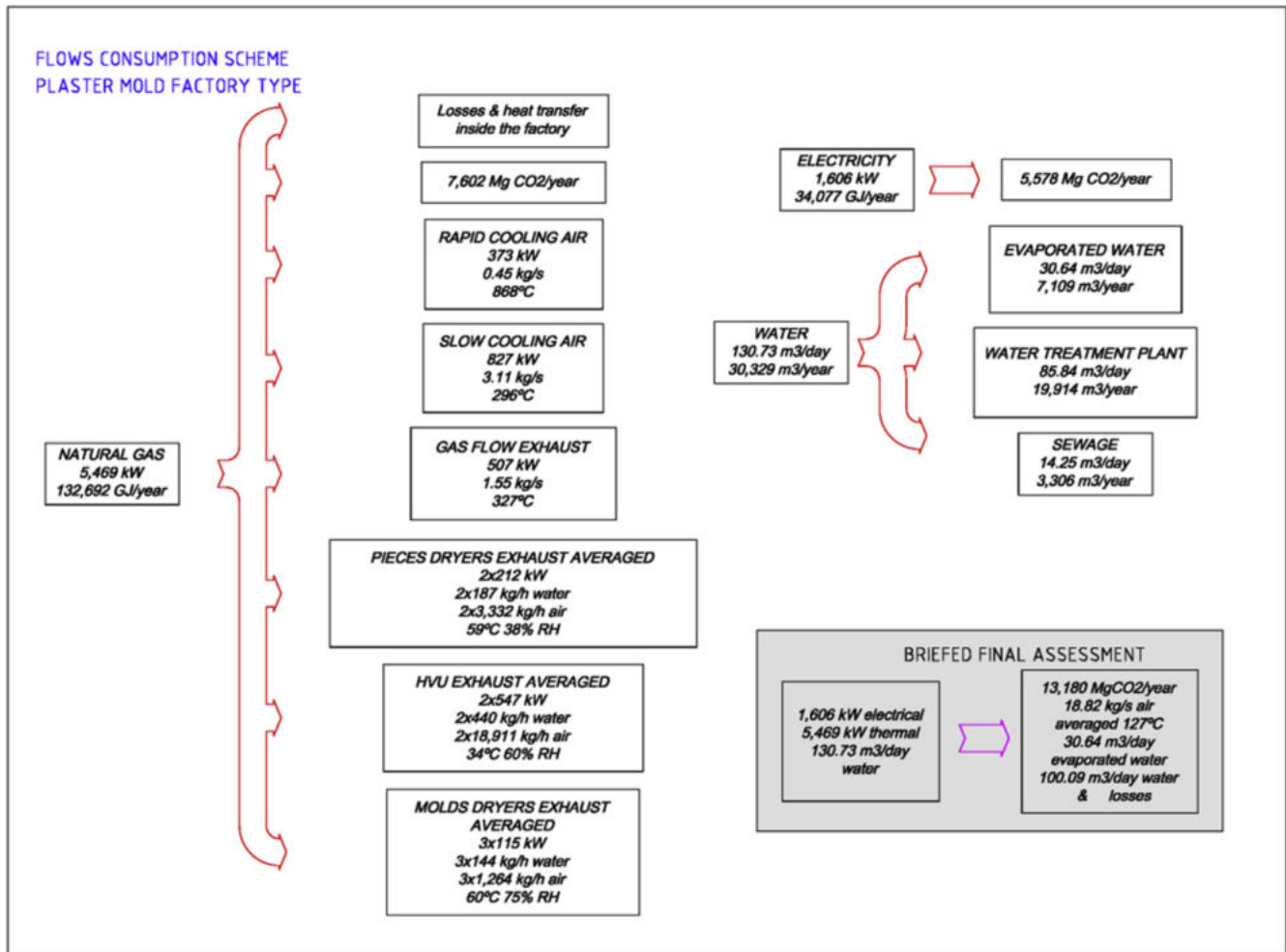


Fig. 10. Energy and water assessment in a plaster mold based factory.

5.8. Possibilities of energy saving

As stated in 2.1, there are many opportunities of saving energy within the processes along the production line. They are mainly:

- Improvement of electrical efficiency. This action could, easily reach up to 10% of the electrical consumption for lighting (Boharb et al., 2016), robots (Uhlmann et al., 2016) or compressors (Vittorini and Cipollone, 2016).
- Re-direction of kiln heat exhaust to be recovered at dryers and heating-ventilation units. This action could amount up to one third of the total energy consumption as said before (Yin et al., 2016).
- As there is recovered heat available, the treatment of the water could be dealt by distillation rather than reverse osmosis. This action would save electricity and water since salts would be removed and more than a half of the water would be reused (Li et al., 2012).
- Based on the heat nature processes throughout the factory, solar power is preferred for gas saving (Colmenar-Santos et al., 2016a), even for cooling purposes (Borge-Diez et al., 2012)
- Total power plant of co-generation is very advisable under these circumstances of energy consumption. In the event of a combined plant design, heat from the generator could be shared to be stored (Schreiber et al., 2015) or re-cycled to thermal processes. Total power plant allows for a better electrical load

regulation (Wang et al., 2017) and re-use of residual heat (Colmenar-Santos et al., 2016b)

All these possibilities to save make an interesting subject to be studied in future investigations and papers which could define an ideal factory for sanitary ware where energy and water consumption are minimized.

6. Conclusions

As discussed throughout the paper, the ceramic industry is an intensive consumer of raw materials, energy and water. As a sanitary-ware energy and water map is not well known, this paper aims to underline the need to add some effort to the current general state of the art to the ceramic energy management knowledge. Thus, the main contribution is to provide the tool to carry out this target to optimize the design and exploitation of the plants.

The most remarkable results of this study are:

- The research highlights the sustainability relevance of sanitary-ware processes by identifying, quantifying and pinpointing where the resources are consumed.
- The resources consumption map through the manufacturing lines is stated by analysis of single unit processes to model them as a tool to assess their relevance throughout the complete manufacturing process.

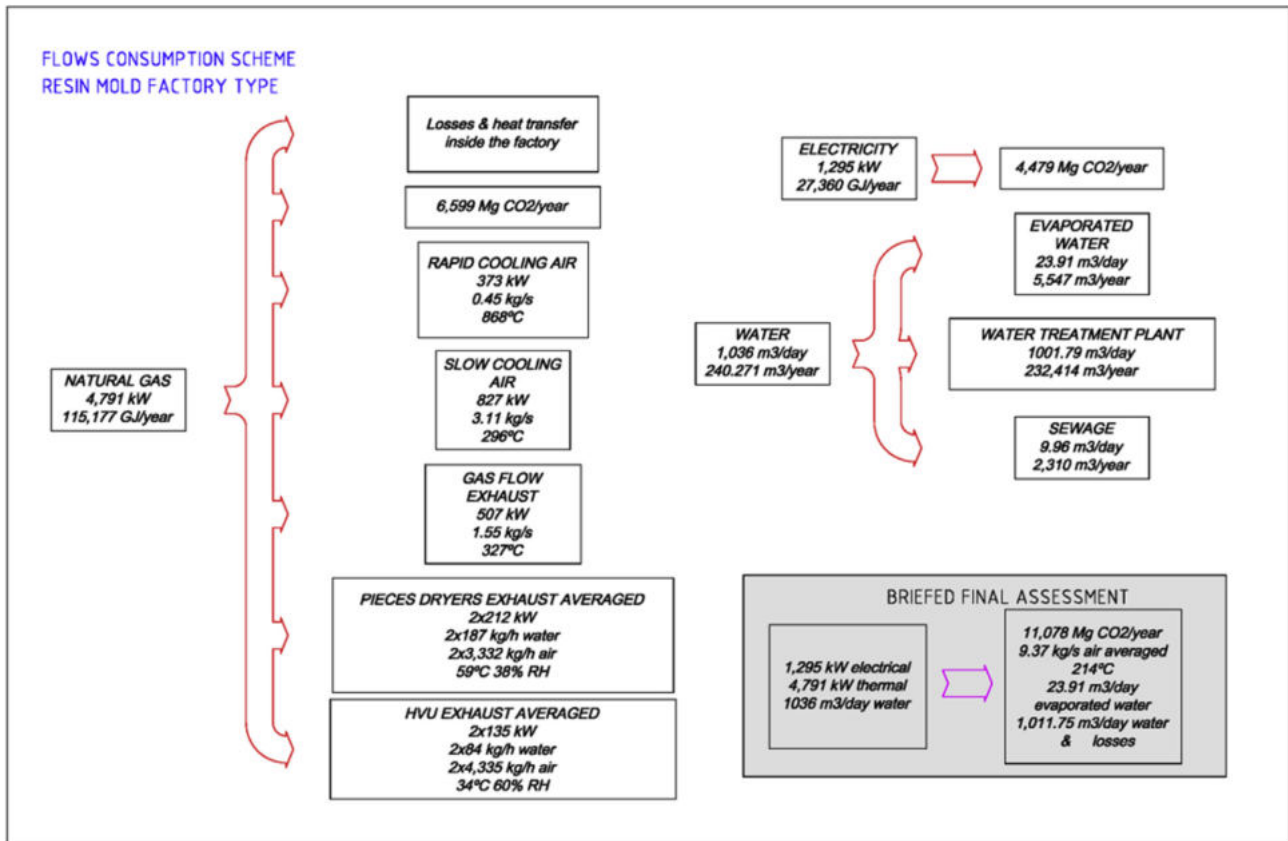


Fig. 11. Energy and water assessment in a resin mold based factory.

Table 11
Consumption and emissions for sanitary ware production.

	Plaster mold type			Resin mold type		
	Energy	Water	CO ₂	Energy	Water	CO ₂
	TJ/year	dam ³ /year	Gg/year	TJ/year	dam ³ /year	Gg/year
Spain	334	61	26.36	285	483	22
EU	19,702	3579	1555	16,819	28,470	1307
World	116,641	21,188	9207	99,576	168,552	7739

- The figures of resources consumption have been calculated and the key points to improve the resources efficiency are identified in order to suggest possible strategies to reduce them.
- The research shows how both consumption and environment are closely linked.
- As stated in 4.7, one third of the total energy of production could be saved directly by just recovering the waste heat from the kiln. Also, the assessment and modeling of resources have made it possible to identify points of savings and more importantly, to quantify the rate of potential reductions of energy and water

Limitations and future studies can be mentioned as:

- Resources consumption are identified and quantified though further research should be carried out in terms of calculating the impact of each different way to reduce resources in order to construct the framework of the global efficiency to be optimized.
- This research has not gone into details of how to assess the resources reduction. This subject is worth detailing in future research.

- This research hints that economical saves are involved since the energy efficiency is optimized. Possible financial analysis might be developed in order to quantify them.
- It has been suggested in 4.8., that a great amount of water can be saved by distillation from recovered heat. Though, theoretically, all the water could be saved, it is not real due to losses and inefficiencies through the distillation system. Nevertheless, any amount of water to be saved is worth studying.

Different energy and resource efficiency recycling methods as well as reuse resources strategies obtainable by proper implementation of manufacturing processes are suggested, so as potential improvements as a tool to optimize resources. Hence, the applicability of the tool by modeling manufacturing processes is a suitable means to design the most convenient manufacturing line for any background as a suitable tool to support a lean manufacturing philosophy.

Industrial and economical decisions are made by taking into account resources consumption, environmental impacts of them and finally, the way both concepts are linked for a more efficient and sustainable industry and a cleaner environment around it. And this paper aims to provide a means to support such an effort to be developed.

Appendix A

1. State of the art in the sanitary ware manufacturing

The general process used in the ceramic industry for sanitary-ware consists of different sub-processes or basic industrial operations as shown in Fig. A1.

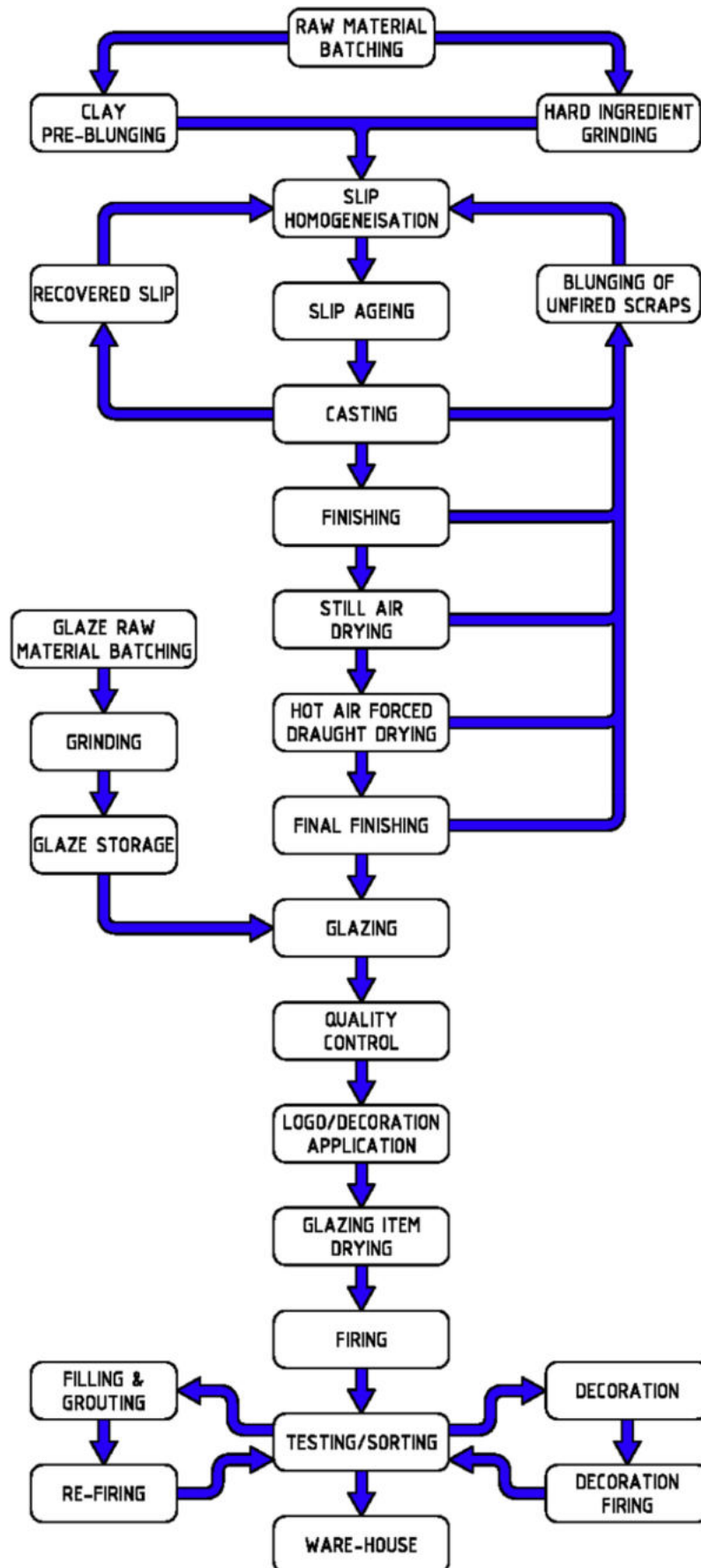


Fig. A.1. General process of sanitary-ware manufacturing. Source: Ceramic Technology Sanitary Ware SACMI 2010 (Ceramic Technology Sanitary-ware, 2010).

The general process is essentially the same throughout different technologies. The only remarkable difference that can be found is regarding the casting. In particular the material the molds are made of. Either plaster or resins are the two common filtrating media to cast the slip or barbotine.

1.1. Analysis of consumptions for main technologies

There are two main different ways to cast barbotine into the mold in order to obtain a relative consistent piece.

1.1.1. Traditional technology

Consists of plaster molds where the barbotine is cast. The plaster takes out the water from the barbotine reducing the humidity levels down to 22%–24% after the casting time which can vary from some minutes up to 1 h depending on the piece size. When this time is reached the mold is opened and the piece removed at the desired humidity. This is a cyclical process where the mold has to release the water absorbed making this step of the process the weakest point of this technology since depending on the way the mold is dried, its capability to remove water again will vary making it inefficient for the next cycle. If the drying is quick, the capillarity stream could be cut, the water will not be able to reach the surface of the plaster mold and the mold will not be dried properly and the next cycle will not run efficiently. On the other hand, if the drying is too slow, the mold will not be dried enough for the next cycle and the water absorption will not reach the desired level. The plaster mold drying is consequently, a critical limiting factor to get high productivity, since one mold is able to produce about two pieces per day. In addition, the psychrometric environment of the casting hall has to be maintained within specific temperature and moisture conditions in order to achieve the proper drying cycle. The main differences are shown in Table A.1.

Table A.1
Environmental parameters in casting hall (Source: (Ceramic Technology Sanitary-ware, 2010).

	Temperature °C	Humidity %	Water flushing dm ³ /(mold·cast)
Plaster	40	50	5
Resin	25	75	180

1.1.2. Current technology

Currently, an alternative technology has been developed in order to increase productivity. When the plaster mold is replaced by a resin mold, the productivity is highly increased since this mold is able to release the capillary water by just blowing it. Thus, the productivity of one resin mold can reach up to 80 pieces per day depending on the size. The weak point of this technology is the water waste produced during the mold washing. For every cycle, the mold has to be washed by means of allowing clear water to flow through it, so all the salt retained along the capillaries are removed to preventing salts building-up which would end up blocking the capillarity suction. The water needed to wash the mold can reach 180 dm³ per mold cycle depending on the mold size. In addition, this water has to be free of salts, so it has to be previously treated by either, reverse osmosis or distillation.

The research is focused on the sanitary-ware as a particular industrial area. The general process will be briefly described initially, then different processes will be analyzed and finally they will be evaluated from an energetic point of view (Petek et al.,

2016). As sanitary-ware is a great consumer of heat and water in several stages of production, the consumption will be calculated for each step and then study the way to link heat wastes from one process to another with lower heat requirement in order to reduce the global need of raw energy and the way to reduce the water consumption. A comparable research has been made related to brick making in China (Zhang, 1997).

Based on the main differences of the global manufacturing process two study cases will be taken into consideration as most of the factories can be matched to one or the other.

1.2. Energy and water consumption relevant to the sanitary-ware industrial sector

Energy is essentially consumed as thermal as well as electrical. Thermal is mainly consumed during kiln firing, drying of intermediates and shaped ware in this order. Currently, the new processes employ (Akinbode, 1995) natural gas. Electricity is consumed throughout the whole sequence of processes to convey, mix, dose, transport, and manipulate material and product. Lighting systems require electricity also. Electrical energy is used in many ways; mechanical energy is used in electrical motors, fans ..., thermal energy is used to heat the kilns or furnaces, in lighting, etc. Diesel fuel is required for on-site transportation.

Fig. A.2 shows a common energy distribution in a ceramic factory.

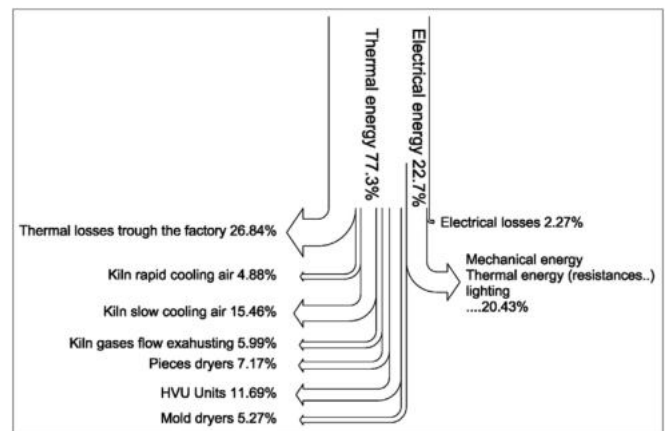


Fig. A.2. Typical energy distribution in a ceramic factory.

Water quality is essential for the preparation of clays and glaze slips. It is used as well as a washing fluid and as a cooling medium. Processed waste water re-usable techniques take different qualities of water for each process into account.

As an example, Table A.2 shows the different resource balances for both technologies, plaster or resin molds casting.

Table A.2
Energy and water consumption for the two main technologies (Source: author).

N° Pieces	500,000 pcs/year		
	Electrical Energy GJ/year	Thermal Energy GJ/year	Water m ³ /yr
Plaster casting	34,077	132,692	30,329
Pressure casting	27,360	115,177	240,270

Despite new technical advances improving the specific consumption of energy, there is still a long way to go up to reach admissible ratios of consumption (Weisser, 2007).

Table A3 shows the improvement of specific energy consumption in the ceramics industry in Europe.

From an environmental point of view, a sanitary-ware factory consumes 130,000 m³ of water per year to produce about 500,000

Table A.3

Specific energy consumption in the ceramics industry in Europe (cer_bref_0807.pdf, 2007).

Sector	Unit	1980	1985	1990	1995	2000	2003
Bricks and roof tiles	GJ/Mg	2.65	2.45	2.19	2.06	2.38	2.31
Walls and floor tiles	GJ/Mg	11.78	9.16	6.76	5.45	5.74	5.60
Refractory products	GJ/Mg	4.88	4.96	6.51	4.91	5.41	5.57
Sanitary-ware	GJ/Mg	26.56	24.21	22.27	22.76	20.88	21.87
Vitrified clay pipes	GJ/Mg			5.75	5.77	6.10	5.23
Table and ornamental ware	GJ/Mg			47.56	38.91	43.46	45.18
Technical ceramics	GJ/Mg					34.72	50.39

Currently, in Europe, the ceramic industry employs 338,000 persons and provides a business turnover of 27.8 billion euros (Ceramics - Growth - European Commission, 2017). In 2008 the European ceramic business reached a value of 28 billion euros (Growth - European Commission - Publications, 2008). The figures have barely changed.

In 2002 the European sanitary-ware industry turnover was 2 billion euros (Bulletin of Ceramic Spanish Society, 2004). Nowadays, it is about 1.67 billion euros (ceramic-industry-roadmap-paving-the-way-to-2050.pdf, 2012) and represents 9% of the ceramic employment.

The production-share is led by five main production countries as shown in Fig. A3:

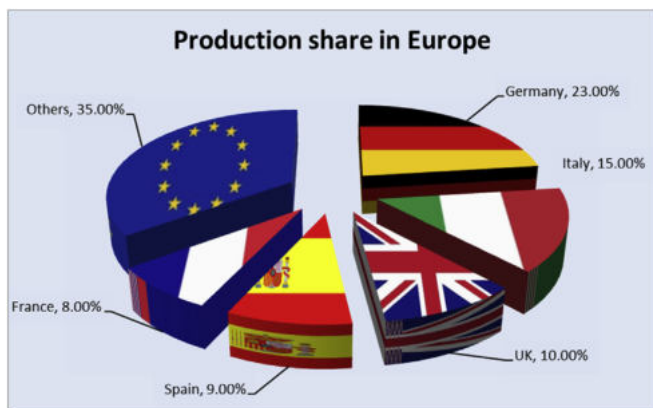


Fig. A.3. Production share of sanitary-ware in Europe. Source: Competitiveness of the Ceramics Sector (Growth - European Commission - Publications, 2008).

As per ACIMAC (Ceramic World Review 114/2015, 2015), The European Union produced 44.6 million pieces in 2004 and 41.5 in 2014. Although the crisis has reduced the pace of production in Europe, it is still highly relevant.

Assuming that sanitary-ware fixtures have an average weight of over 10 kg, the total energy to produce these pieces is great enough to be taken into consideration. Table A4 shows the energy consumption for three sanitary-ware sample factories.

Table A.4

Energy consumption data for three simple plants (cer_bref_0807.pdf, 2007).

Parameter	Unit	Plant 1	Plant 2	Plant 3
Production capacity	Mg/year	10,000	5120	2900
Raw material use	Mg/year	17,000	7801	3500
Electrical energy consumption	MJ/kg product	0.36	3.32	3.16
Thermal energy consumption	MJ/kg product	30	22	28

pieces (LIFE_ENVIP.pdf, 2012). The aim of this paper is to show energy and emissions calculations that reach up to 100 kWh and 27 kg of CO₂ per piece showing how important the environmental impact of sanitary-ware production can be.

The world ceramics market is worth in the region of €120 billion (Growth - European Commission - Publications, 2008).

ACIMAC research (Ceramic World Review 114/2015, 2015) shows that 216.6 million pieces were globally produced in 2004, raising to 349.3 million in 2014. This would mean that about 91 Mm³ of water, 35 TWh and 9.45 Mt were needed worldwide to produce them. These figures should draw anyone's attention to this industry sector, which, in addition is supposed to be so sensitive to energy price impact.

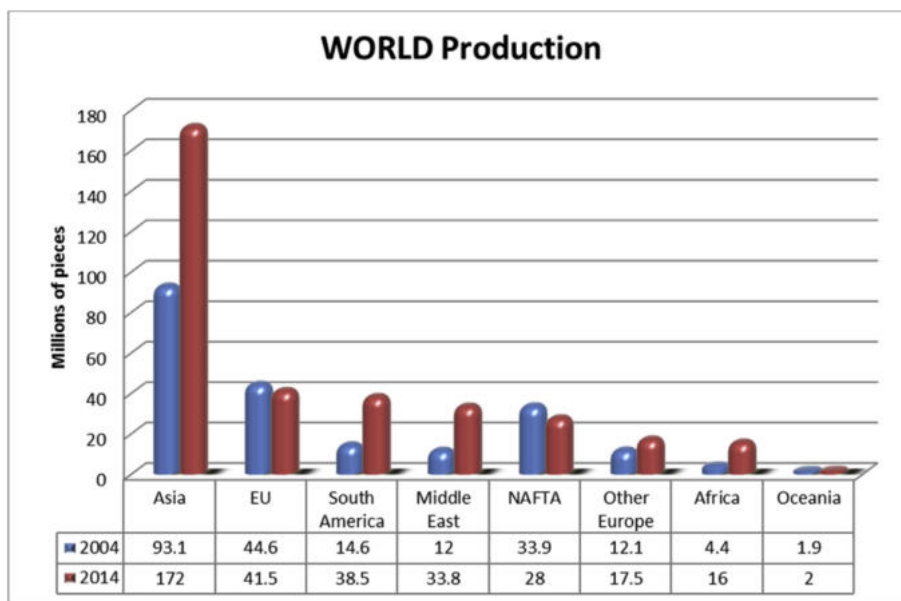
World sanitary-ware production is estimated to have grown by 61.3% from 2004 to 2014, corresponding to a compound annual growth rate of 4.9%. Asia, the largest production area with 172 million pieces in 2014 (85% growth since 2004), has increased its share of total production to almost 50% over a decade. China in particular is the world's largest producer and has almost doubled its volume to reach an estimated 120 million pieces. However, the most significant growth areas were Africa (+300%), the Middle East (+181.7%) and South America (+163.7%), the latter region driven by Brazil as the world's second largest producer country (24 million pieces). In a context of steady globalization of production and markets, the negative figure for the EU and NAFTA regions hardly comes as a surprise, with production volumes dropping over the decade by 3 and 6 million pieces respectively. These numbers in the NAFTA region should rise and alert because Mexico has almost tripled its volumes, which are now estimated at 18 million pieces. Reflecting the trend in other areas of the economy, the fast-growing BRIC and Next 11 regions also registered the highest growth rates in the sanitary-ware industry over a decade (respectively +74% and +108%) compared to the more modest average figure of +27% in other countries. World sanitary-ware production is also increasingly concentrated in the hands of a few very large multinational groups. It is estimated that in 2014 the top 20 groups (excluding those in China) produced over 43% of the total world production. As stated in Table 4, up to 30 MJ are needed to produce a kg of sanitary-ware. If applied an average weight of 20 kg per sanitary-ware piece, it can be deduced that about 79.62 PJ has been the energy demand increase during these 10 years and 209.58 PJ were devoted in 2014 for just sanitary-ware manufacturing worldwide.

Table A5 and Fig. A4 show the evolution of the distribution of sanitary-ware production around the world.

Table A.5

World production of sanitary-ware by area (Ceramic World Review 114/2015, 2015).

AREA	2004	2014	% on total	% on total
	Pieces (million)	Pieces (million)	2004	2014
Asia	93.1	172	42.98%	49.24%
EU	44.6	41.5	20.59%	11.88%
South America	14.6	38.5	6.74%	11.02%
Middle East	12	33.8	5.54%	9.68%
NAFTA	33.9	28	15.65%	8.02%
Other Europe	12.1	17.5	5.59%	5.01%
Africa	4.4	16	2.03%	4.58%
Oceania	1.9	2	0.88%	0.57%
WORLD	216.6	349.3	100.00%	100.00%

**Fig. A.4.** WORLD Sanitary-ware production by area.



5.3. Raw materials

Though raw materials are not within the scope of this research, it is important to emphasize that their substitution and proper selection of them can widely influence the consumption of resources. Consequently, CO₂ emissions can vary accordingly. Models have been designed to connect the raw materials and the sustainability (Bontempi, 2017a, b). The use of embodied energy and the CO₂ footprint may be very appropriate in accounting for energy and emissions involved in material production.

References

- Akinbode, F.O., 1995. Energy utilization in the clay and pottery processing industries in Nigeria. *Energy* 20, 585–587. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(94\)0086-1](https://doi.org/10.1016/0360-5442(94)0086-1).
- Becchio, C., Ferrando, D.G., Fregonara, E., Milani, N., Quercia, C., Serra, V., 2015. The cost optimal methodology for evaluating the energy retrofit of an ex-industrial building in turin. *Energy procedia*. In: 6th International Building Physics Conference, IBPC, vol. 2015, pp. 1039–1044. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.057>, 78.
- Bigerna, S., Bollino, C.A., Micheli, S., 2016. Renewable energy scenarios for costs reductions in the European Union. *Renew. Energy* 96 (Part A), 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.024>.
- Boharb, A., Allouhi, A., Saidur, R., Kousksou, T., Jamil, A., Mourad, Y., Benbassou, A., 2016. Auditing and analysis of energy consumption of an industrial site in Morocco. *Energy* 101, 332–342. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.035>.
- Bonacina, F., Corsini, A., De Propriis, L., Marchegiani, A., Mori, F., 2015. Industrial energy management systems in Italy: state of the art and perspective. *Energy procedia*. In: 70th Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, ATI2015, vol. 82, pp. 562–569. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.871>.
- Bontempi, E., 2017a. Raw Materials Substitution Sustainability, SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. Springer International Publishing.
- Bontempi, E., 2017b. A new approach for evaluating the sustainability of raw materials substitution based on embodied energy and the CO₂ footprint. *J. Clean. Prod.* 162, 162–169. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.028>.
- Borge-Diez, D., Colmenar-Santos, A., Pérez-Molina, C., Castro-Gil, M., 2012. Experimental validation of a fully solar-driven triple-state absorption system in small residential buildings. *Energy Build., Cool Roofs, Cool Pavements, Cool Cities, and Cool World* 55, 227–237. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.040>.
- Bulletin of Ceramic Spanish Society [WWW Document], 2004. URL http://boletines.secv.es/upload/2007013192112.contenido_adicional.pdf (accessed 12.2.16).
- Cer bref 0807.pdf [WWW Document], 2007. URL http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/cer_bref_0807.pdf (accessed 12.2.16).
- Ceramic Technology Sanitary-ware, 2010th ed, 2010. SACMI IMOLA S.C.
- Ceramic World Review 114/2015 [WWW Document], 2015. URL <http://www.ceramicworldweb.it/cww-it/magazines/ceramic-world-review-1142015/> (accessed 12.2.16).
- Ceramic-industry-roadmap-paving-the-way-to-2050.pdf [WWW Document], 2012. URL <http://cerameunie.eu/topics/cerame-unie-sectors/cerame-unie/ceramic-industry-roadmap-paving-the-way-to-2050/?media=4249&f=Ceramic%20Roadmap%20to%202050%20EN.pdf> (accessed 12.2.16).
- Ceramics, 2017. Growth - European Commission [WWW Document]. Growth. URL http://growth/sectors/raw-materials/industries/non-metals/ceramics_en (accessed 12.2.16).
- Chiaroni, D., Chiesa, M., Chiesa, V., Franzò, S., Frattini, F., Toletti, G., 2016. Introducing a new perspective for the economic evaluation of industrial energy efficiency technologies: an empirical analysis in Italy. *Sustain. Energy Technol. Assess* 15, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2016.02.004>.
- Colmenar-Santos, A., Terán de Lober, L.N., Borge-Diez, D., Castro-Gil, M., 2013. Solutions to reduce energy consumption in the management of large buildings.

- Energy Build. 56, 66–77. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.004>.
- Colmenar-Santos, A., Campiñez-Romero, S., Pérez-Molina, C., Mur-Pérez, F., 2016a. An assessment of photovoltaic potential in shopping centres. *Sol. Energy* 135, 662–673. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.049>.
- Colmenar-Santos, A., Rosales-Asensio, E., Borge-Diez, D., Blanes-Peiró, J.-J., 2016b. District heating and cogeneration in the EU-28: current situation, potential and proposed energy strategy for its generalisation. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 62, 621–639. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.004>.
- Colmenar-Santos, A., Zarzuelo-Puch, G., Borge-Diez, D., García-Diéguez, C., 2016c. Thermodynamic and exergoeconomic analysis of energy recovery system of biogas from a wastewater treatment plant and use in a Stirling engine. *Renew. Energy* 88, 171–184. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.001>.
- Colmenar-Santos, A., Zarzuelo-Puch, G., Borge-Diez, D., García-Diéguez, C., 2016d. Thermodynamic and exergoeconomic analysis of energy recovery system of biogas from a wastewater treatment plant and use in a Stirling engine. *Renew. Energy* 88, 171–184. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.001>.
- Communication Environmental Website | GREEN STORY | TOTO [WWW Document], 2014. URL <http://www.toto.co.jp/greenchallenge/technology/story/14/en/> (accessed 12.2.16).
- Effenberger, F., Hilbert, A., 2016. Towards an energy information system architecture description for industrial manufacturers: decomposition & allocation view. *Energy* 112, 599–605. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.106>.
- Escasez de agua en la union europea [WWW Document], 2011. URL http://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/factsheets/water_scarcity/es.pdf (accessed 12.2.16).
- European Commission - Environment - LIFE Programme [WWW Document], 2012. URL <http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.search&cfid=525432&cfToken=da688e309177234-F3B078A2-C646-2140-857C21B98E5B4C36> (Accessed 12.2.16).
- European Commission, 2014. Press Releases - Press Release - 2030 Climate and Energy Goals for a Competitive, Secure and Low-carbon EU Economy [WWW Document]. http://europa.eu/rapid/press-release_IP-14-54_en.htm (Accessed 12.2.16).
- European Commission, 2016a. EU Climate Action [WWW Document]. *Clim. Action - Eur. Comm.* URL https://ec.europa.eu/clima/citizens/eu_en (Accessed 3.14.17).
- European Commission, 2016b. Paris Agreement [WWW Document]. *Clim. Action - Eur. Comm.* URL https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en (Accessed 5.21.18).
- Galati, M., Iuliano, L., Salmi, A., Atzeni, E., 2017. Modelling energy source and powder properties for the development of a thermal FE model of the EBM additive manufacturing process. *Addit. Manuf.* 14, 49–59.
- Giacone, E., Mancò, S., 2012. Energy efficiency measurement in industrial processes. *Energy* 38, 331–345. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.11.054>.
- Giuseppe Ingarao, 2017. Manufacturing strategies for efficiency in energy and resources use: the role of metal shaping processes. *J. Clean. Prod.* 142, 2872–2886.
- Growth European Commission - Publications [WWW Document], 2008. URL http://ec.europa.eu/growth/tools-databases/newsroom/cf/itemdetail.cfm?item_id=3440&lang=en&title=FWC-Sector-Competitiveness-Studies--Competitiveness-of-the-Ceramics-Sector (accessed 12.2.16).
- Grubbström, R.W., 2015. On the true value of resource consumption when using energy in industrial and other processes. *Int. J. Prod. Econ., Current Research Issues in Production Economics* 170 (Part B), 377–384. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.07.011>.
- Habib, M.A., Hasanuzzaman, M., Hosenuzzaman, M., Salman, A., Mehadi, M.R., 2016. Energy consumption, energy saving and emission reduction of a garment industrial building in Bangladesh. *Energy* 112, 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.062>.
- Hasan, M., Zhang, M., Wu, W., Langrish, T.A.G., 2016. Discounted cash flow analysis of greenhouse-type solar kilns. *Renew. Energy* 95, 404–412. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.050>.
- Helleno, Andre Lluís, de Moraes, Aroldo José Isaias, Simon, Alexandr Tadeu, 2016. Integrating sustainability indicators and Lean Manufacturing to assess manufacturing processes: application case studies in Brazilian industry. *J. Clean. Prod.* 1–12.
- Li, C., Goswami, D.Y., Shapiro, A., Stefanakos, E.K., Demirkaya, G., 2012. A new combined power and desalination system driven by low grade heat for concentrated brine. *Energy, Energy and Exergy Modelling of Advance Energy Systems* 46, 582–595. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.07.050>.
- Life Envip.pdf [WWW Document], 2012. URL http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n_proj_id=4630&docType=pdf (accessed 12.2.16).
- Madan, Jatinder, Mani, Maesh, Lee, Jae Hyun, Lyons, Kevin W., 2014. Energy performance evaluation and improvement of unit-manufacturing processes: injection molding case study. *J. Clean. Prod.* 105, 157–170.
- May, G., Stahl, B., Taisch, M., Kiritsis, D., 2016. Energy management in manufacturing: from literature review to a conceptual framework. *J. Clean. Prod.* 1–26.
- Merlin, K., Soto, J., Delaunay, D., Traonvouez, L., 2016. Industrial waste heat recovery using an enhanced conductivity latent heat thermal energy storage. *Appl. Energy* 183, 491–503. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.007>.
- Peng, Z.W., Liu, Z.J., 2009. Energy-saving and emission reduction for ceramic sanitary ware based on computer aided engineering. In: 2009 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. Presented at the 2009 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICBBE.2009.5162774>.
- Petek, J., Glavič, P., Kostevšek, A., 2016. Comprehensive approach to increase energy efficiency based on versatile industrial practices. *J. Clean. Prod.* 112 (Part 4), 2813–2821. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.046>.
- Roldán-Blay, C., Escrivá-Escrivá, G., Roldán-Porta, C., Álvarez-Bel, C., 2017. An optimisation algorithm for distributed energy resources management in micro-scale energy hubs. *Energy* 132, 126–135. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.038>.
- Sa, A., Thollander, P., Cagno, E., 2017. Assessing the driving factors for energy management program adoption. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 74, 538–547. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.061>.
- Saidur, R., Hossain, M.S., Islam, M.R., Fayaz, H., Mohammed, H.A., 2011. A review on kiln system modeling. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15, 2487–2500. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.020>.
- Schreiber, H., Graf, S., Lanzerath, F., Bardow, A., 2015. Adsorption thermal energy storage for cogeneration in industrial batch processes: experiment, dynamic modeling and system analysis. *Appl. Therm. Eng.* 89, 485–493. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.06.016>.
- Schulze, M., Nehler, H., Ottosson, M., Thollander, P., 2016. Energy management in industry – a systematic review of previous findings and an integrative conceptual framework. *J. Clean. Prod.* 112 (Part 5), 3692–3708. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.060>.
- Sequia y consumo excesivo de agua en Europa — Agencia Europea de Medio Ambiente [WWW Document], 2009. URL <http://www.eea.europa.eu/es/pressroom/newsreleases/sequia-y-consumo-excesivo-de-agua-en-europa> (accessed 12.2.16).
- Shao, S., Yang, L., Gan, C., Cao, J., Geng, Y., Guan, D., 2016. Using an extended LMDI model to explore techno-economic drivers of energy-related industrial CO2 emission changes: a case study for Shanghai (China). *Renew. Sustain. Energy Rev.* 55, 516–536. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.081>.
- Sipilä, K., 2016. 3-Cogeneration, biomass, waste to energy and industrial waste heat for district heating A2-Wiltshire, Robin. In: *Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems*, Woodhead Publishing Series in Energy. Woodhead Publishing, Oxford, pp. 45–73.
- Thollander, P., Kimura, O., Wakabayashi, M., Rohdin, P., 2015. A review of industrial energy and climate policies in Japan and Sweden with emphasis towards SMEs. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 50, 504–512. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.102>.
- Uhlmann, E., Reinkober, S., Hollerbach, T., 2016. Energy efficient usage of industrial robots for machining processes. *Procedia CIRP. The 23rd CIRP Conference on Life Cycle Engineering* 48, 206–211. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.241>.
- Utlu, Z., 2015. Investigation of the potential for heat recovery at low, medium, and high stages in the Turkish industrial sector (TIS): an application. *Energy* 81, 394–405. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.12.052>.
- Vittorini, D., Cipollone, R., 2016. Energy saving potential in existing industrial compressors. *Energy* 102, 502–515. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.115>.
- Wang, X., El-Farra, N.H., Palazoglu, A., 2017. Optimal scheduling of demand responsive industrial production with hybrid renewable energy systems. *Renew. Energy, Special Issue: Control and Optimization of Renewable Energy Systems* 100, 53–64. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.051>.
- Weisser, D., 2007. A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies. *Energy* 32, 1543–1559. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.01.008>.
- Yin, Q., Du, W.-J., Ji, X.-L., Cheng, L., 2016. Optimization design and economic analyses of heat recovery exchangers on rotary kilns. *Appl. Energy* 180, 743–756. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.042>.
- Zhang, Z., 1997. Energy efficiency and environmental pollution of brickmaking in China. *Energy* 22, 33–42. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(96\)00078-3](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(96)00078-3).
- Zhou, D.Q., Wang, Q., Su, B., Zhou, P., Yao, L.X., 2016. Industrial energy conservation and emission reduction performance in China: a city-level nonparametric analysis. *Appl. Energy* 166, 201–209. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.081>.

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 208 de 231

ANEXO III: “*Management tool to optimize energy and water consumption in the sanitary-ware industry*”. CERTIFICADO DE PUBLICACIÓN





Journal Of Cleaner Production

Certificate of publication for the article titled:

"Management tool to optimize energy and water consumption in the sanitary-ware industry"

Authored by:
cuviella carlos




Published in:
Volume 197P1, 2018, Pages 280-296

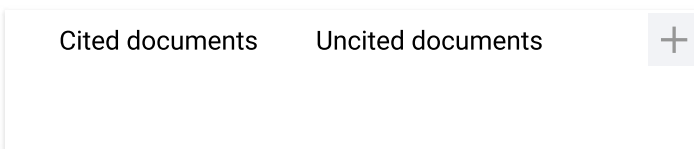
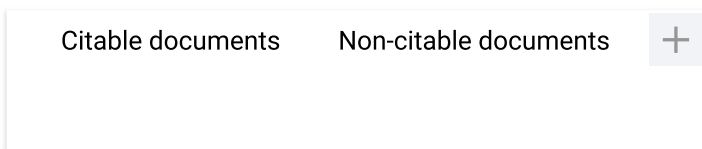
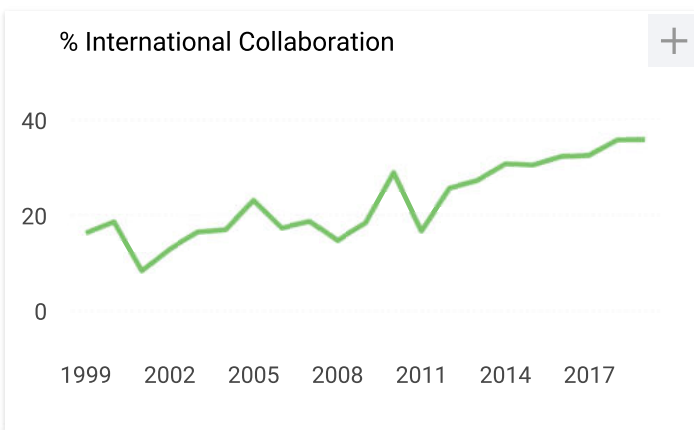
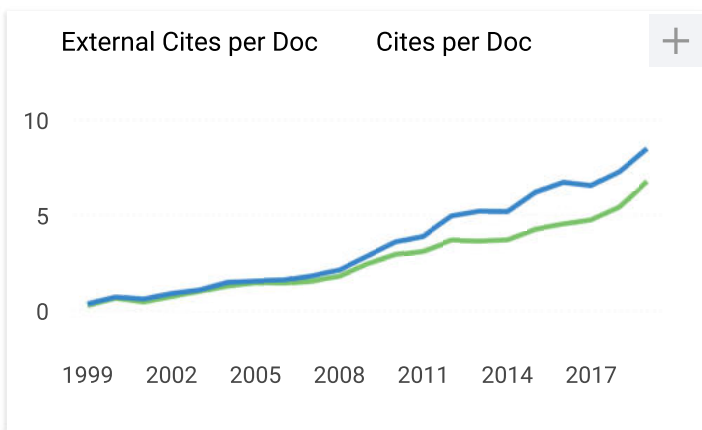
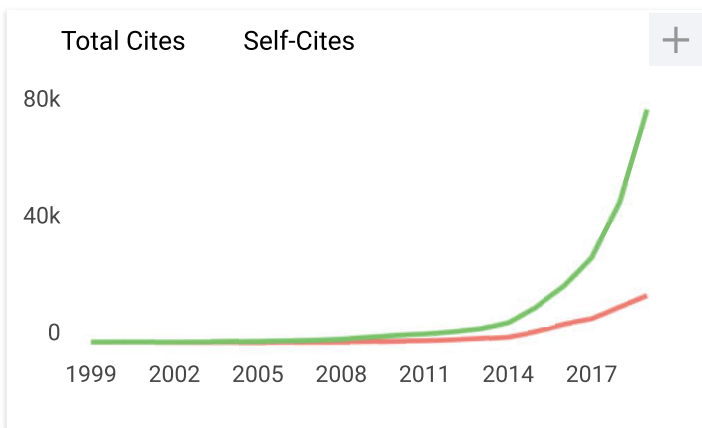
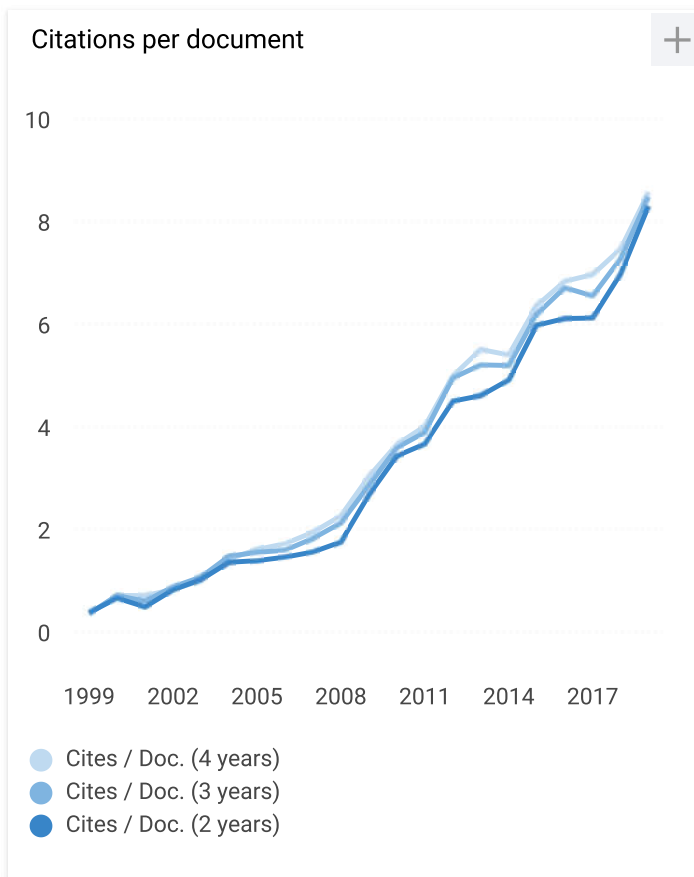
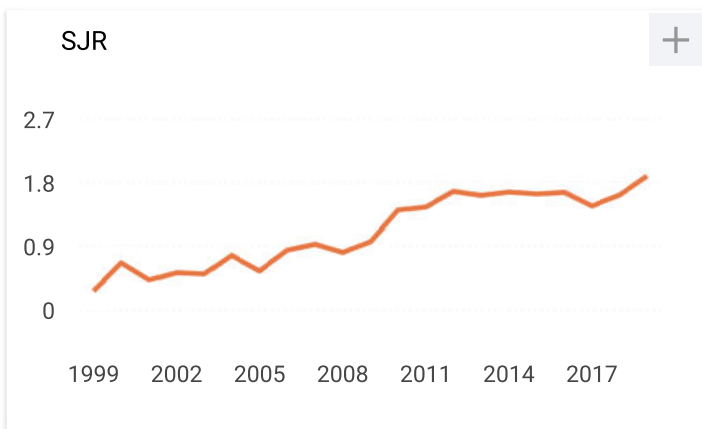
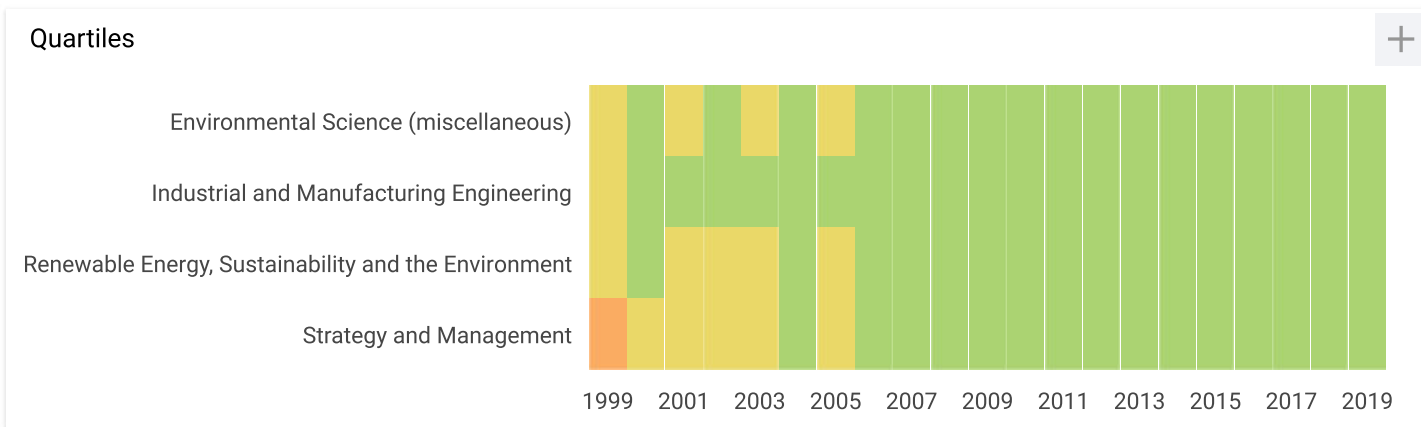
 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 209 de 231

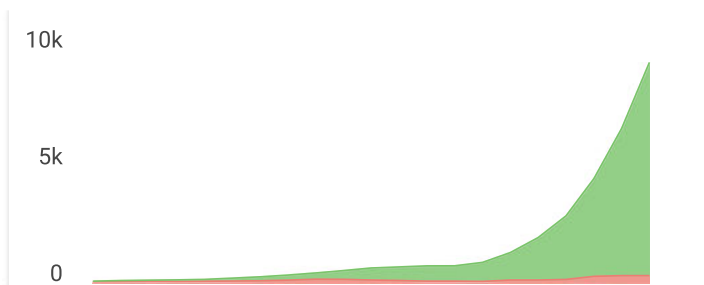
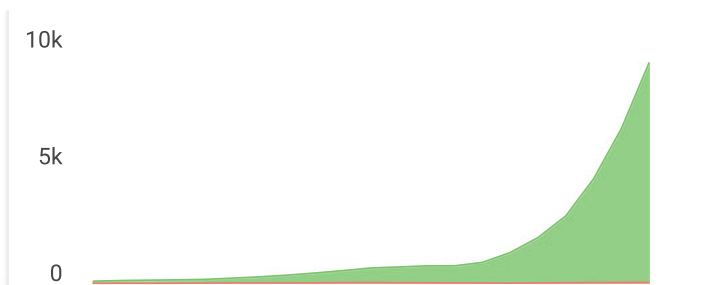
ANEXO IV: “Management tool to optimize energy and water consumption in the sanitary-ware industry”. FACTOR DE IMPACTO



Journal of Cleaner Production

Country	Netherlands -  SCIMAGO INSTITUTIONS RANKINGS	<h1>173</h1>
Subject Area and Category	<p>Business, Management and Accounting Strategy and Management</p> <p>Energy Renewable Energy, Sustainability and the Environment</p> <p>Engineering Industrial and Manufacturing Engineering</p> <p>Environmental Science Environmental Science (miscellaneous)</p>	
Publisher	Elsevier Ltd.	H Index
Publication type	Journals	
ISSN	09596526, 18791786	
Coverage	1993-2020	
Scope	<p>The Journal of Cleaner Production is an international, transdisciplinary journal focusing on Cleaner Production, Environmental, and Sustainability research and practice. Through our published articles, we aim at helping societies become more sustainable. 'Cleaner Production' is a concept that aims at preventing the production of waste, while increasing efficiencies in the uses of energy, water, resources, and human capital. The Journal of Cleaner Production serves as a platform for addressing and discussing theoretical and practical cleaner production, encompassing environmental, and sustainability issues in corporations, governments, education institutions, regions, and societies. Subject areas include, but are not limited to: -Cleaner production and technical processes -Sustainable Development and Sustainability -Sustainable Consumption -Environmental and sustainability assessment - Sustainable Products and Services -Corporate sustainability and Corporate Social Responsibility -Education for Sustainable Development -Governance, legislation, and policy for sustainability</p>	
	<p> Homepage</p> <p>How to publish in this journal</p> <p>Contact</p> <p> Join the conversation about this journal</p>	





Journal of Cleaner Production

Q1

Environmental Science (miscellaneous)

best quartile

SJR 2019

1.89

powered by scimagojr.com

← Show this widget in your own website

Just copy the code below and paste within your html code:

```
<a href="https://www.scimaç
```

Metrics based on Scopus® data as of April 2020

N **Nuryusnita** 3 months ago

Good day

May I know where to check for how many issues published by certain journal publication?

thank you

Regard,
Yusnita

reply

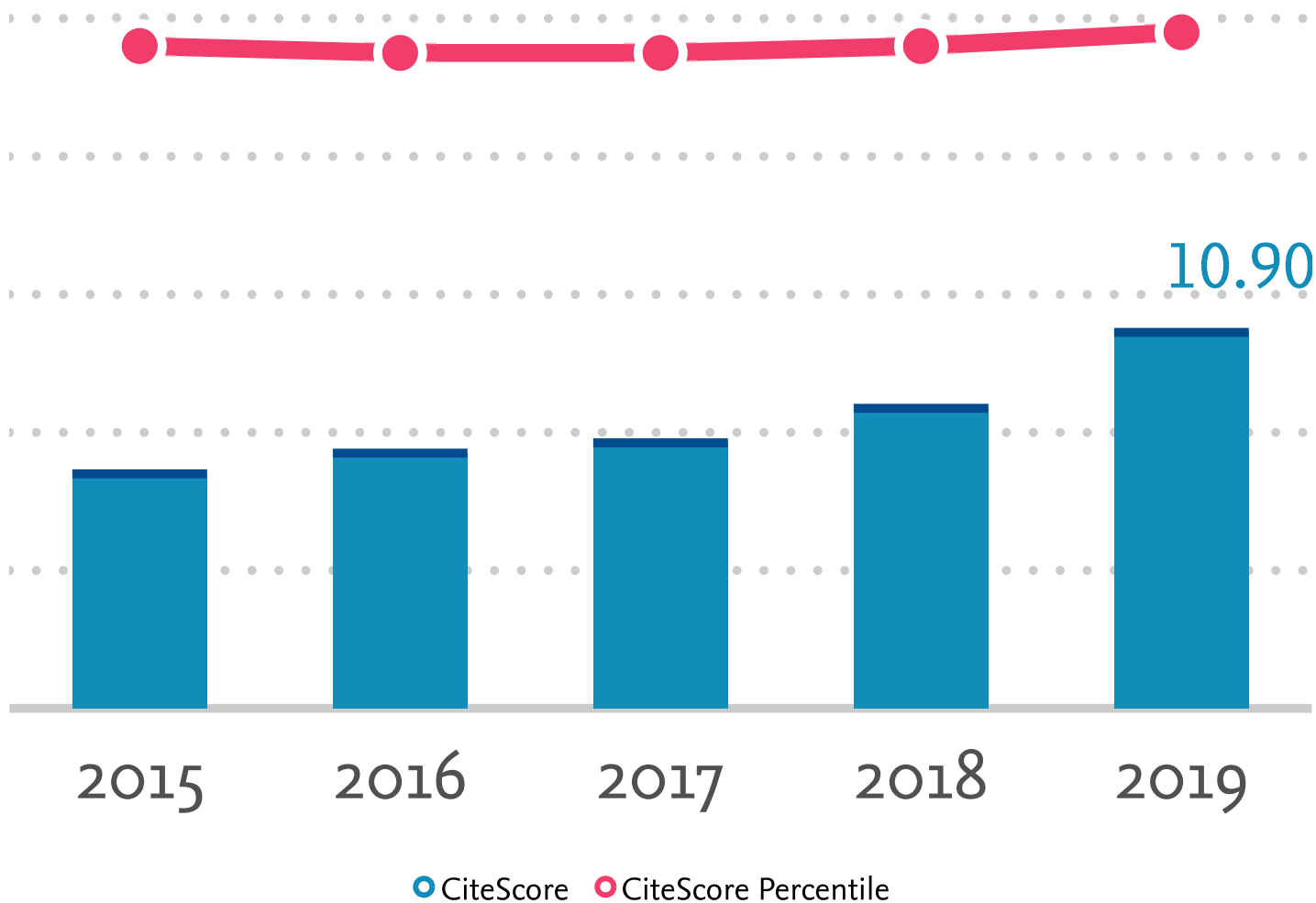


Melanie Ortiz 3 months ago

Dear Nuryusnita,
thank you for contacting us.

SCImago Team

CiteScore



ABOUT CITESCORE

CiteScore measures the average citations received per peer-reviewed document published in this title. CiteScore values are based on citation counts in a range of four years (e.g. 2016-2019) to peer-reviewed documents (articles, reviews, conference papers, data papers and book chapters) published in the same four calendar years, divided by the number of these documents in these same four years (e.g. 2016 – 19).

> View the full metrics for this title (<http://www.scopus.com/sourceid/19167>)

METRICS

YEAR	CITESCORE	CITESCORE PERCENTILE	CITATIONS	DOCUMENTS
2019	10.9	98	137661	12637
2018	8.7	96	85052	9776
2017	7.7	95	51626	6683
2016	7.4	95	33589	4540
2015	6.8	96	19673	2895

DEFINITION

CiteScore

CiteScore measures the average citations received per document published in a title. CiteScore values are based on citation counts in a range of four years (e.g. 2016-2019) to peer-reviewed documents (articles, reviews, conference papers, data papers and book chapters) published in the same four calendar years, divided by the number of these documents in these same four years (e.g. 2016 – 19).

For example, CiteScore 2019:

A = Citations to articles, reviews, conference papers, data papers and book chapters published in 2016-2019

B = Sum of articles, reviews, conference papers, data papers and book chapters published in 2016-2019

2019 CiteScore = A/B

A CiteScore is available for most active serial titles on Scopus — peer-reviewed journals, book series, conference proceedings and trade journals.

CiteScore Percentile

CiteScore Percentile indicates the relative standing of a serial title in its subject field.

A serial that has a CiteScore Percentile of 96% is ranked according to CiteScore as high or higher than 96% of titles in that category. A title will receive a CiteScore Percentile for each subject area in which it's indexed in Scopus.

CiteScore metrics

CiteScore™ metrics are a new standard that help to measure journal citation impact. They are comprehensive, transparent, current and free metrics calculated using data from Scopus®, the largest abstract and citation database of peer-reviewed literature.

CiteScore metrics is a family of eight indicators that offer complementary views to analyze the publication influence of serial titles of interest:

- CiteScore
- CiteScore Tracker
- CiteScore Percentile
- CiteScore Quartiles
- CiteScore Rank
- Citation Count
- Document Count
- Percentage Cited

This page shows the highest percentile and related rank for the title. A title will receive a CiteScore Percentile and rank for each subject area in which it's indexed in Scopus.

Full metrics for this title are available for free on [Scopus.com \(http://www.scopus.com/sourceid/19167\)](http://www.scopus.com/sourceid/19167)

OTHER METRICS IN IMPACT

> **IMPACT FACTOR (/JOURNALS/0959-6526/IMPACT_FACTOR)**

> **5 YEAR IMPACT FACTOR (/JOURNALS/0959-6526/IMPACT_FACTOR_5_YEAR)**

> **ARTICLE INFLUENCE & EIGENFACTOR (/JOURNALS/0959-6526/ARTICLE_INFLUENCE)**

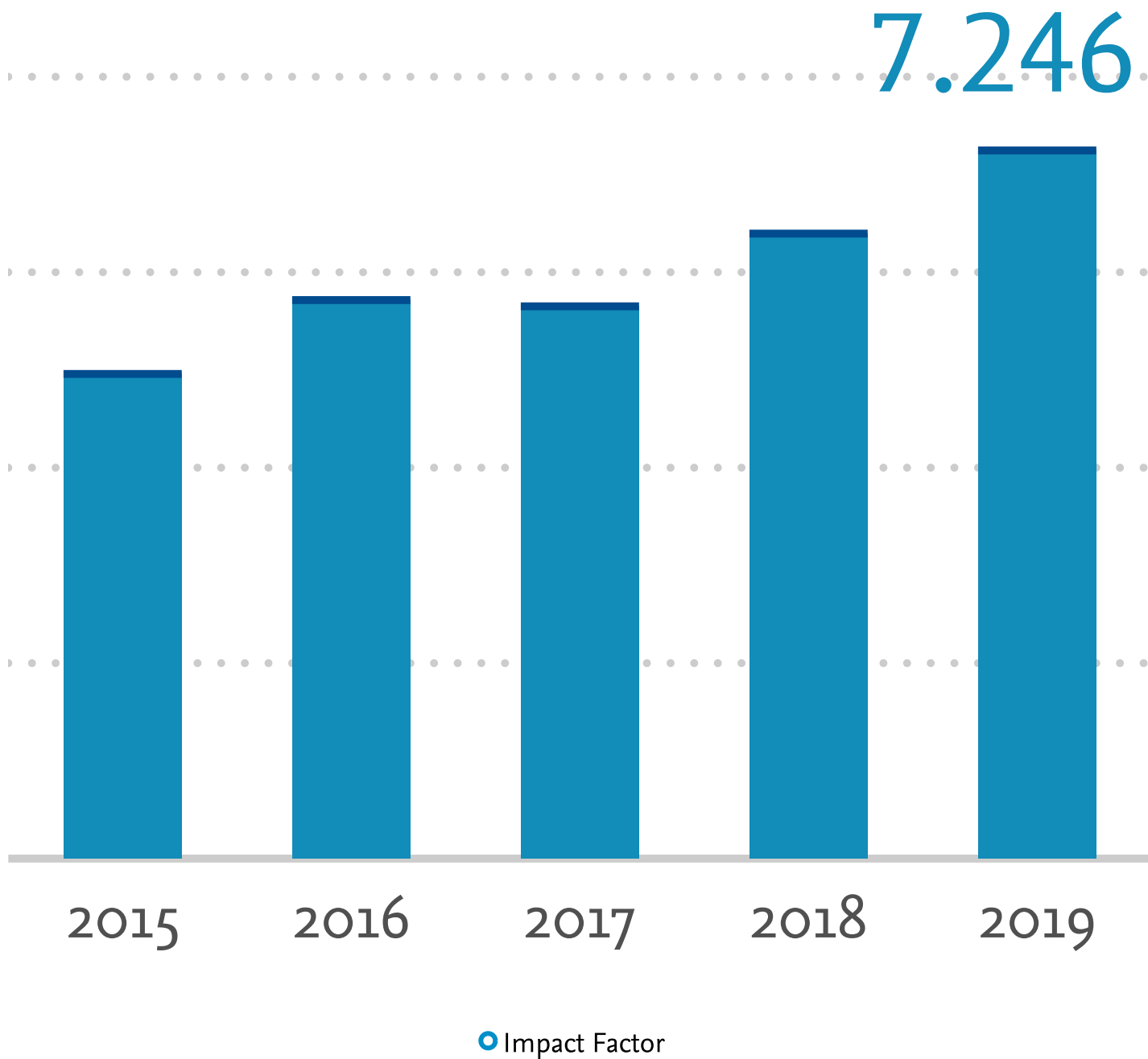
> **SNIP (/JOURNALS/0959-6526/SNIP)**

> **SJR (/JOURNALS/0959-6526/SJR)**

Elsevier © 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Elsevier.com (<http://www.elsevier.com>) | About Elsevier (<http://www.elsevier.com/about/at-a-glance>) | Terms & Conditions
(<http://www.elsevier.com/legal/elsevier-website-terms-and-conditions>) | Privacy Policy
(<http://www.elsevier.com/legal/privacy-policy>)

Impact Factor & Ranking



ABOUT IMPACT FACTOR & RANKING

Measure of the number of times an average paper in this journal is cited. Copyright Clarivate Analytics.

METRICS

YEAR	I.F.	ENGINEERING, ENVIRONME...	ENVIRONMENTAL SCIENCES	GREEN & SUSTAINABLE SCIE...
2019	7.246	8/53	19/265	7/49
2018		8/52	18/250	6/35
2017		7/50	21/241	6/33
2016		6/49	17/229	5/37
2015		5/49	16/224	5/29

DEFINITION

Impact Factor

The Journal Impact Factor is published each year by Clarivate Analytics. It is a measure of the number of times an average paper in a particular journal is cited during the preceding two years.

For example:

A = the number of times articles published in a specific journal in 2014 and 2015 were cited by journals during 2016.

B = the total number of 'citable items' published by that journal in 2014 and 2015. ('Citable items' are usually articles, reviews, proceedings, etc.; not editorials or letters-to-the-editor.)

2016 impact factor = A/B.

Actual value is intentionally only displayed for the most recent year. Earlier values are available in the Journal Citation Reports from Clarivate Analytics

ISI ranking

Journals are often ranked by Impact Factor in an appropriate Clarivate Analytics subject category. As there are now two Impact Factors published – two-year and five-year Impact Factors – this rank may differ, so care is needed when assessing these ranked lists to understand which of the two metrics is being used. In addition, journals can be categorized in multiple subject categories, giving them different ranks for each subject. Consequently, a rank should always be in context to the subject category.

OTHER METRICS IN IMPACT

> **CITESCORE** ([/JOURNALS/0959-6526/CITESCORE](#))

> **5 YEAR IMPACT FACTOR** ([/JOURNALS/0959-6526/IMPACT_FACTOR_5_YEAR](#))

> **ARTICLE INFLUENCE & EIGENFACTOR** ([/JOURNALS/0959-6526/ARTICLE_INFLUENCE](#))

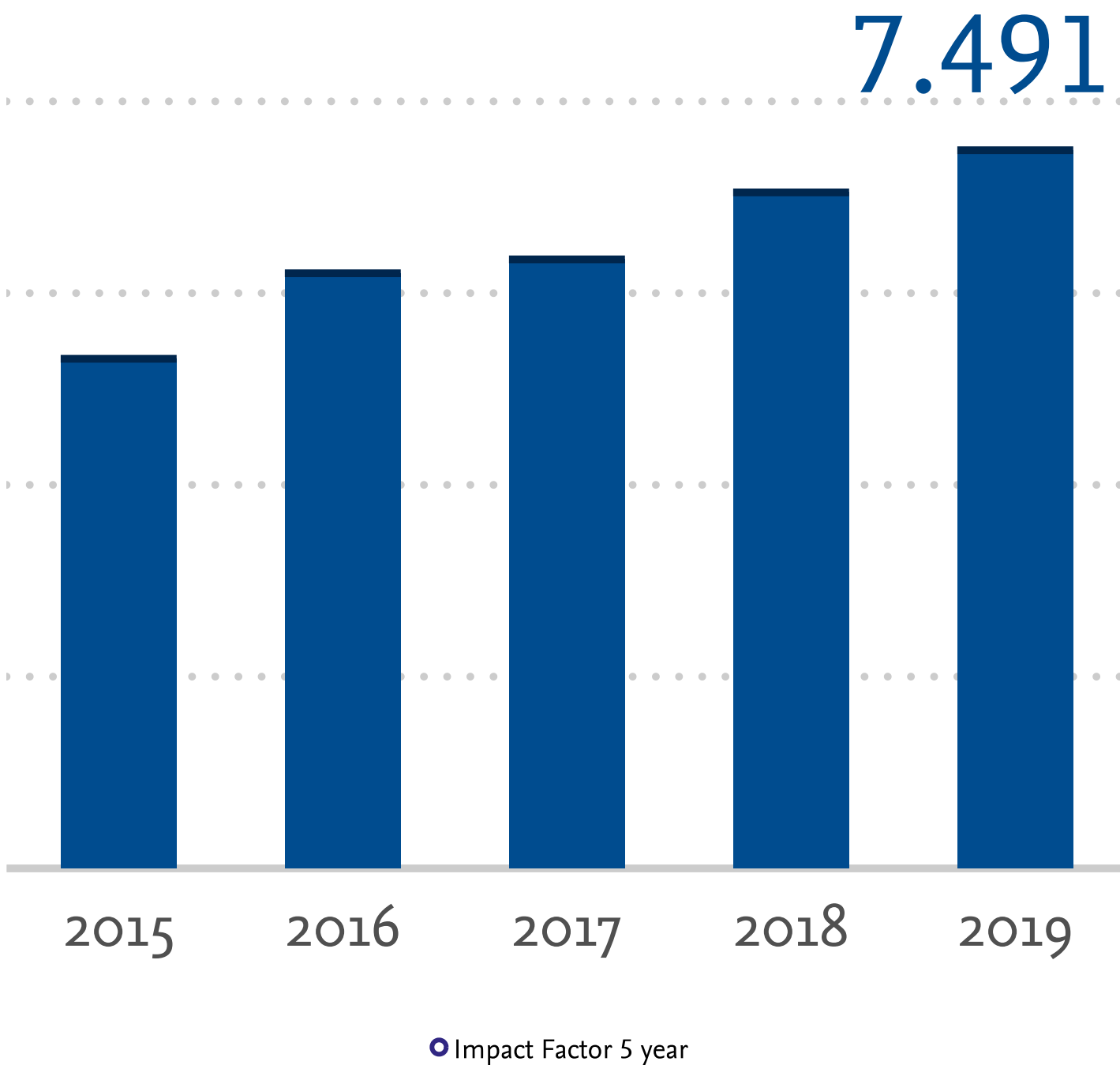
> **SNIP** ([/JOURNALS/0959-6526/SNIP](#))

> **SJR** ([/JOURNALS/0959-6526/SJR](#))

Elsevier © 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Elsevier.com (<http://www.elsevier.com>) | About Elsevier (<http://www.elsevier.com/about/at-a-glance>) | Terms & Conditions (<http://www.elsevier.com/legal/elsevier-website-terms-and-conditions>) | Privacy Policy (<http://www.elsevier.com/legal/privacy-policy>)

5 Year Impact Factor & Ranking



ABOUT 5 YEAR IMPACT FACTOR & RANKING

Impact Factor based on 5 years of history. Copyright Clarivate Analytics.

METRICS

YEAR	I.F.	ENGINEERING, ENVIRONME...	ENVIRONMENTAL SCIENCES	GREEN & SUSTAINABLE SCIE...
2019	7.491	8/52	18/241	7/41
2018		7/52	17/236	6/32
2017		7/50	19/231	6/32
2016		5/49	14/229	5/37
2015		6/48	19/218	5/27

DEFINITION

Impact Factor

A base of five years may be more appropriate for journals in certain fields because the body of citations may not be large enough to make reasonable comparisons, or it may take longer than two years to publish and distribute leading to a longer period before others cite the work.

Actual value is intentionally only displayed for the most recent year. Earlier values are available in the Journal Citation Reports from Clarivate Analytics.

ISI ranking

Journals are often ranked by Impact Factor in an appropriate Clarivate Analytics subject category. As there are now two Impact Factors published – two-year and five-year Impact Factors – this rank may differ, so care is needed when assessing these ranked lists to understand which of the two metrics is being used. In addition, journals can be categorized in multiple subject categories, giving them different ranks for each subject. Consequently, a rank should always be in context to the subject category.

OTHER METRICS IN IMPACT

> **CITESCORE (/JOURNALS/0959-6526/CITESCORE)**

> **IMPACT FACTOR (/JOURNALS/0959-6526/IMPACT_FACTOR)**

> **ARTICLE INFLUENCE & EIGENFACTOR (/JOURNALS/0959-6526/ARTICLE_INFLUENCE)**

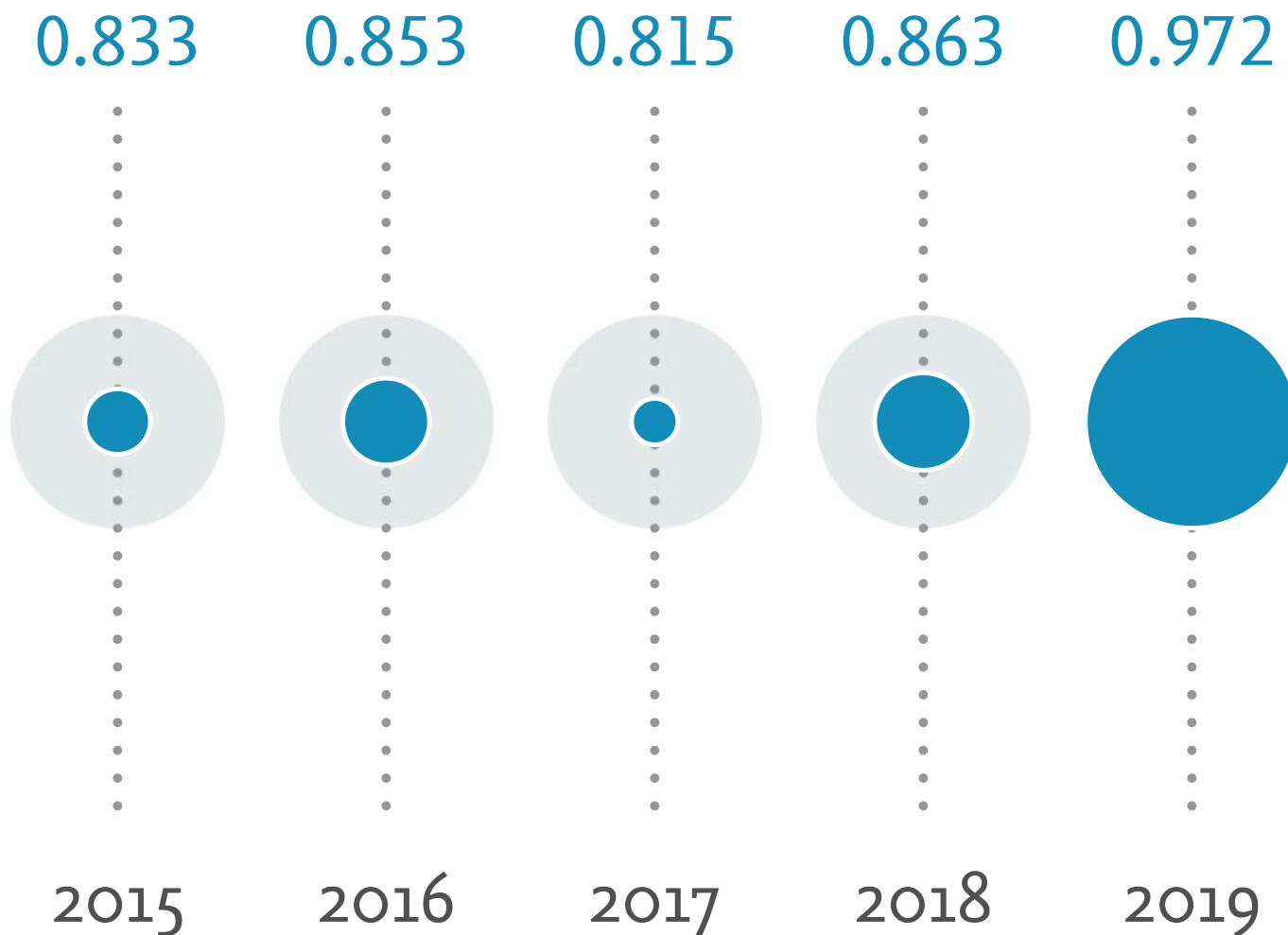
> **SNIP (/JOURNALS/0959-6526/SNIP)**

> **SJR (/JOURNALS/0959-6526/SJR)**

Elsevier © 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Elsevier.com (<http://www.elsevier.com>) | About Elsevier (<http://www.elsevier.com/about/at-a-glance>) | Terms & Conditions
(<http://www.elsevier.com/legal/elsevier-website-terms-and-conditions>) | Privacy Policy
(<http://www.elsevier.com/legal/privacy-policy>)

Article Influence & Eigenfactor



● Article influence

ABOUT ARTICLE INFLUENCE & EIGENFACTOR

Citations from highly ranked journals are more important and influential than those from lower ranked journals.

METRICS

YEAR	EIGENFACTOR	AI
2019	0.129	0.972
2018	0.084	0.863
2017	0.055	0.815
2016	0.039	0.853
2015	0.028	0.833

DEFINITION

Article Influence

Article Influence is calculated by dividing the Eigenfactor® score by the percentage of all articles recorded in the Journal Citation Reports that were published in a specific journal. The Article Influence score measures the average influence per article of the papers in a journal. As such, it is comparable to Clarivate Analytics widely used Impact Factor. Article Influence scores are normalized so that the mean article in the entire Clarivate Analytics Journal Citation Reports (JCR) database has an article influence of 1.00.

Eigenfactor®

The Eigenfactor® score is a rating of the total importance of a specific journal. Journals are rated according to the number of incoming citations, with citations from highly ranked journals weighted to make a larger contribution to the Eigenfactor® than those from poorly ranked journals. As a measure of importance, the Eigenfactor® score scales with the total impact of a journal. Journals generating higher impact to the field tend to have larger Eigenfactor® scores. The Eigenfactor® approach is thought to be more robust than the Impact Factor metric, which counts purely incoming citations without considering the significance of those citations.

Article influence and Eigenfactor® exclude self-citations.

OTHER METRICS IN IMPACT

> [CITESCORE \(/JOURNALS/0959-6526/CITESCORE\)](#)

> [IMPACT FACTOR \(/JOURNALS/0959-6526/IMPACT_FACTOR\)](#)

> [5 YEAR IMPACT FACTOR \(/JOURNALS/0959-6526/IMPACT_FACTOR_5_YEAR\)](#)

> [SNIP \(/JOURNALS/0959-6526/SNIP\)](#)

> [SJR \(/JOURNALS/0959-6526/SJR\)](#)

Elsevier © 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Elsevier.com (<http://www.elsevier.com>) | About Elsevier (<http://www.elsevier.com/about/at-a-glance>) | Terms & Conditions (<http://www.elsevier.com/legal/elsevier-website-terms-and-conditions>) | Privacy Policy (<http://www.elsevier.com/legal/privacy-policy>)

SNIP



● #Citations by papers past 3 years ● #Papers past 3 years

ABOUT SNIP

Source-Normalized Impact per Paper (SNIP) measures the impact of a paper within a subject field.

METRICS

YEAR	SNIP	CITATIONS	PAPERS
2019	2.394	68501	8577
2018	2.317	38890	5824
2017	2.383	21623	4056
2016	2.534	13943	2574
2015	2.396	8889	1761

DEFINITION

SNIP

Source-Normalized Impact per Paper (SNIP) measures contextual citation impact by weighting citations based on the total number of citations in a subject field. This unique perspective enables direct comparison of sources in different subject fields. The impact of a single citation is given higher value in subject areas where citations are less likely, and vice versa.

It is a ratio, with a numerator and a denominator. SNIP's numerator is a journal's impact per publication (IPP). This is simply the average number of citations received in a particular year (e.g. 2013) by papers published in the journal during the three preceding years (e.g. 2010, 2011 and 2012).

SNIP's denominator is the Database Citation Potential (DCP). We know that there are large differences between various scientific subfields in the frequency at which authors cite papers. In view of this, for each journal an indicator is calculated of the citation potential in the subject field it covers. This citation potential is included in SNIP's denominator, the DCP. SNIP is IPP divided by DCP.

SNIP enables direct comparison of sources in different subject fields. Citation potential is shown to vary not only between journal subject categories (groupings of journals sharing a research field) or disciplines (e.g., journals in Mathematics tend to have lower values than journals in Life Sciences), but also between journals within the same subject category. For instance, basic journals tend to show higher citation potentials than applied or clinical journals. Likewise, journals covering emerging topics tend to be higher than periodicals in classical subjects, or more general journals.

SNIP helps authors to identify which journals are performing best within their subject field, helping them decide where to publish. Mouse over the circles in the visualization and click on the year to view the journal's metrics. The size of the circles are compared to the highest values in the 5-year range. This highest value is represented by a closed circle, and the open circles indicate the journal's value compared to this highest value.

See [Journal Metrics site \(https://www.scopus.com/sources\)](https://www.scopus.com/sources) for background info and more datasets.

OTHER METRICS IN IMPACT

> [CITESCORE \(/JOURNALS/0959-6526/CITESCORE\)](#)

> [IMPACT FACTOR \(/JOURNALS/0959-6526/IMPACT_FACTOR\)](#)

> [5 YEAR IMPACT FACTOR \(/JOURNALS/0959-6526/IMPACT_FACTOR_5_YEAR\)](#)

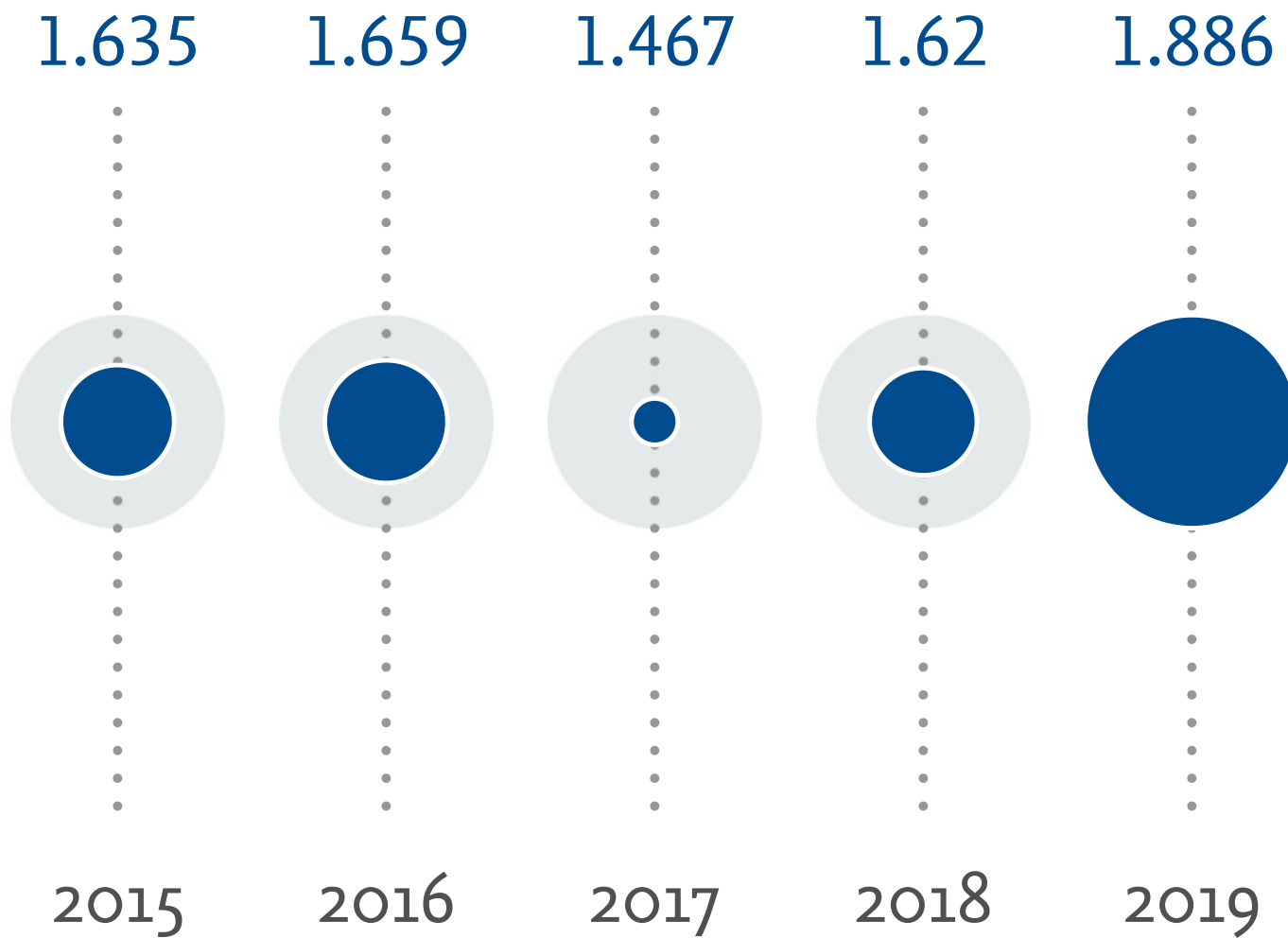
> [ARTICLE INFLUENCE & EIGENFACTOR \(/JOURNALS/0959-6526/ARTICLE_INFLUENCE\)](#)

> [SJR \(/JOURNALS/0959-6526/SJR\)](#)

Elsevier © 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Elsevier.com (<http://www.elsevier.com>) | About Elsevier (<http://www.elsevier.com/about/at-a-glance>) | Terms & Conditions (<http://www.elsevier.com/legal/elsevier-website-terms-and-conditions>) | Privacy Policy (<http://www.elsevier.com/legal/privacy-policy>)

SJR



● SJR

ABOUT SJR

SCImago Journal Rank (SJR) is a prestige metric based on the idea that 'all citations are not created equal'.

METRICS

YEAR	SJR
2019	1.886
2018	1.620
2017	1.467
2016	1.659
2015	1.635

DEFINITION

SJR

SCImago Journal Rank (SJR) is a measure of the number of times an average paper in a particular journal is cited, and as such is conceptually similar to the Impact Factor. A major difference is that instead of each citation being counted as one, as with the Impact Factor, the SCImago Journal Rank assigns each citation a value greater or less than 1.00 based on the rank of the citing journal. The weighting is calculated using a three-year window of measurement and uses the Scopus database. Authors can use these metrics when deciding where to publish.

The idea is to assign weights to bibliographic citations based on the importance of the journals that issued them. Citations issued by more important journals will be more valuable than those issued by less important ones. This 'importance' will be computed recursively, i.e., the important journals will be those which in turn receive many citations from other important journals.

See [our Journal Metrics site \(https://www.scopus.com/sources\)](https://www.scopus.com/sources) for background information and datasets.

OTHER METRICS IN IMPACT

-
- > **CITESCORE (/JOURNALS/0959-6526/CITESCORE)**

 - > **IMPACT FACTOR (/JOURNALS/0959-6526/IMPACT_FACTOR)**

 - > **5 YEAR IMPACT FACTOR (/JOURNALS/0959-6526/IMPACT_FACTOR_5_YEAR)**

 - > **ARTICLE INFLUENCE & EIGENFACTOR (/JOURNALS/0959-6526/ARTICLE_INFLUENCE)**

 - > **SNIP (/JOURNALS/0959-6526/SNIP)**

Elsevier © 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Elsevier.com (<http://www.elsevier.com>) | About Elsevier (<http://www.elsevier.com/about/at-a-glance>) | Terms & Conditions (<http://www.elsevier.com/legal/elsevier-website-terms-and-conditions>) | Privacy Policy (<http://www.elsevier.com/legal/privacy-policy>)



Source details

Journal of Cleaner Production

Scopus coverage years: from 1993 to Present

Publisher: Elsevier

ISSN: 0959-6526 E-ISSN: 1879-1786

Subject area: Environmental Science: General Environmental Science

Business, Management and Accounting: Strategy and Management

Engineering: Industrial and Manufacturing Engineering

Energy: Renewable Energy, Sustainability and the Environment

CiteScore 2019

10.9



SJR 2019

1.886



SNIP 2019

2.394



[View all documents >](#)

[Set document alert](#)

[Save to source list](#) [Source Homepage](#)

[CiteScore](#) [CiteScore rank & trend](#) [Scopus content coverage](#)

i Improved CiteScore methodology



CiteScore 2019 counts the citations received in 2016-2019 to articles, reviews, conference papers, book chapters and data papers published in 2016-2019, and divides this by the number of publications published in 2016-2019. [Learn more >](#)

CiteScore 2019

$$10.9 = \frac{137,661 \text{ Citations } 2016 - 2019}{12,637 \text{ Documents } 2016 - 2019}$$

Calculated on 06 May, 2020

CiteScoreTracker 2020



$$13.0 = \frac{201,701 \text{ Citations to date}}{15,504 \text{ Documents to date}}$$

Last updated on 02 March, 2021 • Updated monthly

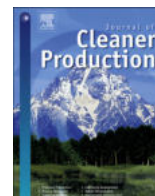
CiteScore rank 2019

Category	Rank	Percentile
Strategy and Management		
Engineering		
Industrial and Manufacturing Engineering	#9/340	97th
Energy		
Renewable	#18/179	90th

[View CiteScore methodology >](#) [CiteScore FAQ >](#) [Add CiteScore to your site](#)

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 210 de 231

ANEXO V: "Heat recovery in sanitary-ware industry applied to water and energy saving by multi-effect distillation" COPIA DE LA PUBLICACIÓN



Heat recovery in sanitary-ware industry applied to water and energy saving by multi-effect distillation

Carlos Cuvilla-Suárez, Antonio Colmenar-Santos*, David Borge-Diez, África López-Rey

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control, UNED, Juan del Rosal, 12 – Ciudad Universitaria, 28040, Madrid, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2 July 2018

Received in revised form

12 November 2018

Accepted 26 December 2018

Available online 28 December 2018

Keywords:

Ceramic industry

Energy reduction

Water saving

Factory design optimization

Multi-effect distillation

Recovered heat

ABSTRACT

Sanitary-ware industry, as a sub-sector in the ceramic industry, is a great consumer of energy and water, although there are some opportunities to reduce the global consumption, especially for factories based on resin molds technology. This research aims to show the way to reduce drastically water consumption by recovering waste heat into a multi-effect distillation system to re-use most of the flushing water. This solution improves both, the environmental and economic performance of this industry. The proposed configuration is a multi-effect distillation (MED) adapted to run with recovered heat from the kiln exhausting. The efficiency of the system is improved by recovering the heat of the gas mixture leaving the first effect in the pre-heater of the feeding water. The research lays on the computerized simulation of the coupled systems run under different parameters. Mathematical and thermodynamic models have been developed to simulate the behavior of the system. The obtained results show the optimal configuration depending on the thermal variables which could achieve up to almost 92% of the needed water against conventional technology. The system can be applicable to new or existing factories based on resin molds technology and this research may contribute to reduce consumption of resources and thus, the environmental impact.

© 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

It is common knowledge that water is becoming a scarce resource. During last decades demand of water significantly increased because of many reasons and government as well as citizens should take certain strict actions to overcome this global shortage.

“The growing scarcity of freshwater due to rising water demands and a changing climate is increasingly seen as a major risk for the global economy. Consumer awareness, private sector initiatives, governmental regulation and targeted investments are urgently needed to move towards sustainable water use” (Arjen Y. Hoekst, 2014). These were the headlines of the article published by Scientific American Review on 25th of April of 2014 referring to the scarcity of water as a challenge for business development.

After these considerations a deep reflection has to be made by the corporation management boards regarding the water management as seriously as the energy is taken into account either from

theoretical point of view (Roberts, 1978) or from the actual consumption point of view (Owen et al., 2017). An environmental management accounting is a means by which the business community can more easily manage its environmental and associated economic performance (Christ and Burritt, 2013). It must take into consideration the water foot print of the process that company relies on.

Corporate water management accounting is a recently proposed extension to environmental management accounting designed to support corporate management decisions and improve both economic and environmental water-related business outcomes (Christ and Burritt, 2017).

A proper model to promote sustainable consumption and production has to be developed in order to make more profitable and cleaner industry. As stated in (Shao et al., 2016), every industrial sector, has its own set of sustainability attributes that make it cleaner. When fossil fuels are used to generate electricity an important part of the primary energy is delivered as thermal energy waste. This residual energy can be reused for water treatment either from micro plants (Cioccolanti et al., 2015) or macro-plants (Cuvilla-Suárez et al., 2012). In this context, this research aims to find a model that sanitary-ware industry could use as preliminary

* Corresponding author.

E-mail address: acolmenar@ieec.uned.es (A. Colmenar-Santos).

Abbreviations

p.u.	Per unit
Gr	Number of Grashoff
MED	Multi-effect distillation
R.O.	Reverse osmosis
HPCM	High pressure casting machine
Nu	Number of Nusselt
EEA	European Environment Agency
ETC/IW	European Topic Center on Inland Waters
pcs	Pieces
Pr	Number of Prandtl
Re	Number of Reynolds
SDEWES	Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems
GOR	Gained Output Ratio
WHO	World Health Organization
TDS	Total dissolved salts

FORMULAE

\dot{m}_{gin}	mass of gas inwards a module of the kiln (kg/s)
\dot{m}_{gout}	mass of gas outwards a module of the kiln (kg/s)
\dot{m}_{gexh}	mass of gas towards a stack of the kiln (kg/s)
h_{gin}	specific enthalpy of gas inwards a module of the kiln (kJ/kg)
h_{gout}	specific enthalpy of gas outwards a module of the kiln (kJ/kg)
h_{gexh}	specific enthalpy of gas towards a stack of the kiln (kJ/kg)
\dot{H}_{losses}	enthalpy lost through the enclosure of the kiln (kW)
q_{icv}	Internal convection heat transfer (kW)
h_i	Internal convection heat transfer coefficient (kW/m ² /K)
S	Heat transfer surface area (m ²)
T_i	Internal flow temperature (°C)
$T_{1...n}$	Temperatures of the interfaces for conduction heat transfer (°C)
q_{ir}	Internal radiation heat transfer (kW)
σ	Radiation constant (kW/m ² /K ⁴)
ϵ	Internal radiation emissivity (dimensionless)
q_c	Heat transfer (kW)
$k_{1...n}$	Heat transfer coefficient for every insulation layer (kW/m ² /K)
q_{ecv}	External convection heat transfer (kW)
q_{er}	External radiation heat transfer (kW)
D_h	Hydraulic diameter (m)
A_{cs}	Cross section area (m ²)
P_{wet}	Wetted perimeter (m)
ρ	Density (kg/m ³)
v	Velocity of the flow (m/s)
μ	Dynamic viscosity (Pa·s)
C_p	Specific heat capacity (kJ/kg/K)
g	Gravity acceleration (m/s ²)
β	Thermal expansion coefficient (°C ⁻¹)
Q_e	heat exchanged at the evaporator (kW)
\dot{m}_g	mass flow of gas (kg/s)
\dot{m}_v	mass flow of vapor (kg/s)
Δh_g	gas specific enthalpy difference (kJ/kg)
Δh_v	specific vaporizing thermal power (kJ/kg)
Q_c	heat exchanged at the condenser (kW)
\dot{m}_w	mass flow of feeding water (kg/s)
\dot{m}_c	mass flow of condensed (kg/s)
Δh_g	water enthalpy difference (kJ/kg)

Δh_c	specific condensing power (kJ/kg)
Q_1	Recovered heat from kiln (kW)
$h_{g_in_1}$	specific enthalpy of gases entering the evaporator (kJ/kg)
$h_{g_out_1}$	specific enthalpy of gases leaving the evaporator (kJ/kg)
h_{v1}	specific enthalpy of vapor in the first effect (kJ/kg)
h_{l1}	specific enthalpy of water in the first effect (kJ/kg)
\dot{m}_{re1}	Residual water from evaporator towards next effect (kg/s)
\dot{m}_{ve1}	Vapor from evaporator towards pre-heater (kg/s)
\dot{m}_{dp1}	Mass flow of distillate from pre-heater (kg/s)
\dot{m}_{vp1}	Vapor from pre-heater towards next effect (kg/s)
\dot{m}_{w1}	Feeding water through pre-heater pipes (kg/s)
$h_{w_in_1}$	specific enthalpy of gases entering the evaporator (kJ/kg)
$h_{w_out_1}$	Feeding water enthalpy leaving the pre-heater (kJ/kg)
\dot{m}_{rfi-1}	Rejected water from previous effect (kg/s)
\dot{m}_{vfi}	Vapor produced at flash chamber (kg/s)
\dot{m}_{rfi}	Residual water from flash chamber towards evaporator (kg/s)
h_{rfi-1}	specific enthalpy of residual water from previous effect (kJ/kg)
h_{vfi}	specific enthalpy of vapor to pre-heater (kJ/kg)
h_{rfi}	specific enthalpy of water from flash chamber to evaporator (kJ/kg)
\dot{m}_{vi}	Vapor flow entering the pipes of evaporator (kg/s)
\dot{m}_{ci}	Condensed water leaving the pipes of the evaporator (kg/s)
\dot{m}_{vpi-1}	Vapor flow coming from pre-heater of previous effect (kg/s)
\dot{m}_{rei}	Residual water from evaporator towards next effect (kg/s)
\dot{m}_{vei}	Vapor produced at the evaporator towards the pre-heater (kg/s)
$h_{v_in_i}$	specific enthalpy of vapor entering the evaporator (kJ/kg)
\dot{m}_{vi}	Vapor flow entering the pipes of evaporator (kg/s)
\dot{m}_{ci}	Condensed water leaving the pipes of the evaporator (kg/s)
\dot{m}_{vpi-1}	Vapor flow coming from pre-heater of previous effect (kg/s)
\dot{m}_{rei}	Residual water from evaporator towards next effect (kg/s)
\dot{m}_{vei}	Vapor produced at the evaporator towards the pre-heater
$h_{v_in_i}$	specific enthalpy of vapor entering the evaporator (kJ/kg)
$h_{c_out_i}$	specific enthalpy of water leaving the evaporator (kJ/kg)
h_{rfi}	specific enthalpy of residual water from flash chamber (kJ/kg)
h_{rei}	specific enthalpy of residual water from evaporator towards next effect (kJ/kg)
h_{vei}	specific enthalpy of vapor produced at the evaporator (kJ/kg)
Q_i	Heat transferred through the effect (kW)
\dot{m}_{dp1}	Mass flow of distillate from pre-heater (kg/s)
\dot{m}_{vp1}	Vapor flow towards next effect evaporator (kg/s)
\dot{m}_w	Feeding water through pre-heater pipes (kg/s)
h_{dpi}	specific enthalpy of distillate from pre-heater (kJ/kg)

h_{vpi}	specific enthalpy of vapor from pre-heater to next effect evaporator (kJ/kg)	\dot{m}_w	Mass flow of feeding water (kg/s)
$h_{w_out_1}$	specific enthalpy of feeding water entering the pre-heater (kJ/kg)	\dot{m}_{ge}	Gases flow at economizer (kg/s)
$h_{w_in_1}$	specific enthalpy of feeding water leaving the pre-heater (kJ/kg)	$h_{w_out_e}, h_{w_in_e}$	specific enthalpy of feeding water at economizer (kJ/kg)
\dot{m}_w	Mass flow of feeding water (kg/s)	$h_{ge_out_e}, h_{ge_in_e}$	specific enthalpy of gases at economizer (kJ/kg)
\dot{m}_{v_c}	Vapor flow from last effect pre-heater (kg/s)	Q_e	Heat transferred through the economizer (kW)
\dot{m}_{d_c}	Distillate flow as product (kg/s)	T1	Temperature into the first effect (°C)
$h_{w_out_c}, h_{w_in_c}$	specific enthalpy of feeding water at condenser (kJ/kg)	m_{dis}	Distillate flow obtained (kg/s)
$h_{v_in_c}$	specific enthalpy of vapor flow from last effect pre-heater (kJ/kg)	x_{bre}	Salt concentration of the brine at the evaporator of the last effect (p.u.)
$h_{d_out_c}$	specific enthalpy of distillate flow (kJ/kg)	η	Efficiency of the distillation (dimensionless)
Q_c	Heat transferred through the condenser (kW)	P_{vacuum}	Electrical power to create the vacuum into the effects (kW)

tool to improve the water management accounting deriving a cleaner water footprint and lower production cost. Some research has been carried out for this subject within ceramic industry as (Mezquita et al., 2017) regarding raw materials or (Galdón-Estevan et al., 2014) regarding the adaptation of the whole sector to a more sustainable performance. Other sectors have been researched as well (Wakeel et al., 2016) or for singular industries (Chavez-Rodriguez et al., 2013). Regarding the sanitary-ware sector, it has been found some research referring to energy saving (Agrafiotis and Tsoutsos, 2001) but no papers have been published approaching water saving in the specific sanitary-ware industrial sector neither to be applied to flushing resin molds. Nevertheless, Cuvilla-Suárez et al. suggest how to do it in (Cuvilla-Suárez et al., 2018).

The main objective of this research is to provide a tool that helps the corporate water management accounting to improve water efficiency in the sanitary-ware industry. The novelty of this study lays in the modification of a conventional MED distiller applied to eliminate the great water consumption in the sanitary-ware industry for flushing molds.

2. Analysis of current industrial technology in sanitary-ware manufacturing

Accordingly with the document on best available techniques in the ceramic manufacturing industry reviewed in August of 2007 (“cer_bref_0807.pdf,” 2007) at 2.2.4.5., the most extensively used process in the manufacturing of sanitary-ware is the slip casting, either conventional in plaster molds or pressure casting in resin molds.

Conventional sanitary-ware production uses plaster molds, which operate on the principle of capillarity. The plaster works like a sponge and absorbs the water from the slip. Plaster molds operate

at low pressure and are relatively inexpensive, but they do carry several drawbacks. Forming and reuse times are quite lengthy, and the molds typically have a limited working life, often making them impractical for large-volume operations.

Porous resins have been used as an alternative mold-making material for several decades, and their use has coincided with the introduction of higher and higher casting pressures. Today, pressures of 1.3–1.5 MPa are common. The resins work like filters, trapping the ceramic body particles contained in the slip while drawing off the water. Pressure casting with resin molds has resulted in shorter casting cycle times, more compact casting departments and significantly reduced labor requirements. However, the high pressures and complexity of these automatically controlled cycles have led to the development of machines that require a considerable economic investment. Hence, their use can only be justified where the output is particularly high and the product mix not too demanding.

In most cases, the resins themselves dictate the use of high pressures. Two types of resins are used for pressure casting: microporous and macroporous. The former have an average pore diameter of no greater than 10 μm , while the latter normally have average pore diameters of around 20 μm . However, both resin types have a very low, or nonexistent (in the case of macroporous resins) thickness-forming capacity, i.e., a very low capacity to remove the water contained in the slip, as shown in Table 1.

In the last column of the table, the thickness-forming capacity (at atmospheric pressure) for various resins is compared to that for plaster over a period of 60 min. The thickness formed by the plaster is defined as 100 and acts as the reference number for values assigned to the other materials. A look at the table shows that the thickness-forming capacity of microporous resins is 30–40% of plaster capacity, while macroporous resins fail to reach even the 10% mark. Consequently, if a sanitary-ware article is produced using

Table 1
Comparison of typical porous resins used in the sanitary-ware industry. (Source: SACMI resins specifications).

Porous resin type	Working pressure	Avg. Pore diameter	Open porosity	Outflow rate ^a	Thickness forming power (atmospheric pressure) ^b
	10 ⁵ Pa	μm	%	cm^3/s	1 h
Low pressure	0–1	0.5	45–50	0	120–130%
		1.0	45–50	0	100–110%
		1.5	45–50	0.17	75–85%
Microporous resin 1 (SACMI-POR)	6–13	5–7	27–37	25	40%
Microporous resin 2 (Other)	13	5–10	27–28	33.3	30%
Macroporous resin 1 (SACMI-POR)	13	20–25	28–29	250	<7%
Macroporous resin 2 (Other)	13	20–26	30–32	250	<7%

^a Refers to a resin thickness of 2 cm with filtration cross-section of 40 cm^2 at a dynamic water pressure of 4·10⁵ Pa.

^b Calculated by casting at atmospheric pressure and comparing data with plaster performance (which was assigned a value of 100).

a resin mold, it is absolutely necessary to apply a certain pressure (from 0.6 to 0.7 MPa upwards) to the slip. At lower pressures, formation times will be unacceptably long.

Pressure casting techniques have now reached levels of reliability and quality that make their application imperative where manufacturing conditions, output volumes and the product mix permit. When these conditions are unattainable or have been only partially achieved the pressure casting technology does not provide proper yields which justify the great initial investment. This problem is particularly evident in the production of toilets and bidets, complex articles that can only be produced in four or five-part molds. Such manufacturers often fail to achieve the output volume and production mix thresholds that justify the use of resin molds.

Matsumoto states in (Matsumoto, 2015) some of the various benefits of using pressure against conventional casting. On the other hand, resin molds are quite intensive consumers of high quality water. Since they act as a filtering media, during each cycle they have to be flushed with clear and salts free water in order to leave them ready to cast a new piece. The water leaving the mold during the casting process goes through the filtering channels dragging solid particle so as dissolved salts that are decanted along the porous-media. After cycle is finished the clear water has to be pumped backwards in order to erase those particles and salts. Otherwise, the filtering media efficiency would drop drastically.

2.1. Water consumption for casting in sanitary-ware manufacturing

The difference of water consumption between technologies is shown in Table 2.

The main difference lays on molds making and casting. Plaster molds making involves a relevant amount of water to cast plaster whereas resin molds do not require water within the production process. On the other hand, for the slip casting process, resin molds require up to 0.2 m³ of treated water to flush them after every casting cycle. Considering that this water is obtained by reverse osmosis, the total primary amount for this purpose is about double for a rough efficiency of 0.5 (Fritzmann et al., 2007).

The international center for sustainable development of energy, water and environment systems (SDEWES) holds a series of conferences with the target of improving efficiencies by integrating various life supporting systems, using waste from one, as resource in other, and in exact moment when it is beneficial to all, integrating electricity, heating, cooling, transport, water, buildings,

Table 2

Comparison of water consumption referred to main technologies of sanitary-ware manufacturing. Source (Ceramic Technology Sanitary-ware, 2010):

WATER CONSUMPTION 500,000 pcs/year	PLASTER CASTING	PRESSURE CASTING
SECTION	m ³ /year	m ³ /year
Raw materials	46	46
Slip preparation	5108	5108
Glaze preparation	671	671
Modelling & molds	1632	70
Casting	6714	112,964
Heating & ventilation		
Drying		
Glazing	464	464
Kilns		
Sorting	46	46
Offices	110	110
Ware-house	58	58
Facilities	15,480	120,734
TOTAL WATER CONSUMPTION =	30,329	240,271

waste, wastewater, industry, forestry and agriculture systems (Urbaniec et al., 2016).

This is the key point of this research. Substituting the current reverse osmosis water treatment by distillation technology, the water can be reused and the wasted heat from the kiln is profited as energetic resource for water treatment. There is a great potential in heat recovery to improve energy efficiency (Miró et al., 2016) or economic aspects (Brückner et al., 2015) with no dependence on the temperature level (Taylor and Wadkin, 1986), so this paper provides a specific application of that general approach.

2.2. Reverse osmosis

Currently, there are many applications of reverse osmosis within different industrial areas with the only purpose to treat water in order to reduce salt contents which affect either efficiency of the process or the life cycle of the machines (Colla et al., 2016).

This is the case of the sanitary ware industry where both effects are present in the molds maintenance and the efficiency of the casting process. Manufacturers of HPCM's recommend flushing them after every cycle with clean and warm water. The usual way in factories today, to produce this water is R.O. By R.O., the water produced is suitable for production as well as for flushing the molds. The point is that flushing water is rejected after cleaning the mold carrying dissolved salts so as slip residual particles. This water is, under these circumstances useless for a new washing cycle. Membranes into the R.O. device are quickly clogged when suspended solids reach them. For this reason it is not advisable to reuse water from washing within a R.O. system.

3. Methods to optimize the usage of hydric resources through the process

The mathematical model to develop the methodology of calculation is summarized in Table 3.

3.1. Multi-effect distillation (MED)

Distillation is less sensible to suspended solids content of water as far as the rejected brine keeps the particles suspended by a proper turbulent flow. On the other hand it is suitable to improve heat transfer along the tubes of the heat exchangers. The water recycled with this method is suitable to be used in new cycles. The potential benefit of this method, besides the water saving, is the ability of taking energy from recovered heat from the kiln. Some research has been developed in this regard in the industrial sector

Table 3

Summary of methods.

MATHEMATICAL MODEL SUMMARY		
	SYSTEM	MODEL
Water treatment system	Multi-effect distillation	
Heat source	Kiln exhausting	Air and gas global balance Losses Load thermal evolution
Distillation first approach	3 simple evaporation cells	
MED Distiller	First cell	Evaporator Pre-heater
	i-cell	Flash chamber Evaporator Pre-heater
	Condenser Economizer	

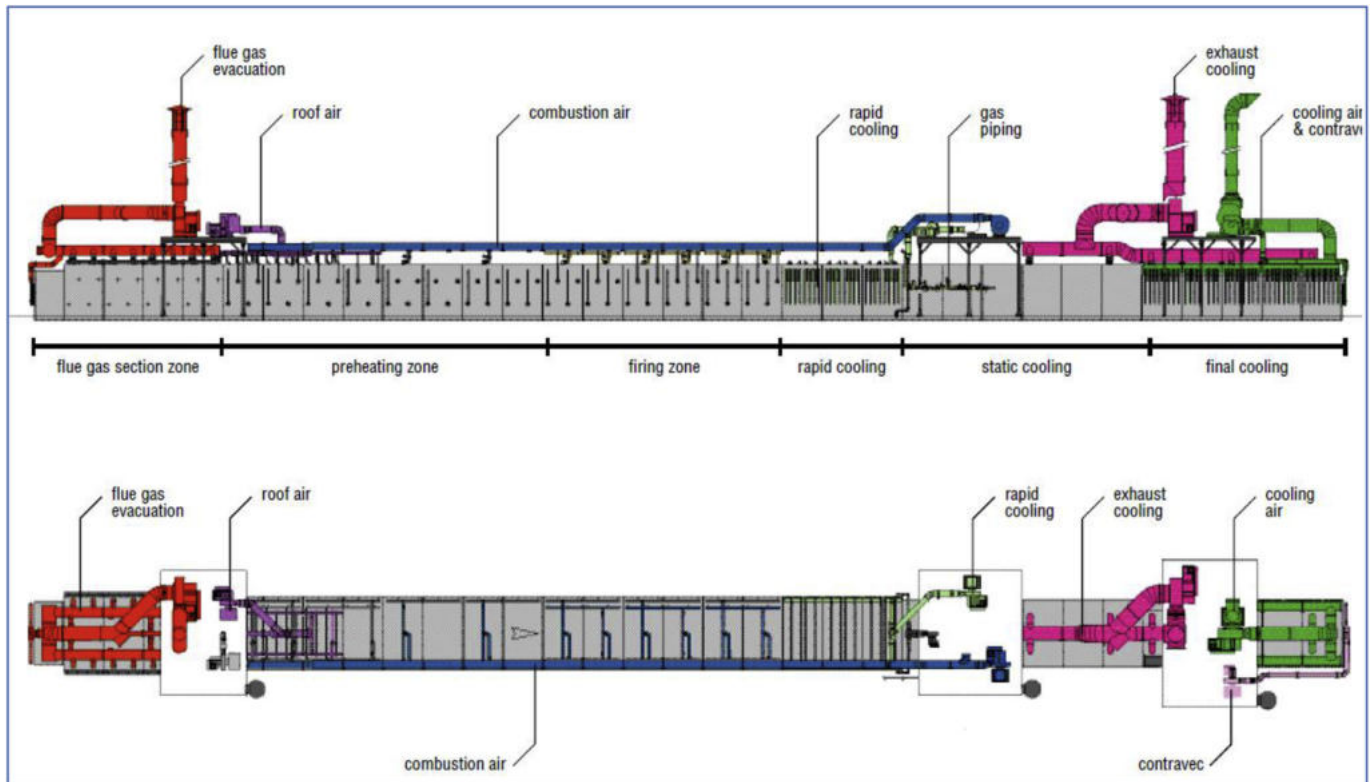


Fig. 1. Tunnel kiln configuration (Source: SACMI Catalogue).

(Ammar et al., 2013). Though great electrical power is needed to pump out the brine from the distiller, the advantage of re-using water yields a better global efficiency.

Kiln and MED mathematical models are developed to find the right balance of energy from recovered heat through the stacks of the kiln and the thermal requirement of a distiller to remove salts and impurities from flushing water.

3.2. Kiln model

3.2.1. Kiln definition

Accordingly with the best available technologies for sanitary-ware manufacturing (“cer_bref_0807.pdf,” 2007) at 2.3.7.5 regarding the firing of the ware, the most common way to fire sanitary ware is through tunnel kilns which essentially, are refractory tunnels served by rail tracks carrying kiln-cars. Fig. 1 shows a standard tunnel for sanitary-ware. The air and exhausting conducts are remarked. The kiln is constructed by adding 3 m long modules. The different modules for each section of the kiln can be seen in Fig. 1.

Specifications for a standard tunnel kiln of the leader of sanitary ware machinery manufacturer are as follows in Fig. 2.

The kiln length chosen in this research is 84 m, with 28 modules. The characteristics of such a kiln are listed in Table 4.

The carts have refractory decks on which, dried ware is set in defined stable patterns. Fig. 3 shows a cross section of this tunnel with a standard load configuration of sanitary ceramic bowls. The carts are pushed through the kilns at set intervals, counter currently to a flow of air drawn by fan(s) to an exhaust duct near the car entry zone. The high temperatures inside the kiln are kept by high performance refractory materials of appropriate thickness.

Most tunnel kilns are now, gas-fired, with a maximum temperature in the firing zone near the center of the kiln as the

TECHNICAL DATA	
Kiln possible dimension	46 - 132 m
Useful width	2,400 - 3,800 mm
Possible car loading height	800 - 1,200 mm
Car useful volume	2.52 - 4.26 m ³
Car in the kiln	32 - 94
Average load on car (depending on products mix and loading conditions)	18 - 30 pieces
Maximum temperature	1,300 °C
Firing temperature	1,269 °C
Approximate firing cycle	10 - 20 hours
Approximate specific net consumption (depending on technological and firing cycle conditions)	4,180 - 5,852 kJ/kg

Fig. 2. Tunnel kiln technical specifications (Source: SACMI Catalogue).

temperature distribution along the kiln shown in Fig. 4:

The principle of operation is to heat up the load from inlet by hot gas aspirated from the firing zone up to module 15 in the middle of the kiln at about 1200 °C where the chemical transformation of the ceramics takes place. Then the load and cart start to be cooled by means of rapid cooling firstly and then slow cooling up to the kiln outlet. The thermal energy that load and cart carry when entering the cooling section is transferred to cooling airs and sent out through stacks 2 (rapid cooling) and 3 (slow cooling) where they are collected to be recovered at the MED heating. Cooling air also

Table 4

Main characteristics of a kiln 84 m long (Source: SACMI – Technical specifications).

KILN SPECIFICATIONS		
Kiln length	84	m
Kiln width	3	m
Firing temperature	1214	°C
Number of cart inside the kiln	62.2	
Duty cycle	16	h
Excess of air	10%	
Roof air	0.3120	kg/s
Rapid cooling air	0.7926	kg/s
Slow cooling air	1.6760	kg/s
Contravec air	1.4339	kg/s
Annual production	500,000	Pieces/year
Efficiency	86.54%	
Specific consumption	5225	kJ/kg
Average mass of piece	20	kg/piece
Days/year kiln operation	325	days/year
Kiln thermal power	2150	kW

improves the heat exchange along the kiln by means of a proper turbulence that can be optimized (Kaya et al., 2008). In (Mezquita et al., 2014), Mezquita studies how to reduce consumption of gas in the kiln by pre-heating the combustion air with recovered heat from cooling air.

3.2.2. Simulation methodology

Simulation of tunnel kiln has been researched and some works have been carried out regarding the whole kiln (Nicolau and Dadam, 2009), or temperature distribution (Zhang et al., 2015),

yet most of them are devoted to tile production rather than sanitary ware. In this research, the model has been carried out by analyzing the mass and energy balances for each module independently and then mix all them together in order to obtain the global balance for the whole kiln. For each module, it is calculated:

- the balance of air mass and thermal inlet and outlet air and gas flows.
- the balance of the energy of the load inlet and outlet, since the mass is not varying.
- the losses through enclosure walls, roof and floor by combination of thermal conduction, convection and radiation.

Fig. 5 shows the scheme for the balances.

3.3. Air and gas global balance

The available net heat to be recovered is obtained by associating the net balances of mass and energy in every module linked to each other and the exhausting conduct towards corresponding stack as shown in Figs. 1 and 4. Temperature in each module and air flow masses, are the variables to compute the thermal power obtained.

$$\dot{m}_{g_{in}} = \dot{m}_{g_{out}} + \dot{m}_{g_{exh}} \quad (1)$$

$$\dot{m}_{g_{in}} \cdot h_{g_{in}} = \dot{m}_{g_{out}} \cdot h_{g_{out}} + \dot{m}_{g_{exh}} \cdot h_{g_{exh}} + \dot{H}_{losses} \quad (2)$$

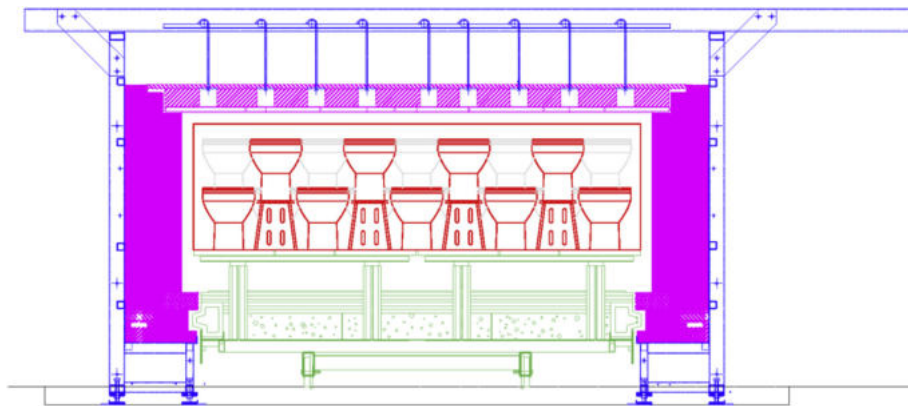


Fig. 3. Cross section of the kiln car (Source: SACMI Catalogue).

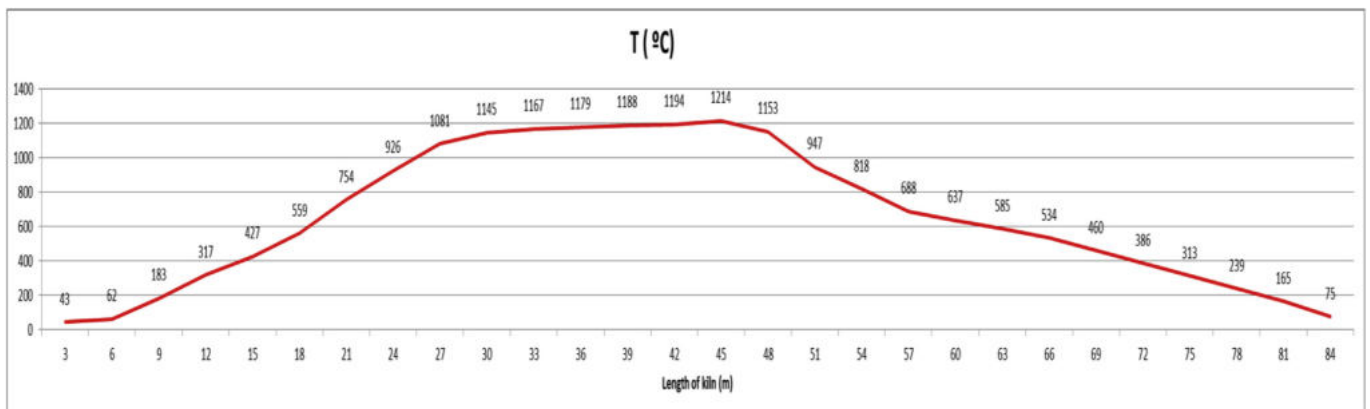


Fig. 4. Temperature distribution along the kiln (Source: SACMI – Technical specifications).

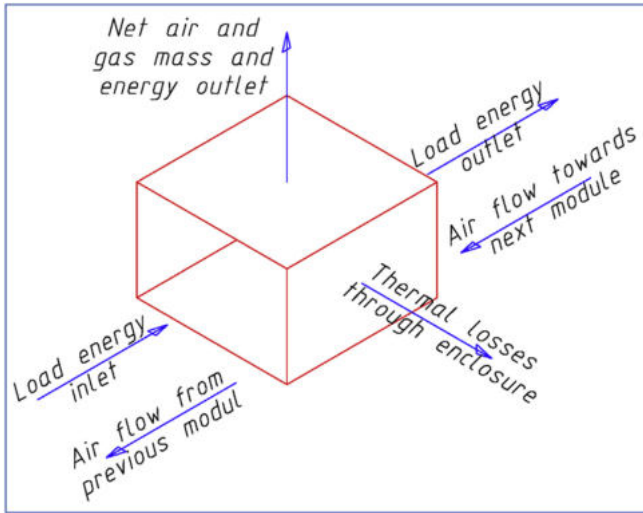


Fig. 5. Schematic mass and energy balances for each module.

3.4. Losses

The calculation of the losses is based on a conventional combination of radiation, convection and conduction as Fig. 6 shows.

The number and features of the layers depend on the section of the kiln.

As the temperature gradient varies along the kiln, so do the properties of the thermal insulation. The general set of equations to find out the losses so as the temperature gradient along the path is as follows, agreeing with Fig. 6.

$$q_{icv} = h_i \cdot S \cdot (T_i - T_1) \tag{3}$$

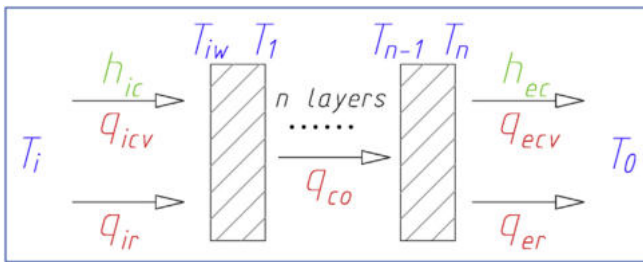


Fig. 6. Schematic path of thermal losses through the different facings.

$$q_{ir} = \sigma \cdot \epsilon \cdot S \cdot (T_i^4 - T_1^4) \tag{4}$$

$$q_c = q_{icv} + q_{ir} \tag{5}$$

$$q_c = k_1 \cdot S \cdot (T_1 - T_2) = \dots = k_n \cdot S \cdot (T_{n-1} - T_n) \tag{6}$$

$$q_c = q_{ecv} + q_{er} \tag{7}$$

$$q_{ecv} = h_e \cdot S \cdot (T_n - T_0) \tag{8}$$

$$q_{er} = \sigma \cdot \epsilon \cdot S \cdot (T_e^4 - T_0^4) \tag{9}$$

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L} \tag{10}$$

As the number of Nusselt and the conductivity of the gas are depending on the temperature of the fluid, the system has to be solved by means of an iterative process. Besides, the formula to calculate Nu varies as the geometric and thermodynamic conditions do. The interior of the kiln is modeled as a non-circular tube where the hydraulic diameter is calculated by:

$$D_h = 4 \cdot \frac{A_{cs}}{P_{wet}} \tag{11}$$

A_{cs} and P_{wet} are shown in Fig. 7:

The thermodynamic characteristics of the flow are calculated for every temperature as follows:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D_h}{\mu} \tag{12}$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{k_{air}} \tag{13}$$

$$Gr = \frac{g \cdot \rho^2 \cdot L^3 \cdot \beta \cdot \Delta t}{\mu^2} \tag{14}$$

Dynamic viscosity of the air is calculated by the Shutterland's law:

$$\mu = \mu_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right) \cdot \frac{T_0 + 110.4}{T + 110.4} \tag{15}$$

Density of the air is approximated by:

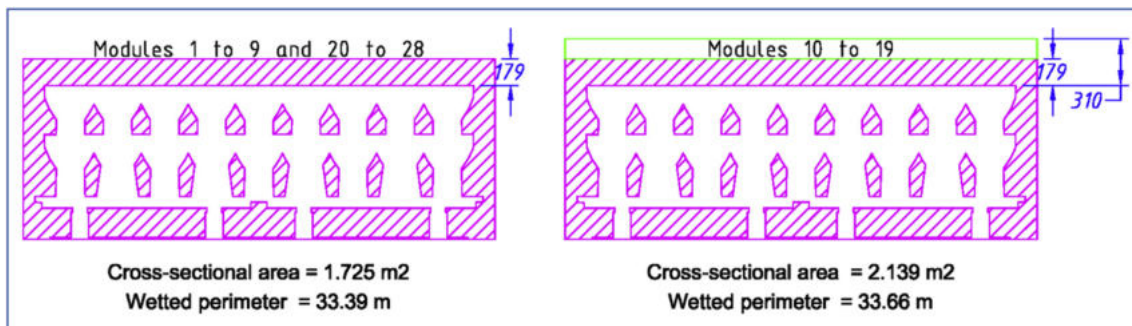


Fig. 7. Non-circular tube model for the interior of the kiln.

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T} \tag{16}$$

Specific heat of the air is approximated by:

$$C_{p_{air}} = 0.9956 + 9.299 \cdot 10^{-5} T \tag{17}$$

Thermal expansion coefficient is well approximated by:

$$\beta = \frac{1}{T} \tag{18}$$

Inside the kiln Nu is calculated according to Hausen's formula:

$$Nu = 3.66 + \frac{0.0668 \cdot \left(\frac{D_h}{L_{mod}} \cdot Re \cdot Pr\right)}{1 + 0.04 \cdot \left(\frac{D_h}{L_{mod}} \cdot Re \cdot Pr\right)^{\frac{2}{3}}} \tag{19}$$

Outside the kiln, onto the walls, there is a natural vertical convection and the equation to obtain Nu is:

$$Nu = 0.555 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}} \tag{20}$$

Onto the roof, the convection natural and horizontal, thus the equation is:

$$Nu = 0.58 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{5}} \tag{21}$$

The flow characteristic in this chamber corresponds to a natural convection between horizontal plates, so the Nu in it is calculated by:

$$Nu = 0.068 \cdot Gr^{\frac{1}{3}} \tag{22}$$

3.5. Load thermal evolution

Accordingly, with Fig. 3, the cart and the load thermal characteristics are shown in Table 5:

The thermal power of the load along the kiln is calculated from the temperature on the surface of the load and the gradient into the ware. The temperature field is not uniform through the load and the layers of the cart. Nicolau et al. have established the gradient for a similar kiln for bricks manufacturing finding up to 50% of temperature change between surface and core of the load as Fig. 8 shows (Nicolau and Dadam, 2009).

Table 5
Cart and load thermal characteristics.

		mass kg/cart	Cp kJ/kg.°C
Supporting plates	Cordierite	124.90	1.46
Supporting columns	Cordierite	17.77	1.46
Supporting frames	Cordierite	112.32	1.46
Pieces	Ceramic body	360	1.13
Floor cart insulation			
Layer-1	Refractory concrete	179.40	0.88
Layer-2	Thermal Panel Kaowool	26.52	0.84
Layer-3	Thermal Panel Kaowool	24.96	1.10
Layer-4	Vermiculite concrete 1/8	1228.50	0.84
Layer-5	Vermiculite concrete 1/5	222.30	0.84
Layer-6	Steel plate	91.85	0.46
Structure support and wheels	Iron	880.00	0.46

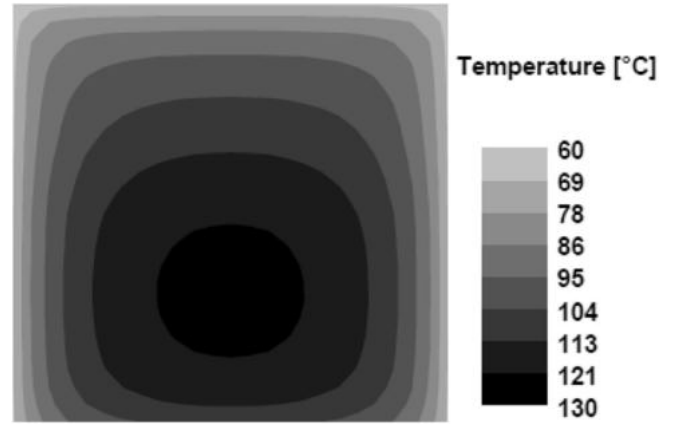


Fig. 8. Cross section temperature gradient for a brick firing load at the outlet of the kiln.

3.6. MED model

The core of the research is to find the way to take the most energy from the recovered heat of the kiln. Thus, the design of the distiller has to match the heat characteristics in order to run under low grade heat range (Dastgerdi et al., 2016). Nevertheless, it has to be taken into account that 70 °C is the higher temperature at the evaporator tubes in order to avoid scaling at the brine side (Artin Hatzikioseyan and Pavlina Kousi, 2003). Over this temperature, some content of CaCO₃ or CaSO₄, might decant drastically producing scale and great drops of the heat transfer coefficient. Due to the low grade of the heat, spray flash chamber is advisable for the distiller (Chen et al., 2018).

3.6.1. Cascade of three simple evaporating cells

Initially, as a pre-sizing exercise, it was tried a system with three boilers at the three different thermal states of the recovered gases from the stacks of the kiln. They were calculated at atmospheric pressure and making a thermal cascade deriving exhausting from the hotter towards lower temperature as Fig. 9 shows.

The equations for this model are obtained from energy balances in the evaporator and condenser of each stage as per Fig. 9:

$$Q_e = \dot{m}_g \cdot \Delta h_g = \dot{m}_v \cdot \Delta h_v \tag{23}$$

$$Q_c = \dot{m}_w \cdot \Delta h_w = \dot{m}_c \cdot \Delta h_c \tag{24}$$

Data to compute the specific enthalpy increases are obtained from the NASA Glenn Research Center database of thermodynamic data coefficients.

In order to improve the performance, a vacuum boiling system in cascade was modeled as Fig. 10 shows. It has been conceived as a MED system.

Water feeding to be recycled is sent through the pre-heaters up to the first effect where it is sprayed onto its evaporator. Recovered heat from the kiln stacks provides energy to evaporate a fraction of this flow which downwards is condensed by feeding water coming from second effect. The temperature of the inlet water is assumed to equal the temperature within the effect. Under such circumstances, no heat is devoted to heat up the liquid up to the boiling point. Schematic configuration of first effect can be seen in Fig. 11.

Mass and energy balances provide the exchanged heat, evaporated water at the evaporator and condensed distillate at the pre-heater. Temperature of this first effect is to be parameterized in order to optimize the system. As the temperature must be below

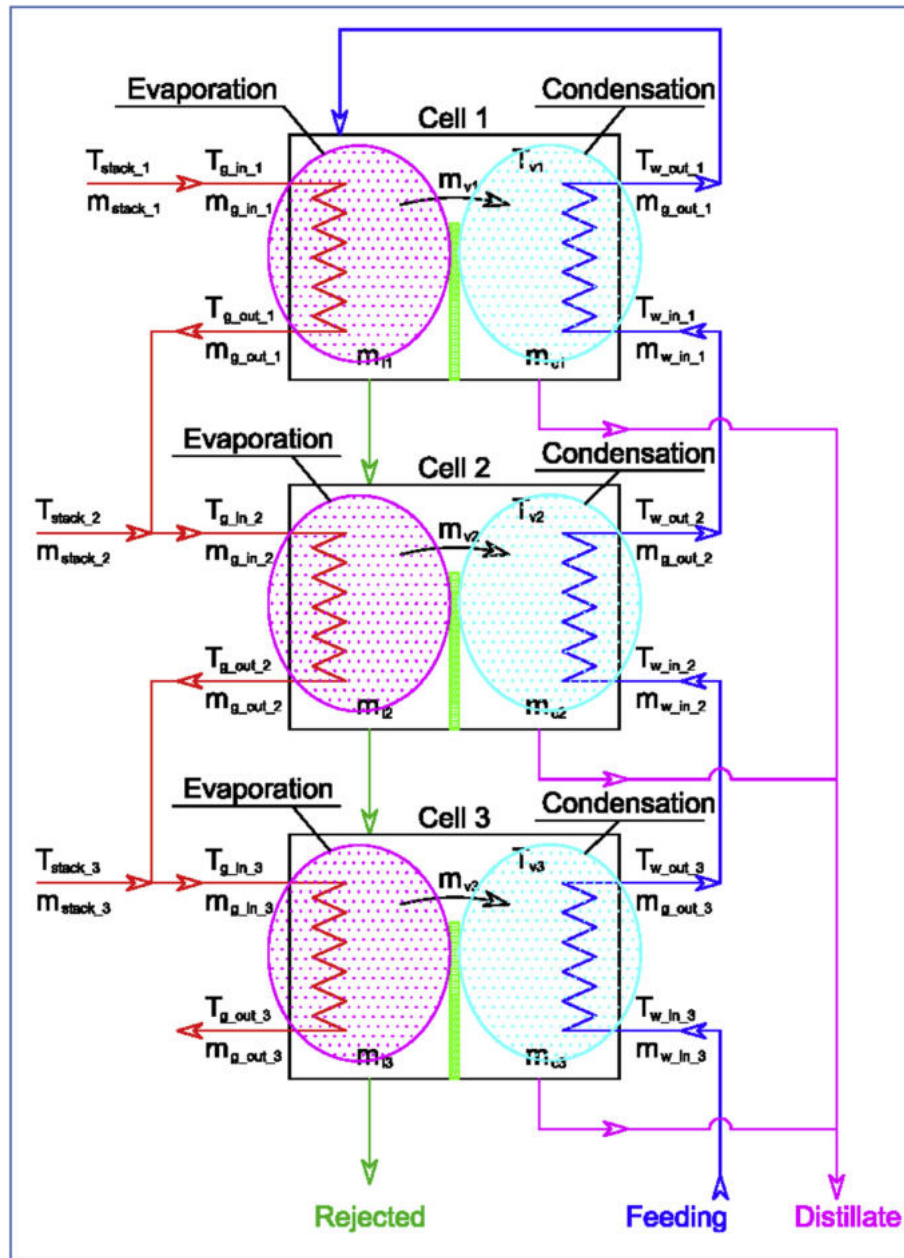


Fig. 9. Simple cascade of atmospheric evaporator-condenser cells.

100 °C to avoid scaling onto the evaporator, the pressure in the cell has to be reduced up to the vapor pressure at this temperature.

3.6.2. Equations at the first effect

3.6.2.1. Evaporator.

$$Q_1 = \dot{m}_g \cdot (h_{g_in_1} - h_{g_out_1}) = \dot{m}_{ve1} \cdot (h_{v1} - h_{l1}) \quad (25)$$

$$\dot{m}_w = \dot{m}_{re1} + \dot{m}_{ve1} \quad (26)$$

3.6.2.2. Pre-heater.

$$Q_1 = \dot{m}_{dp1} \cdot (h_{v1} - h_{l1}) = \dot{m}_w \cdot (h_{w_out_1} - h_{w_in_1}) \quad (27)$$

$$\dot{m}_{ve1} = \dot{m}_{vp1} + \dot{m}_{dp1} \quad (28)$$

Subsequently, a cascade of effects in downward temperature provides heat from previous effect to the next one to pre-heat the feeding water flow and cooling to condensate the stream of vapor from the previous cell. As previous effect $i-1$ is warmer than i -effect, the rejected liquid coming from it is superheated, thus it flashes at the operating pressure of the effect resulting a prior vapor stream. In Fig. 12 illustrates this concept.

Once the first effect is computed, mass and energy balance equations are applied to flash chamber, evaporator and pre-heater to define the thermodynamic state of each flow. The warm flow for the evaporator is taken from the vapor stream leaving the previous pre-heater, \dot{m}_{vpi-1} .

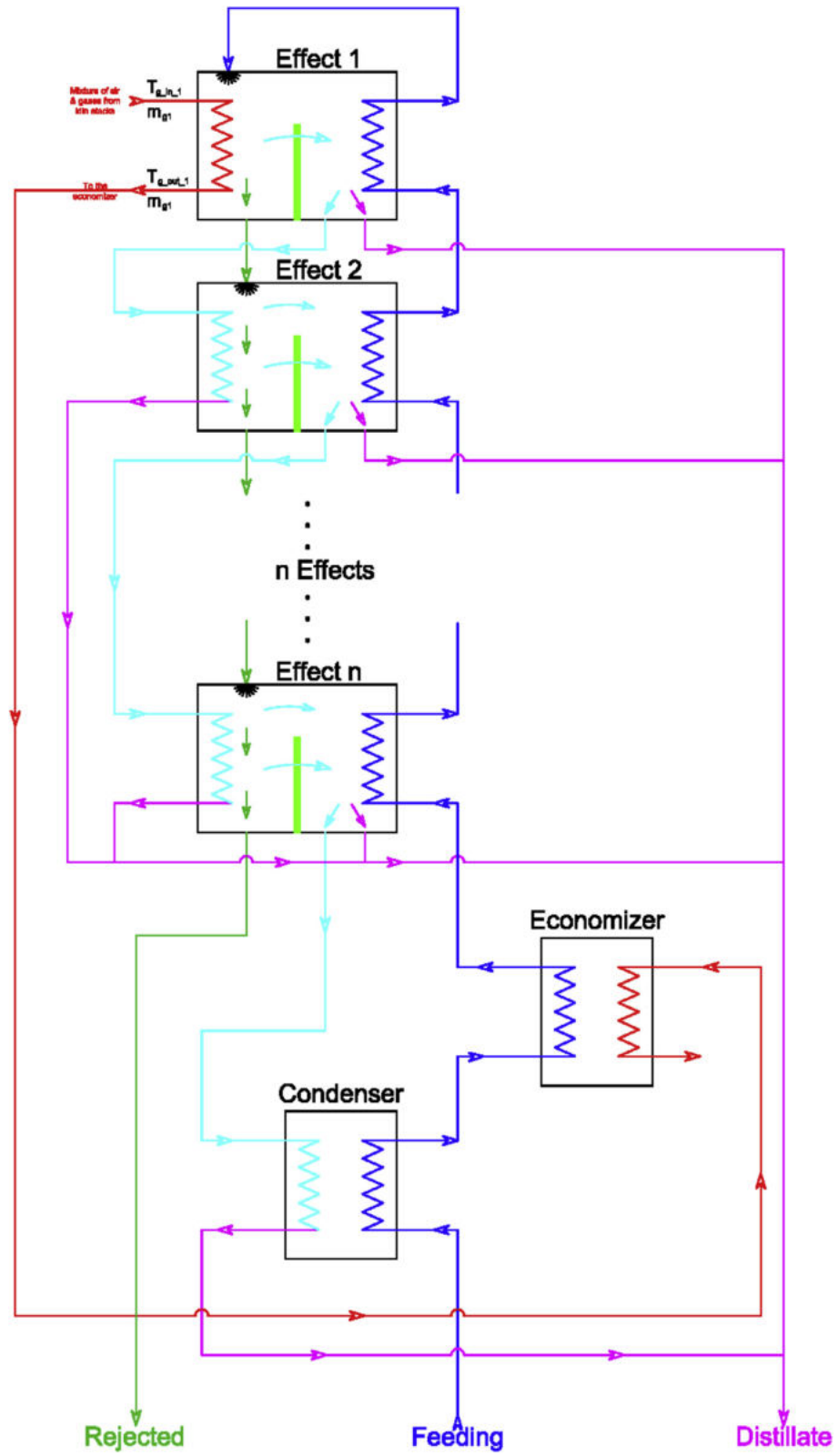


Fig. 10. MED system.

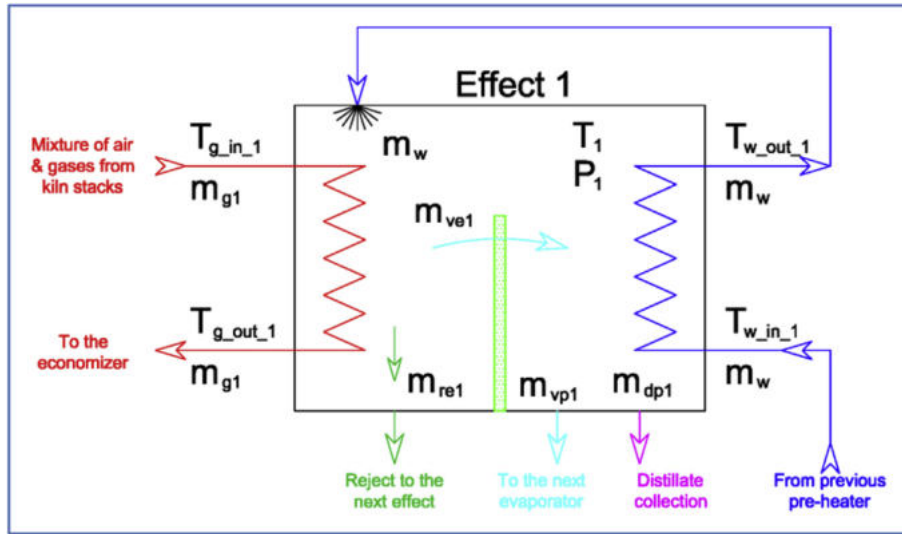


Fig. 11. First effect of MED configuration.

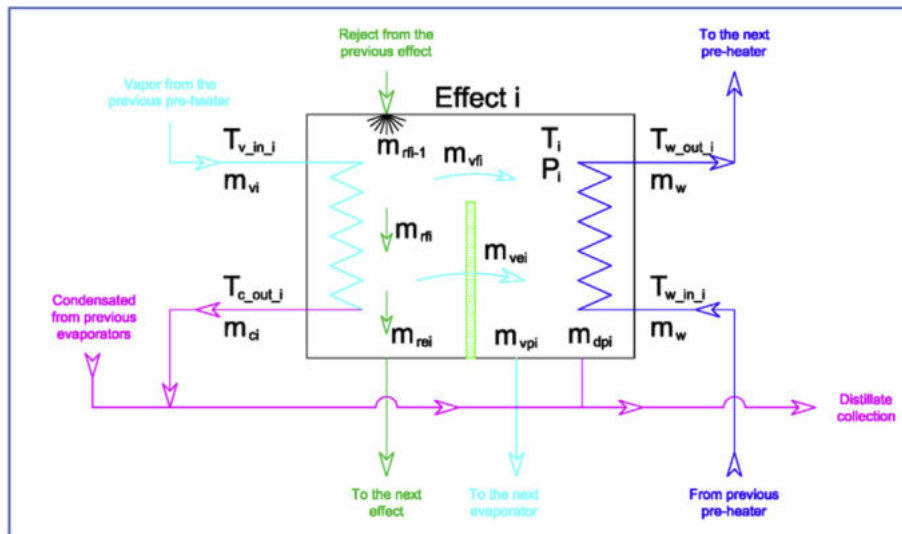


Fig. 12. Generic cell of the MED distiller.

3.6.3. Equations at the generic *i*-effect

3.6.3.1. Flash chamber.

$$\dot{m}_{rfi-1} \cdot h_{rfi-1} = \dot{m}_{vfi} \cdot h_{vfi} + \dot{m}_{rfi} \cdot h_{rfi} \quad (29)$$

$$\dot{m}_{rfi-1} = \dot{m}_{vfi} + \dot{m}_{rfi} \quad (30)$$

3.6.3.2. Evaporator.

$$\dot{m}_{vi} = \dot{m}_{vpi-1} \quad (31)$$

$$\dot{m}_{vi} = \dot{m}_{ci} \quad (32)$$

$$Q_i = \dot{m}_{vi} \cdot (h_{v_in_i} - h_{c_out_i}) \quad (33)$$

$$\dot{m}_{vi} \cdot h_{v_in_i} + \dot{m}_{rfi} \cdot h_{rfi} = \dot{m}_{rei} \cdot h_{rei} + \dot{m}_{vei} \cdot h_{vei} + \dot{m}_{ci} \cdot h_{c_out_i} \quad (34)$$

$$\dot{m}_{rfi} = \dot{m}_{rei} + \dot{m}_{vei} \quad (35)$$

3.6.3.3. Pre-heater.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{vfi} \cdot h_{vfi} + \dot{m}_{vei} \cdot h_{vei} + \dot{m}_w \cdot h_{w_in_i} \\ = \dot{m}_{vpi} \cdot h_{vpi} + \dot{m}_{dpi} \cdot h_{dpi} + \dot{m}_w \cdot h_{w_out_i} \end{aligned} \quad (36)$$

$$\dot{m}_{vfi} + \dot{m}_{vei} = \dot{m}_{vpi} + \dot{m}_{dpi} \quad (37)$$

3.6.4. Condenser

At last effect, the remaining vapor is sent to the condenser to be

condensed by the cool feeding water.

Energy delivered at condenser raises the first step temperature of the feeding water.

Downwards, an economizer is previously disposed to the last effect in order to pre-heat the feeding water before going through the sequential pre-heaters of the different effects. The thermal source for this purpose is the residual gases flow from the evaporator at first effect. That configuration can be seen in Fig. 13.

To compute the theoretical behavior of the system, the equations have to be solved in an iterative process since the resultant flows are interacting with the inlet flow at the condenser. At this point there are two unknown flows, so one of them has to be estimated. The feeding water flow is known before entering the condenser. At the condenser outlet it has to be calculated from the vapor flow from last effect which is one of the variables to be computed with the system. The temperature of the feeding water at the condenser is estimated. After calculating every effect, it is obtained the value of the vapor from the last effect. This flow applied to the condenser provides a calculated temperature for the feeding water. Correcting it, the process is repeated until both, estimated and calculated temperatures equal.

There are some parameters to be taken into account in order to make the system consistent from the thermodynamic point of view. These are as follows:

- The thermal differential at the economizer is supposed at the gases outlet
- The thermal differential at the evaporator in the first effect at the gases outlet
- The thermal differential in each effect is assumed to be equal

The system is solved by equaling exchanged heats and assessing mass and energy balances at each effect, condenser and economizer as follows.

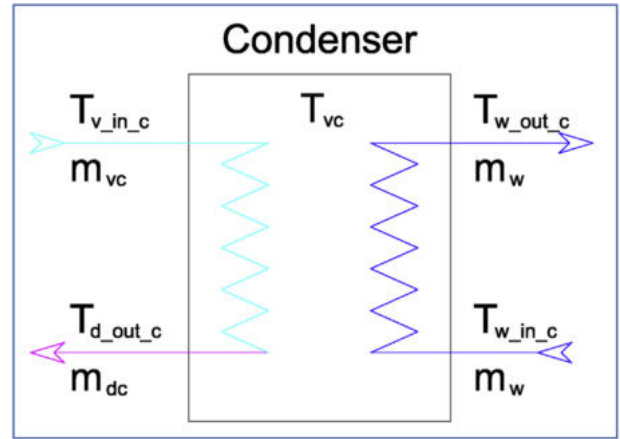


Fig. 14. Condenser system.

3.6.4.1. Equation at the condenser.

$$Q_c = \dot{m}_w \cdot (h_{w.out.c} - h_{w.in.c}) = \dot{m}_{v.c} \cdot h_{v.in.c} - \dot{m}_{d.c} \cdot h_{d.out.c} \quad (38)$$

3.6.4.2. Equation at the economizer.

$$Q_e = \dot{m}_w \cdot (h_{w.out.e} - h_{w.in.e}) = \dot{m}_{ge} \cdot (h_{ge.in.e} - h_{ge.out.e}) \quad (39)$$

Inlet conditions are known for both flows, but outlet temperatures are unknown, so an assumption has to be made (see Fig. 14). The temperature differential at the gases outlet is parameterized in order to relate both outlet temperatures. Under these circumstances, the equation can be solved. Fig. 15 illustrates it.

Depending on the first effect temperature, the efficiency varies

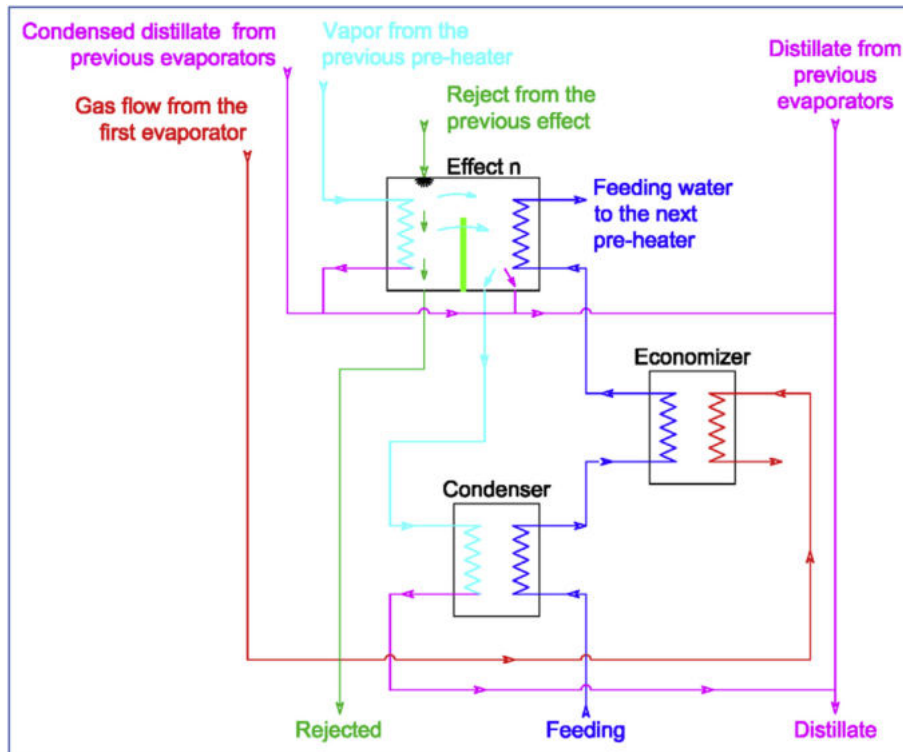


Fig. 13. Last effect and feeding configuration for the MED.

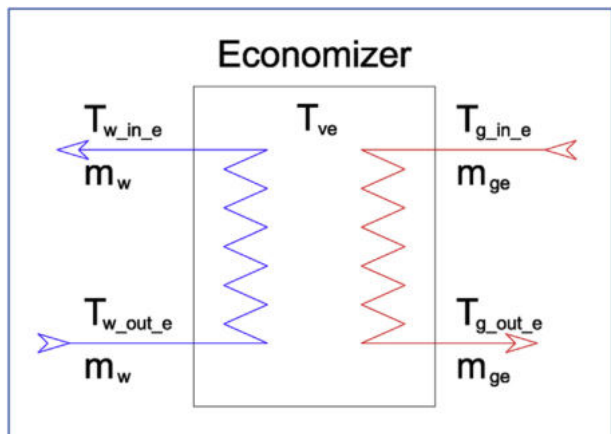


Fig. 15. Economizer system.

and the higher the temperature, the better the efficiency is. The limit of that is 70 °C since this is the temperature at which scaling might start to occur. As a theoretical exercise it has been tried the system with different temperatures. X_{bre} has to be kept under solubility limit to avoid deposition. For the most common salts, this limit is below 50%. Thus, solutions with a greater value are discarded. The second, third and sixth cases present 100% of concentration. It means that only salt remains where all the water has been evaporated. Such situation is not acceptable from the operational point of view, since the salt deposition is not removed by the brine flow.

3.7. Models coupling

The system is assumed to be run in a continuous mode as a tunnel kiln usually is operated. Thus, it is assumed as well that the MED system runs continuously. Under such circumstances, the system is modeled by coupling both individual models. There are some precedents matching water-energy interaction (Dubreuil et al., 2013). The kiln is providing heat permanently to the distiller producing a stream of desalted water for flushing HPCM's. The fraction of water contained within the residual brine has to be added as fresh water.

4. Results

4.1. Recovered heat from the kiln

4.1.1. Heat recovered from the stacks of the kiln

The total available power to be recovered from kiln is provided by the three exhausting stacks. The thermodynamic important characteristics of the air-gas flows through them and the mixture are shown in Table 6.

Table 6 Available heat recovering balance from kiln referred to hall temperature.

		Stack 1 Exhausting	Stack 2 Rapid cooling	Stack 3 Slow cooling	Mix
Air flow	m (kg/s)	1.55	0.445	3.11	5.105
Flow temperature	T (°C)	327	868	296	355
Thermal power	kW	460	373	827	1661
Hall temperature	T ₀ (°C)	30			

4.1.2. Losses of heat in the kiln

Calculated as shown in 3.2.2.2., losses through the enclosure of the kiln have resulted as Table 7 shows:

4.2. MED consumptions and outputs

4.2.1. Result balance of simple cascade of condenser-evaporator cells

The result of a simple cascade of three cells calculated, as per 3.3.1 is shown in Table 8.

4.2.2. Result balance for different MED design parameters

Table 9 shows the different results as number of effects and temperature in the first cell are varying.

5. Discussion

Although the heat losses through the enclosure of the kiln might provide profitable heat, this practice is not economically achievable and it is not in the scope of this work.

The total recoverable power from the kiln is 77% of the gas kiln consumption when referenced to the ambient temperature (30 °C). However, it is important to keep the temperature of the water to feed the MED below 70 C. Since gas exhausting temperature in the MED is to be over 80 °C, the available heating power is 1416 kW due to the fact that the temperature difference is lower.

When trying a simple evaporator with three levels of temperature matching the three flows of gas from the stacks of the kiln, the efficiency results as bad as 10.27%. This simulation suggests providing a more efficient configuration which results a MED distillator modified to meet the thermodynamic state of the source of heat improving notably the efficiency.

MED distillation optimization has been researched (Nannarone et al., 2017) and it has been demonstrated that increasing the number of effects or temperature difference in the cells the efficiency of the MED is improved. Thus, the overall performance would be better. The total surface of heat transfer appears quite independent of the number of effects. On the other hand, there are several main constraints that limit the number of effects, so as the design of the MED (C. Frantz, C and Seifert, 2015):

- the higher the temperature of the heat source, the higher the GOR.
- exceeding of the solubility limits of the brine inside the tubes would produce scaling and therefore, an important drop in performance. The top brine temperature is 70 °C in order to avoid anti-scalants.

Table 7 Thermal losses through the enclosure of the kiln.

Thermal losses	walls	roof	Floor	Total
kW	103.72	147.79	67.00	318.51

Table 8
Balance of energy transfers in a simple cascade of condenser-evaporator cells.

		Cell 1	Cell 2	Cell 3		
Evaporator	m_g	kg/s	0.445	1.995	5.105	
	T_{g_in}	°C	868	327	296	
	T_{g_out}	°C	327	296	110	
	h_{g_in}	kJ/kg	907	305	272	
	h_{g_out}	kJ/kg	305	272	81	
	Dh_g	kJ/kg	602	32	191	
	Q_e	kJ	268	65	974	
	T_v	°C	100	100	100	
	h_l	kJ/kg	419	419	419	
	h_v	kJ/kg	2688	2688	2688	
	Dh_v	kJ/kg	2269	2269	2269	
	m_v	kg/s	0.1181	0.0286	0.4294	
	Condenser	m_w	kg/s	5.61	5.61	5.61
		m_c	kg/s	0.1181	0.0286	0.4294
T_{w_in}		°C	74.25	71.50	30.00	
T_{w_out}		°C	85.62	74.25	71.50	

Table 9
Results for different MED design parameters.

Case	Effects	T_1 °C	m_{dis} kg/s	m_{bre} kg/s	x_{bre} %	h	P_{vacuum} kW
1	9	70	5.3771	0.2585	10.80	0.954	24
2	10	70	5.6356	0.0000	100	1.000	25
3	10	80	5.6356	0.0000	100	1.000	70
4	10	90	5.4160	0.2196	12.39	0.961	145
5	10	100	5.1444	0.4912	5.47	0.913	260
6	11	100	5.6088	0.0268	100	0.995	246

- the brine temperature inside the last effect has to be at least 3 K greater than the feed temperature.
- the difference of brine temperature between two effects has to be greater than 2.25 K and smaller than 5 K.
- the temperature increase of the seawater inside the condenser has to be greater than 3 K and smaller than 10 K.
- and, of course the capital cost of the investment is an important limitation in the design in order to increase the number of effects

MED distillation is the third water desalination technology with a share of 7% worldwide. Mostly, the treated water is destined for human consumption, thus the level quality is largely proved. Current distillation plants are able to supply distillate at purities of 5 to 1 ppm (Ophir and Gendel, 1994). There is some research regarding the quality of the water which meets the standards stated by WHO for drinking water. These is the level that distillation plants can achieve (El Ebaidi, Saad K., 2013).

Constraints of feeding water regard the solubility limits of dissolved salts, specially $CaSO_4$, which are able to produce scaling. This is a factor to be taken into account when designing the system (Chernozubov et al., 1966). Nevertheless, a good maintenance routine may palliate it by regular cleansing with HCl.

The salinity that system is able to handle rises up to 45,000 ppm of TDS.

When compared cases 1 and 2 or 5 and 6 in Table 9, it can be seen that only one more effect causes the draught of the brine and the consequent inefficiency of the system. Mathematically, efficiency seems to be 1 but it is theoretically calculated assuming. No water remains in the residual brine, which is not feasible. Liquid stream is needed to carry the dissolved salts. Then, the configuration that best suits the requirements is the case 1 with 9 effects. Under such circumstances and from Table 9, electrical power for MED system is 24 kW.

From Table 2, the amount of water to flush molds within casting machines is 112,964 m³ per year. From Table 9, the rejected water ratio is:

$$\frac{m_{bre}}{m_{dis} + m_{bre}} = \frac{0.2585}{5.3771 + 0.2585} = 4.587\% \quad (40)$$

Here from, water consumption is calculated as:

$$4.587\% \cdot 112,964 \frac{m^3}{year} = 5,181 \frac{m^3}{year} \quad (41)$$

As stated in (Cuviella-Suárez et al., 2018), the kiln exhausting is able to supply heat for the thermal requirement beyond the kilns in a ceramic sanitary-ware factory. When recovered heat is devoted to MED, the rest of thermal consumers cannot be supplied from kiln. A suitable strategy is to combine a MED system to distillate water with a co-generation plant to provide energy. So, the recovered heat from the power plant might supply heat for the MED while the kiln is serving the rest of thermal consumers. This is an interesting research to be developed in the future as a complement of the current study configuring a wider integration of water & energy savings within sanitary-ware industry.

5.1. R.O. Consumptions

In the case of the R.O. system, at a range of 7200 kJ/m³ of fresh water (Fritzmann et al., 2007) (which is a relative realistic value as per the current state of the art), the electrical energy to obtain this water would be 813.34 GJ/year.

On the other hand any R.O. system has a relatively high reject of water which is, in the best of the cases, is about 50% (Fritzmann et al., 2007). This means that about double of flushing water is needed.

5.2. Savings of energy and water

It is assumed that 232 over 365 days in a year are working days in a regular factory.

After all these considerations, saves can be concluded as a comparison of consumptions which can be seen in Table 10:

It can be seen that there are important saves of electricity and water. Since the thermal power is recovered from kiln with no extra-costs, it is very advisable to transfer water treatment technology from R.O. to MED.

6. Conclusions

Sanitary-ware industrial sector as other ceramic industries is a great resources consumer, especially concerning water and thermal energy. While ceramic industry has been researched as a general subject, there is not almost research about this matter regarding sanitary-ware manufacturing. Water and energy requirements can be reduced by means of proper techniques. Most of them are based on the heat recovery from kilns. This research shows a very appropriate way to save most of the water in the most extended and modern technology of this industrial sector. Thus, the

Table 10
Energy and water consumption compared for both technologies.

Consumptions		MED	R.O.	Saves
Electrical energy	GJ/year	480	813	333
Electrical power	kW	24	41	17
Residual Thermal energy	GJ/year	28,382	0	–
Residual Thermal power	kW	1416	0	–
Water	m ³ /year	5181	225,928	220,747

applicability of this concept is largely extensible to most industrial plants currently and future projects for manufacturing.



Since water is very important for ceramic making process. Historically, however, it has not been a great concern since it was an easy and not expensive resource. But recently, it is becoming a matter of fact for a sustainable future of this industrial area. Economic performance of companies is starting to strongly depend on water need through both, environmental and economic points of view.

Water accounting results to be an important concern of the environmental management which supports corporate management decisions referring this matter. Thus, this research is devoted to provide a specific technique to reduce the overall water consumption to flush molds by means of designing the proper MED system matching the thermal features of the heat recovered from the stacks of the kiln. SDEWES concept of improving efficiency by means of the integration of wastes from one process to another using it as a resource is followed with the target of a more sustainable industry of sanitary-ware manufacturing.

Limitations of the research are clearly related with solubility and salt saturation. Currently, this subject is object of much research within the field of the desalination. Therefore, all the new technical advances in the latter would be profitable to the former.

References

- Agrafiotis, C., Tsoutsos, T., 2001. Energy saving technologies in the European ceramic sector: a systematic review. *Appl. Therm. Eng.* 21, 1231–1249. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(01\)00006-0](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(01)00006-0).
- Ammar, Y., Li, H., Walsh, C., Thornley, P., Sharifi, V., Roskilly, A.P., 2013. Reprint of "Desalination using low grade heat in the process industry: challenges and perspectives. *Appl. Therm. Eng.*, Includes Special Issue: PRO-TEM Special Issue 53, 234–245. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.11.010>.
- Hatzikioseyan, Artin, Kousi, Pavlina, 2003. *Modelling And Thermodynamic Analysis of A Multi Effect Distillation (Med) Plant For Seawater Desalination*. ResearchGate (PDF Download Available).
- Brückner, S., Liu, S., Miró, L., Radspieler, M., Cabeza, L.F., Lävemann, E., 2015. Industrial waste heat recovery technologies: an economic analysis of heat transformation technologies. *Appl. Energy* 151, 157–167. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.147>.
- C. Frantz, C., Seifert, B., 2015. Thermal analysis of a multi effect distillation plant powered by a solar tower plant - ScienceDirect. In: Presented at the International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, SolarPACES 2014, pp. 1928–1937. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.190>.
- cer_bref_0807.pdf [WWW Document], 2007. URL http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/cer_bref_0807.pdf (accessed 12.2.16).
- Ceramic Technology Sanitary-ware, 2010th ed, 2010. . SACMI IMOLA S.C.
- Chavez-Rodríguez, M.F., Mosqueira-Salazar, K.J., Ensinas, A.V., Nebra, S.A., 2013. Water reuse and recycling according to stream qualities in sugar–ethanol plants. *Energy Sustain. Dev.* 17, 546–554. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2013.08.003>.
- Chen, Q., KJ, M., Li, Y., Chua, K.J., 2018. Experimental and mathematical study of the spray flash evaporation phenomena. *Appl. Therm. Eng.* 130, 598–610. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.018>.
- Chernozubov, V.B., Zaostrovsky, F.P., Shatsillo, V.G., Golub, S.I., Novilov, E.P., Tkach, V.I., 1966. Prevention of scale formation in distillation desalination plants by means of seeding. *Desalination* 1, 50–60. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)84007-2](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)84007-2).
- Christ, K.L., Burritt, R.L., 2013. Environmental management accounting: the significance of contingent variables for adoption. *J. Clean. Prod.* 41, 163–173. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.007>.
- Christ, K.L., Burritt, R.L., 2017. Water management accounting: a framework for corporate practice. *J. Clean. Prod.* 152, 379–386. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.147>.
- Cioccolanti, L., Savoretti, A., Renzi, M., Caresana, F., Comodi, G., 2015. Design and test of a single effect thermal desalination plant using waste heat from m-CHP units. *Appl. Therm. Eng.* 82, 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.02.047>.
- Colla, V., Branca, T.A., Rosito, F., Lucca, C., Vivas, B.P., Delmiro, V.M., 2016. Sustainable Reverse Osmosis application for wastewater treatment in the steel industry. Special Volume: SDEWES 2014 - Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems *J. Clean. Prod.* 130, 103–115. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.025>.
- Cuiuella-Suárez, C., Colmenar-Santos, A., Castro-Gil, M., 2012. Tri-generation system to couple production to demand in a combined cycle. *Energy* 40, 271–290. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.073>.
- Cuiuella-Suárez, C., Colmenar-Santos, A., Borge-Diez, D., López-Rey, Á., 2018. Management tool to optimize energy and water consumption in the sanitary-ware industry. *J. Clean. Prod.* 197 (Part 1), 280–296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.195>.
- Dastgerdi, H.R., Whittaker, P.B., Chua, H.T., 2016. New MED based desalination process for low grade waste heat. *Desalination* 395, 57–71. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.05.022>.
- Dubreuil, A., Assoumou, E., Bouckaert, S., Selosse, S., Maizi, N., 2013. Water modeling in an energy optimization framework – the water-scarce middle east context. *Appl. Energy, Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems* 101, 268–279. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.032>.
- El Ebaidi, Saad K., 2013. WATER CHEMICAL ANALYSIS FOR DIFFERENT STAGES IN TOBRUK DESALINATION PLANT. In: Presented at the the 13 Th International Conference on Materials Science and its Applications in Oil and Gas Industries, Benghazi.
- Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T., Melin, T., 2007. State-of-the-art of reverse osmosis desalination. *Desalination* 216, 1–76. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.12.009>.
- Gabalón-Estevan, D., Criado, E., Monfort, E., 2014. The green factor in European manufacturing: a case study of the Spanish ceramic tile industry. *J. Clean. Prod.* 70, 242–250. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.018>.
- Hoekst, Arjen Y., 2014. Water scarcity challenges to business. *Sci. Am.* 4, 318–320.
- Kaya, S., Küçükada, K., Mançuhan, E., 2008. Model-based optimization of heat recovery in the cooling zone of a tunnel kiln. *Appl. Therm. Eng.* 28, 633–641. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.04.002>.
- Matsumoto, A., 2015. Slip-casting by water-absorbing resin mold enables crack-free CeRamic MoldiNg system And products with partially different thicknesses. In: Ohji, T., Singh, M., Halbig, M. (Eds.), *Advanced Processing and Manufacturing Technologies for Nanostructured and Multifunctional Materials II*. John Wiley & Sons, Inc., pp. 45–54. <https://doi.org/10.1002/9781119211662.ch6>.
- Mezquita, A., Boix, J., Monfort, E., Mallol, G., 2014. Energy saving in ceramic tile kilns: cooling gas heat recovery. *Appl. Therm. Eng.* 65, 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.01.002>.
- Mezquita, A., Monfort, E., Ferrer, S., Gabaldón-Estevan, D., 2017. How to reduce energy and water consumption in the preparation of raw materials for ceramic tile manufacturing: dry versus wet route. *J. Clean. Prod.* <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.082>.
- Miró, L., Brueckner, S., McKenna, R., Cabeza, L.F., 2016. Methodologies to estimate industrial waste heat potential by transferring key figures: a case study for Spain. *Appl. Energy* 169, 866–873. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.089>.
- Nannarone, A., Toro, C., Sciubba, E., 2017. Multi-effect distillation desalination process: modeling and simulation. In: ResearchGate. Presented at the the 30TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON EFFICIENCY, COST, OPTIMIZATION, SIMULATION and ENVIRONMENTAL IMPACT OF ENERGY SYSTEMS, at San Diego, USA, San Diego, USA.
- Nicolau, V. de P., Dadam, A.P., 2009. Numerical and experimental thermal analysis of a tunnel kiln used in ceramic production. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 31, 297–304. <https://doi.org/10.1590/S1678-58782009000400003>.
- Ophir, A., Gendel, A., 1994. Adaptation of the multi-effect distillation (MED) process to yield high purity distillate for utilities, refineries and chemical industry. *Desalination* 98, 383–390. [https://doi.org/10.1016/0011-9164\(94\)00164-2](https://doi.org/10.1016/0011-9164(94)00164-2).
- Owen, A., Brockway, P., Brand-Correa, L., Bunse, L., Sakai, M., Barrett, J., 2017. Energy consumption-based accounts: a comparison of results using different energy extension vectors. *Appl. Energy* 190, 464–473. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.089>.
- Roberts, F., 1978. The aims, methods and uses of energy accounting. *Appl. Energy* 4, 199–217. [https://doi.org/10.1016/0306-2619\(78\)90003-X](https://doi.org/10.1016/0306-2619(78)90003-X).
- Shao, J., Taisch, M., Ortega Mier, M., 2016. A study on a configuration model for facilitating sustainable consumption: a case involving the automobile industry in Italy. *J. Clean. Prod.* 137, 507–515. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.130>.
- Taylor, P.B., Wadkin, J.W., 1986. Industrial heat recovery projects supported through the energy efficiency demonstration scheme. *J. Heat Recovery Syst.* 6, 83–92. [https://doi.org/10.1016/0198-7593\(86\)90175-X](https://doi.org/10.1016/0198-7593(86)90175-X).
- Urbaniec, K., Mikulić, H., Duić, N., Lozano, R., 2016. SDEWES 2014 – sustainable development of energy, water and environment systems. Special Volume: SDEWES 2014 - Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems *J. Clean. Prod.* 130, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.062>.
- Wakeel, M., Chen, B., Hayat, T., Alsaedi, A., Ahmad, B., 2016. Energy consumption for water use cycles in different countries: a review. *Appl. Energy* 178, 868–885. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.114>.
- Zhang, Y., Wang, J., Redemann, T., Specht, E., 2015. Thermal behavior of kiln cars while traveling through a tunnel kiln. *Adv. Mech. Eng.* 7, 1687814015588468. <https://doi.org/10.1177/1687814015588468>.

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 211 de 231

ANEXO VI: "Heat recovery in sanitary-ware industry applied to water and energy saving by multi-effect distillation" CERTIFICADO DE PUBLICACIÓN





Journal Of Cleaner Production

Certificate of publication for the article titled:

"Heat recovery in sanitary-ware industry applied to water and energy saving by multi-effect distillation"

Authored by:
cuviella carlos

Published in:
Volume 213C, 2019, Pages 1322-1336

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 212 de 231

ANEXO VII: "Heat recovery in sanitary-ware industry applied to water and energy saving by multi-effect distillation" FACTOR DE IMPACTO



Journal of Cleaner Production

Country

[Netherlands](#) -  SCIMAGO INSTITUTIONS RANKINGS

173

Subject Area and Category

[Business, Management and Accounting Strategy and Management](#)

[Energy Renewable Energy, Sustainability and the Environment](#)

[Engineering Industrial and Manufacturing Engineering](#)

[Environmental Science Environmental Science \(miscellaneous\)](#)

H Index

Publisher

[Elsevier Ltd.](#)

Publication type

Journals

ISSN

09596526, 18791786

Coverage

1993-2020

Scope

The Journal of Cleaner Production is an international, transdisciplinary journal focusing on Cleaner Production, Environmental, and Sustainability research and practice. Through our published articles, we aim at helping societies become more sustainable. 'Cleaner Production' is a concept that aims at preventing the production of waste, while increasing efficiencies in the uses of energy, water, resources, and human capital. The Journal of Cleaner Production serves as a platform for addressing and discussing theoretical and practical cleaner production, encompassing environmental, and sustainability issues in corporations, governments, education institutions, regions, and societies. Subject areas include, but are not limited to: -Cleaner production and technical processes -Sustainable Development and Sustainability -Sustainable Consumption -Environmental and sustainability assessment - Sustainable Products and Services -Corporate sustainability and Corporate Social Responsibility -Education for Sustainable Development -Governance, legislation, and policy for sustainability



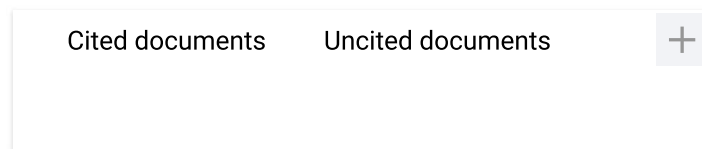
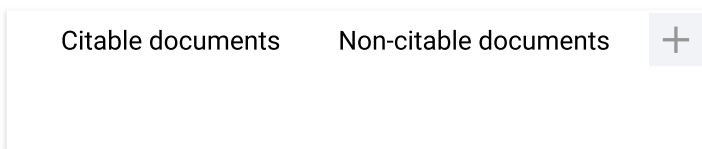
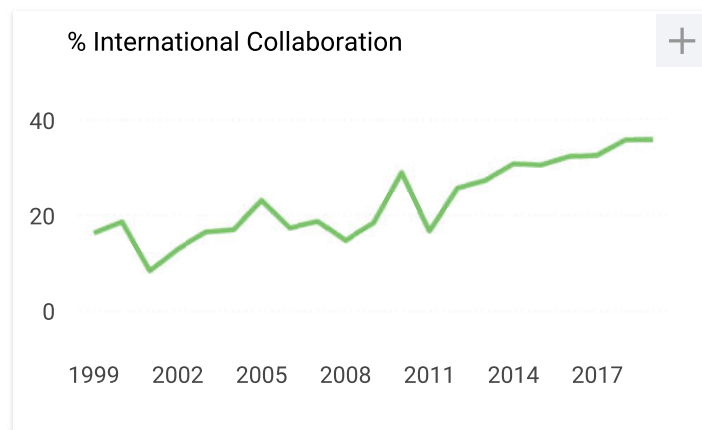
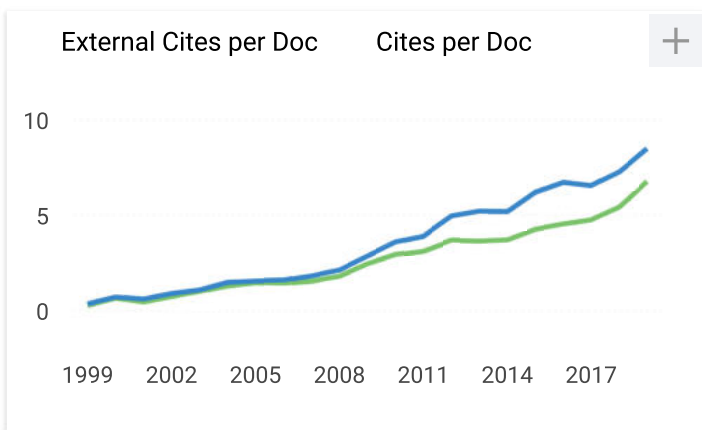
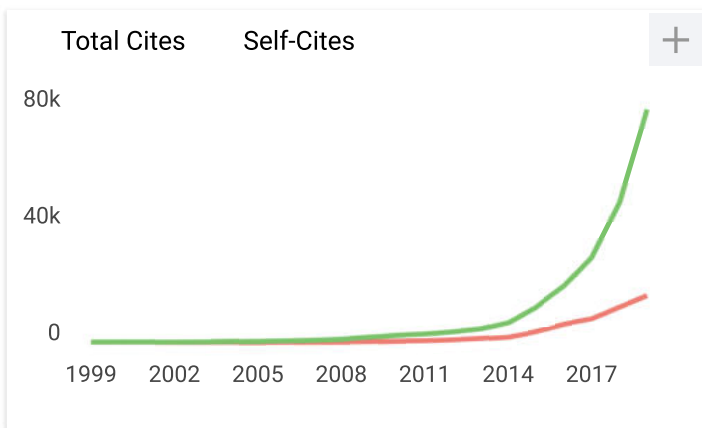
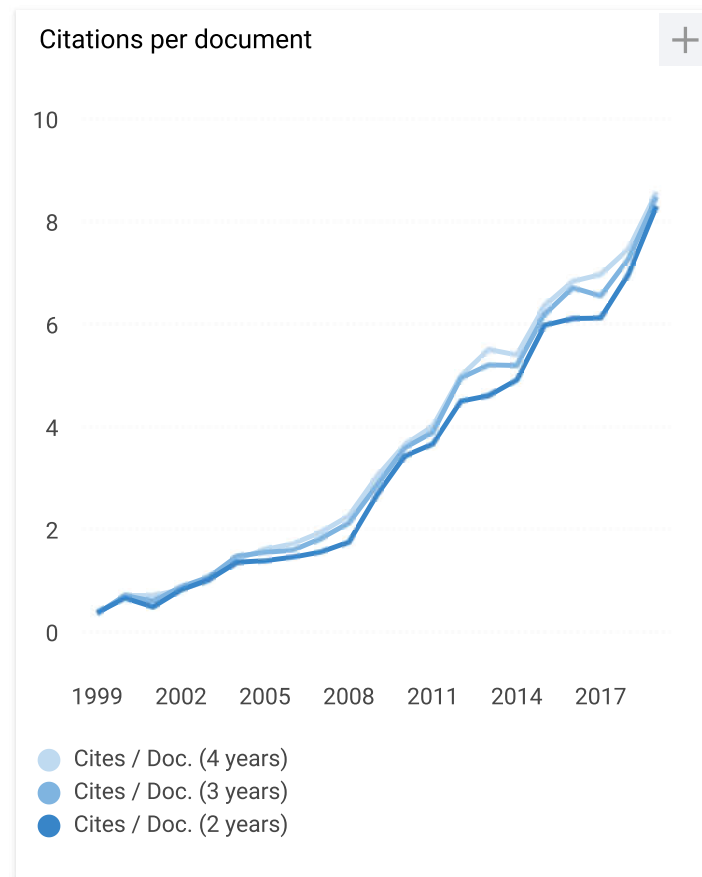
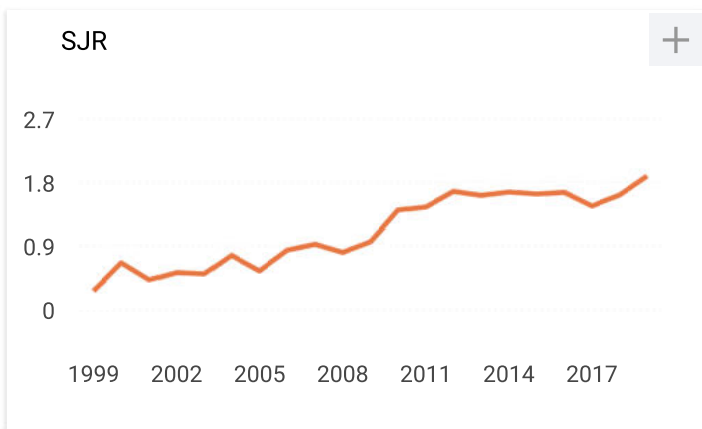
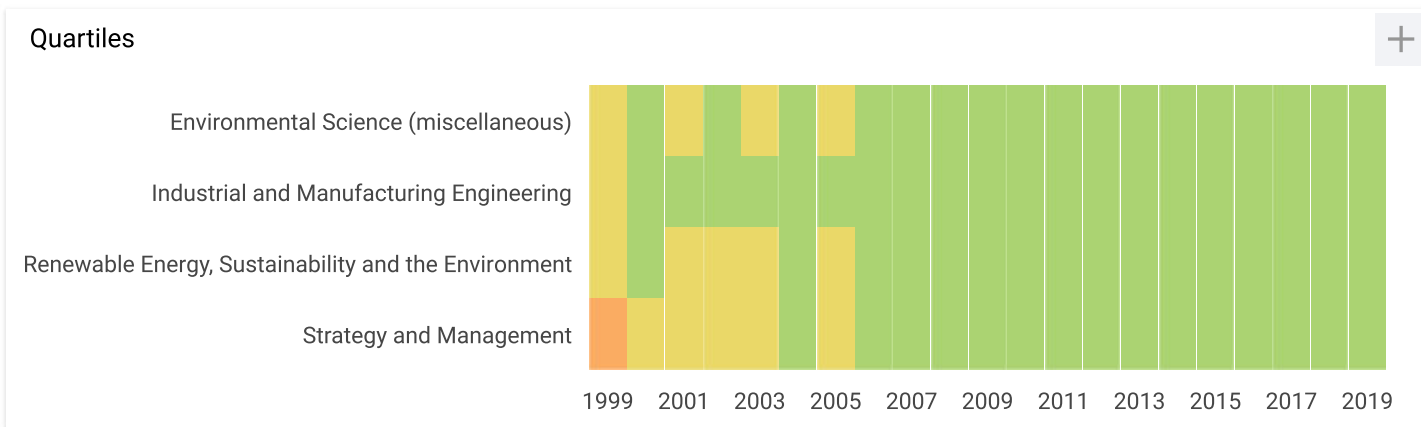
[Homepage](#)

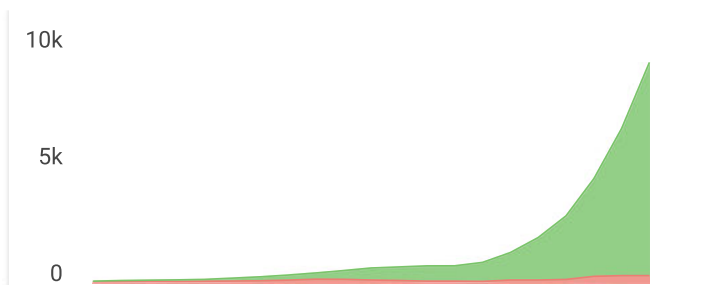
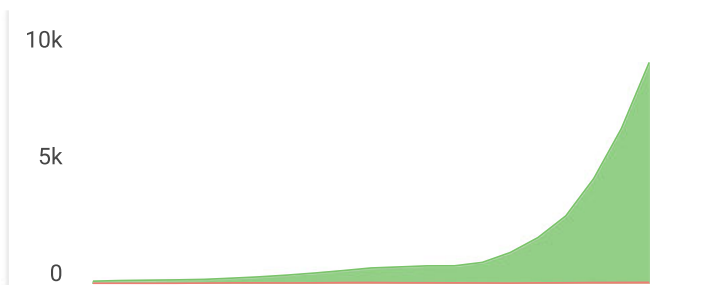
[How to publish in this journal](#)

[Contact](#)



[Join the conversation about this journal](#)





Journal of Cleaner Production

Q1

Environmental Science (miscellaneous)

best quartile

SJR 2019

1.89

powered by scimagojr.com

← Show this widget in your own website

Just copy the code below and paste within your html code:

```
<a href="https://www.scimaç
```

Metrics based on Scopus® data as of April 2020

N **Nuryusnita** 3 months ago

Good day

May I know where to check for how many issues published by certain journal publication?

thank you

Regard,
Yusnita

reply

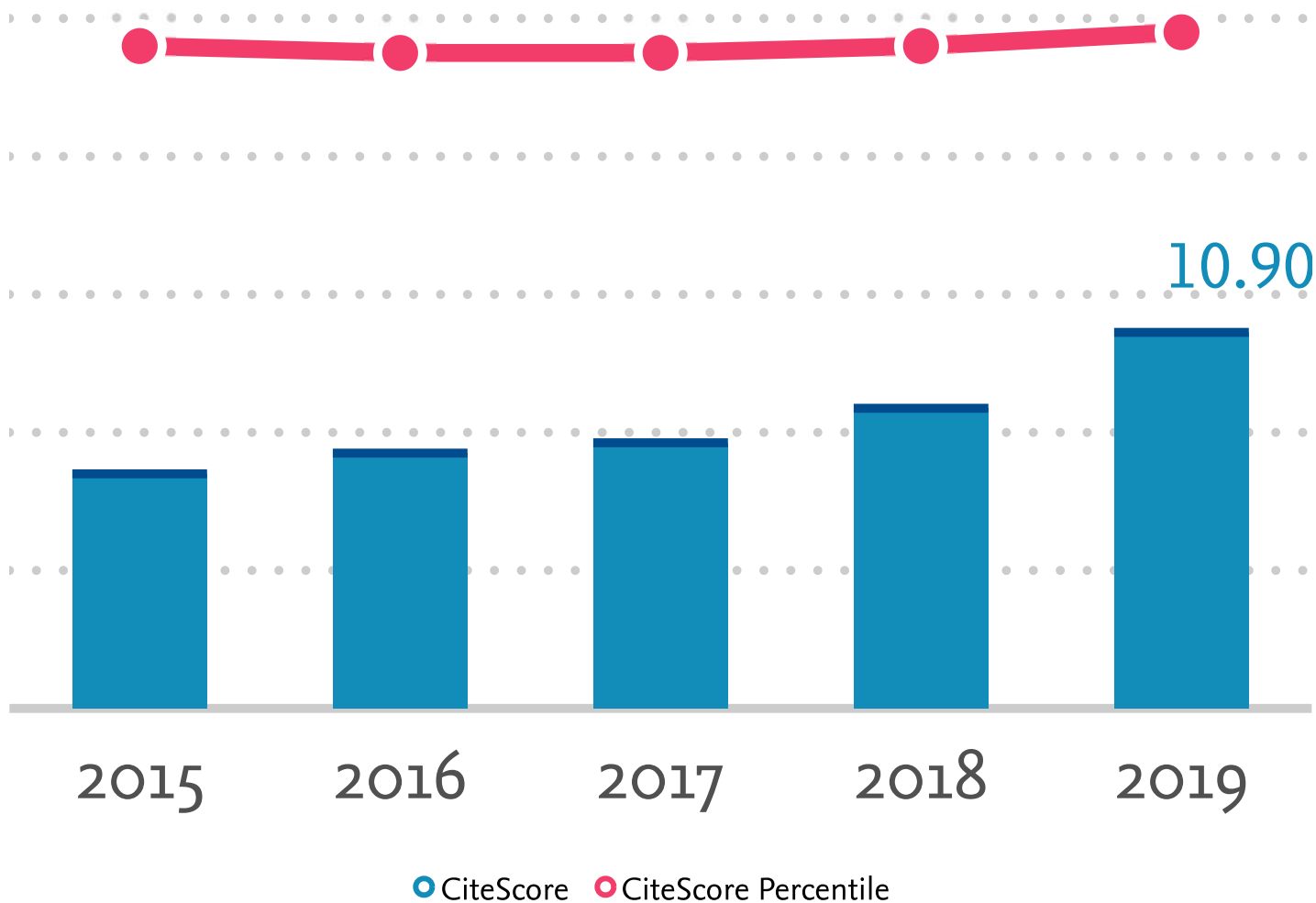


Melanie Ortiz 3 months ago

Dear Nuryusnita,
thank you for contacting us.

SCImago Team

CiteScore



ABOUT CITESCORE

CiteScore measures the average citations received per peer-reviewed document published in this title. CiteScore values are based on citation counts in a range of four years (e.g. 2016-2019) to peer-reviewed documents (articles, reviews, conference papers, data papers and book chapters) published in the same four calendar years, divided by the number of these documents in these same four years (e.g. 2016 – 19).

> View the full metrics for this title (<http://www.scopus.com/sourceid/19167>)

METRICS

YEAR	CITESCORE	CITESCORE PERCENTILE	CITATIONS	DOCUMENTS
2019	10.9	98	137661	12637
2018	8.7	96	85052	9776
2017	7.7	95	51626	6683
2016	7.4	95	33589	4540
2015	6.8	96	19673	2895

DEFINITION

CiteScore

CiteScore measures the average citations received per document published in a title. CiteScore values are based on citation counts in a range of four years (e.g. 2016-2019) to peer-reviewed documents (articles, reviews, conference papers, data papers and book chapters) published in the same four calendar years, divided by the number of these documents in these same four years (e.g. 2016 – 19).

For example, CiteScore 2019:

A = Citations to articles, reviews, conference papers, data papers and book chapters published in 2016-2019

B = Sum of articles, reviews, conference papers, data papers and book chapters published in 2016-2019

2019 CiteScore = A/B

A CiteScore is available for most active serial titles on Scopus — peer-reviewed journals, book series, conference proceedings and trade journals.

CiteScore Percentile

CiteScore Percentile indicates the relative standing of a serial title in its subject field.

A serial that has a CiteScore Percentile of 96% is ranked according to CiteScore as high or higher than 96% of titles in that category. A title will receive a CiteScore Percentile for each subject area in which it's indexed in Scopus.

CiteScore metrics

CiteScore™ metrics are a new standard that help to measure journal citation impact. They are comprehensive, transparent, current and free metrics calculated using data from Scopus®, the largest abstract and citation database of peer-reviewed literature.

CiteScore metrics is a family of eight indicators that offer complementary views to analyze the publication influence of serial titles of interest:

- CiteScore
- CiteScore Tracker
- CiteScore Percentile
- CiteScore Quartiles
- CiteScore Rank
- Citation Count
- Document Count
- Percentage Cited

This page shows the highest percentile and related rank for the title. A title will receive a CiteScore Percentile and rank for each subject area in which it's indexed in Scopus.

Full metrics for this title are available for free on [Scopus.com \(http://www.scopus.com/sourceid/19167\)](http://www.scopus.com/sourceid/19167)

OTHER METRICS IN IMPACT

> **IMPACT FACTOR (/JOURNALS/0959-6526/IMPACT_FACTOR)**

> **5 YEAR IMPACT FACTOR (/JOURNALS/0959-6526/IMPACT_FACTOR_5_YEAR)**

> **ARTICLE INFLUENCE & EIGENFACTOR (/JOURNALS/0959-6526/ARTICLE_INFLUENCE)**

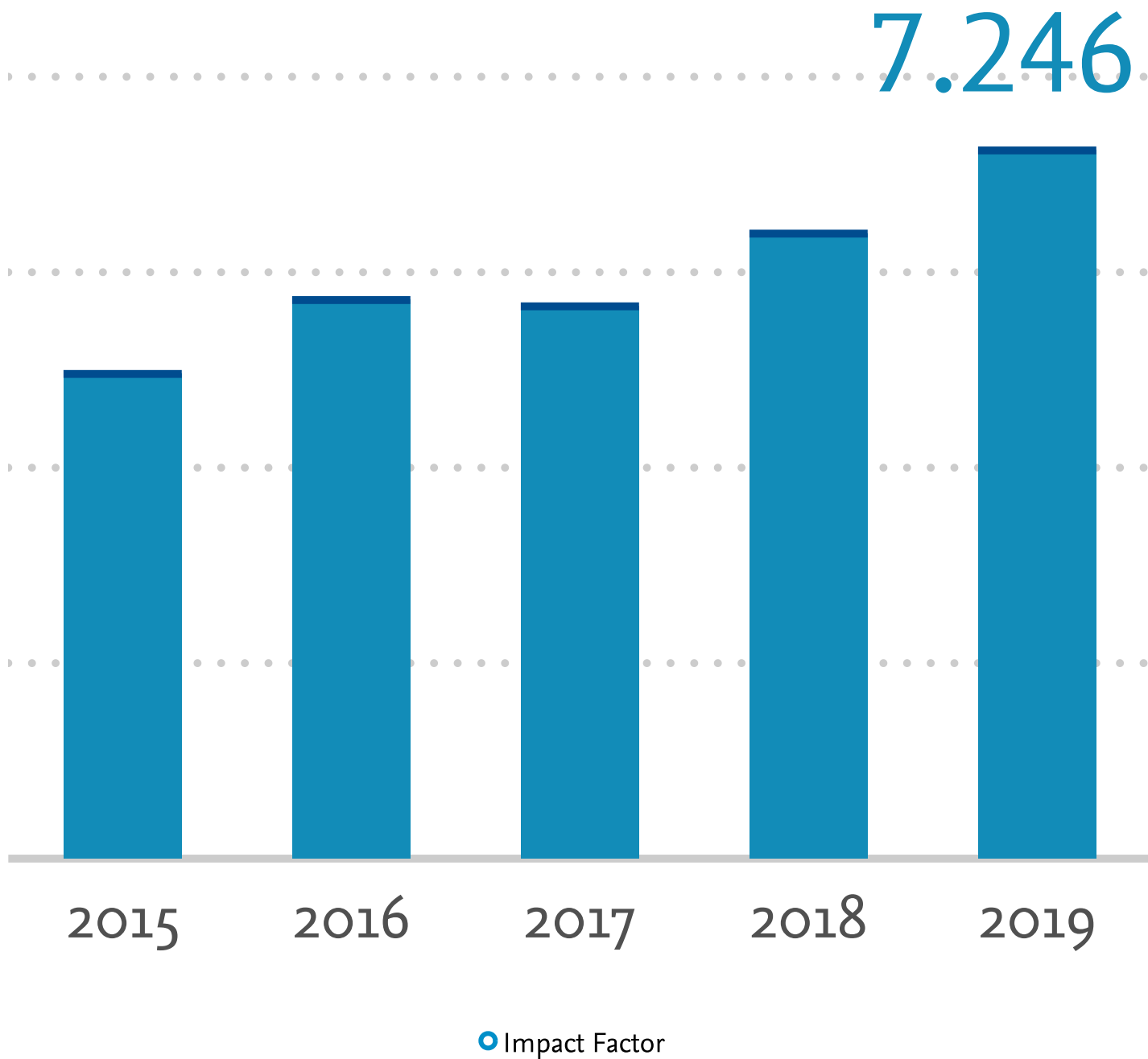
> **SNIP (/JOURNALS/0959-6526/SNIP)**

> **SJR (/JOURNALS/0959-6526/SJR)**

Elsevier © 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Elsevier.com (<http://www.elsevier.com>) | About Elsevier (<http://www.elsevier.com/about/at-a-glance>) | Terms & Conditions
(<http://www.elsevier.com/legal/elsevier-website-terms-and-conditions>) | Privacy Policy
(<http://www.elsevier.com/legal/privacy-policy>)

Impact Factor & Ranking



ABOUT IMPACT FACTOR & RANKING

Measure of the number of times an average paper in this journal is cited. Copyright Clarivate Analytics.

METRICS

YEAR	I.F.	ENGINEERING, ENVIRONME...	ENVIRONMENTAL SCIENCES	GREEN & SUSTAINABLE SCIE...
2019	7.246	8/53	19/265	7/49
2018		8/52	18/250	6/35
2017		7/50	21/241	6/33
2016		6/49	17/229	5/37
2015		5/49	16/224	5/29

DEFINITION

Impact Factor

The Journal Impact Factor is published each year by Clarivate Analytics. It is a measure of the number of times an average paper in a particular journal is cited during the preceding two years.

For example:

A = the number of times articles published in a specific journal in 2014 and 2015 were cited by journals during 2016.

B = the total number of 'citable items' published by that journal in 2014 and 2015. ('Citable items' are usually articles, reviews, proceedings, etc.; not editorials or letters-to-the-editor.)

2016 impact factor = A/B.

Actual value is intentionally only displayed for the most recent year. Earlier values are available in the Journal Citation Reports from Clarivate Analytics

ISI ranking

Journals are often ranked by Impact Factor in an appropriate Clarivate Analytics subject category. As there are now two Impact Factors published – two-year and five-year Impact Factors – this rank may differ, so care is needed when assessing these ranked lists to understand which of the two metrics is being used. In addition, journals can be categorized in multiple subject categories, giving them different ranks for each subject. Consequently, a rank should always be in context to the subject category.

OTHER METRICS IN IMPACT

> **CITESCORE** ([/JOURNALS/0959-6526/CITESCORE](#))

> **5 YEAR IMPACT FACTOR** ([/JOURNALS/0959-6526/IMPACT_FACTOR_5_YEAR](#))

> **ARTICLE INFLUENCE & EIGENFACTOR** ([/JOURNALS/0959-6526/ARTICLE_INFLUENCE](#))

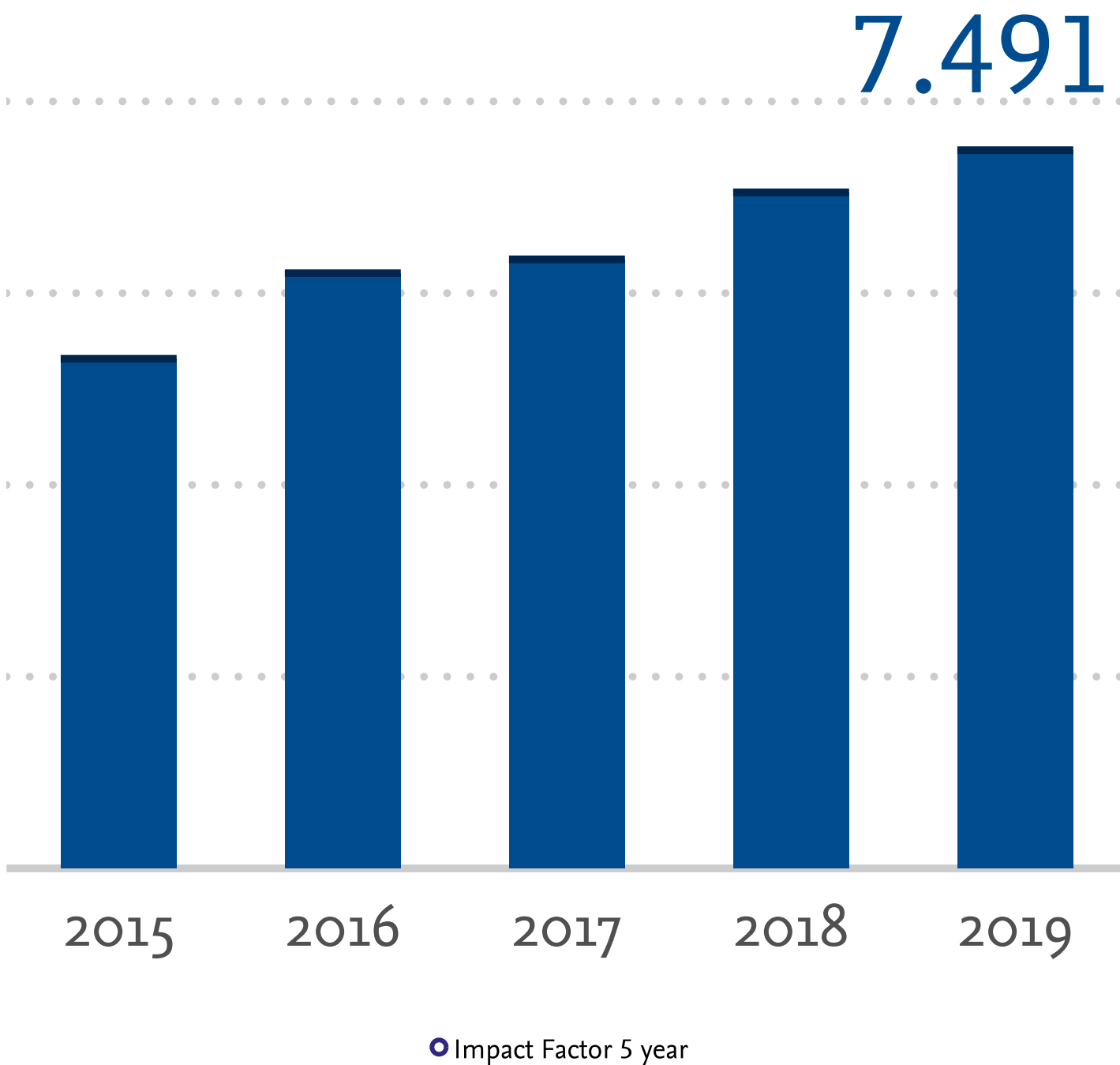
> **SNIP** ([/JOURNALS/0959-6526/SNIP](#))

> **SJR** ([/JOURNALS/0959-6526/SJR](#))

Elsevier © 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Elsevier.com (<http://www.elsevier.com>) | About Elsevier (<http://www.elsevier.com/about/at-a-glance>) | Terms & Conditions (<http://www.elsevier.com/legal/elsevier-website-terms-and-conditions>) | Privacy Policy (<http://www.elsevier.com/legal/privacy-policy>)

5 Year Impact Factor & Ranking



ABOUT 5 YEAR IMPACT FACTOR & RANKING

Impact Factor based on 5 years of history. Copyright Clarivate Analytics.

METRICS

YEAR	I.F. ENGINEERING, ENVIRONME...	ENVIRONMENTAL SCIENCES	GREEN & SUSTAINABLE SCIE...	
2019	7.491	8/52	18/241	7/41
2018		7/52	17/236	6/32
2017		7/50	19/231	6/32
2016		5/49	14/229	5/37
2015		6/48	19/218	5/27

DEFINITION

Impact Factor

A base of five years may be more appropriate for journals in certain fields because the body of citations may not be large enough to make reasonable comparisons, or it may take longer than two years to publish and distribute leading to a longer period before others cite the work.

Actual value is intentionally only displayed for the most recent year. Earlier values are available in the Journal Citation Reports from Clarivate Analytics.

ISI ranking

Journals are often ranked by Impact Factor in an appropriate Clarivate Analytics subject category. As there are now two Impact Factors published – two-year and five-year Impact Factors – this rank may differ, so care is needed when assessing these ranked lists to understand which of the two metrics is being used. In addition, journals can be categorized in multiple subject categories, giving them different ranks for each subject. Consequently, a rank should always be in context to the subject category.

OTHER METRICS IN IMPACT

> **CITESCORE (/JOURNALS/0959-6526/CITESCORE)**

> **IMPACT FACTOR (/JOURNALS/0959-6526/IMPACT_FACTOR)**

> **ARTICLE INFLUENCE & EIGENFACTOR (/JOURNALS/0959-6526/ARTICLE_INFLUENCE)**

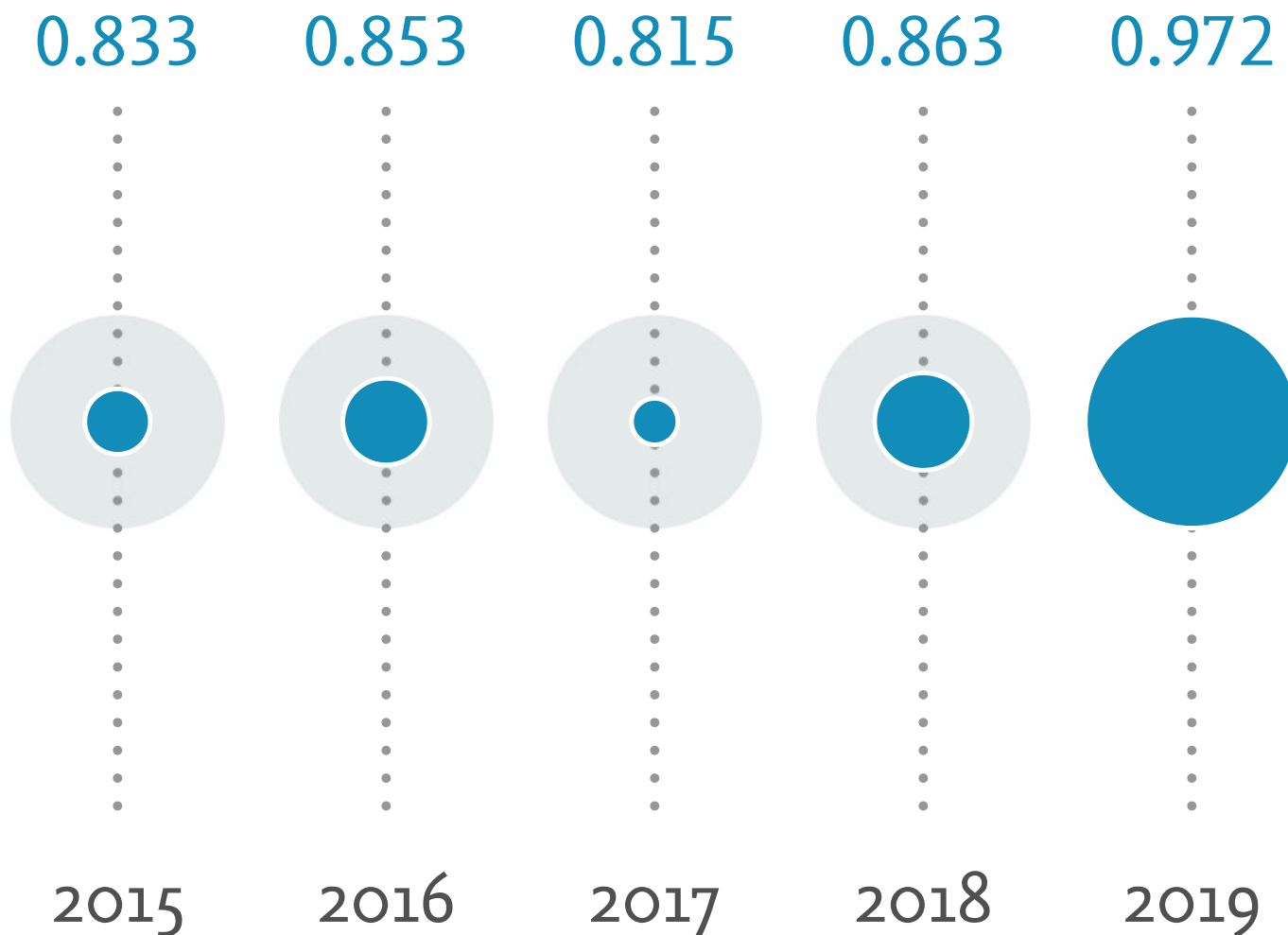
> **SNIP (/JOURNALS/0959-6526/SNIP)**

> **SJR (/JOURNALS/0959-6526/SJR)**

Elsevier © 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Elsevier.com (<http://www.elsevier.com>) | About Elsevier (<http://www.elsevier.com/about/at-a-glance>) | Terms & Conditions
(<http://www.elsevier.com/legal/elsevier-website-terms-and-conditions>) | Privacy Policy
(<http://www.elsevier.com/legal/privacy-policy>)

Article Influence & Eigenfactor



● Article influence

ABOUT ARTICLE INFLUENCE & EIGENFACTOR

Citations from highly ranked journals are more important and influential than those from lower ranked journals.

METRICS

YEAR	EIGENFACTOR	AI
2019	0.129	0.972
2018	0.084	0.863
2017	0.055	0.815
2016	0.039	0.853
2015	0.028	0.833

DEFINITION

Article Influence

Article Influence is calculated by dividing the Eigenfactor® score by the percentage of all articles recorded in the Journal Citation Reports that were published in a specific journal. The Article Influence score measures the average influence per article of the papers in a journal. As such, it is comparable to Clarivate Analytics widely used Impact Factor. Article Influence scores are normalized so that the mean article in the entire Clarivate Analytics Journal Citation Reports (JCR) database has an article influence of 1.00.

Eigenfactor®

The Eigenfactor® score is a rating of the total importance of a specific journal. Journals are rated according to the number of incoming citations, with citations from highly ranked journals weighted to make a larger contribution to the Eigenfactor® than those from poorly ranked journals. As a measure of importance, the Eigenfactor® score scales with the total impact of a journal. Journals generating higher impact to the field tend to have larger Eigenfactor® scores. The Eigenfactor® approach is thought to be more robust than the Impact Factor metric, which counts purely incoming citations without considering the significance of those citations.

Article influence and Eigenfactor® exclude self-citations.

OTHER METRICS IN IMPACT

> [CITESCORE \(/JOURNALS/0959-6526/CITESCORE\)](#)

> [IMPACT FACTOR \(/JOURNALS/0959-6526/IMPACT_FACTOR\)](#)

> [5 YEAR IMPACT FACTOR \(/JOURNALS/0959-6526/IMPACT_FACTOR_5_YEAR\)](#)

> [SNIP \(/JOURNALS/0959-6526/SNIP\)](#)

> [SJR \(/JOURNALS/0959-6526/SJR\)](#)

Elsevier © 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Elsevier.com (<http://www.elsevier.com>) | About Elsevier (<http://www.elsevier.com/about/at-a-glance>) | Terms & Conditions (<http://www.elsevier.com/legal/elsevier-website-terms-and-conditions>) | Privacy Policy (<http://www.elsevier.com/legal/privacy-policy>)

SNIP



● #Citations by papers past 3 years ● #Papers past 3 years

ABOUT SNIP

Source-Normalized Impact per Paper (SNIP) measures the impact of a paper within a subject field.

METRICS

YEAR	SNIP	CITATIONS	PAPERS
2019	2.394	68501	8577
2018	2.317	38890	5824
2017	2.383	21623	4056
2016	2.534	13943	2574
2015	2.396	8889	1761

DEFINITION

SNIP

Source-Normalized Impact per Paper (SNIP) measures contextual citation impact by weighting citations based on the total number of citations in a subject field. This unique perspective enables direct comparison of sources in different subject fields. The impact of a single citation is given higher value in subject areas where citations are less likely, and vice versa.

It is a ratio, with a numerator and a denominator. SNIP's numerator is a journal's impact per publication (IPP). This is simply the average number of citations received in a particular year (e.g. 2013) by papers published in the journal during the three preceding years (e.g. 2010, 2011 and 2012).

SNIP's denominator is the Database Citation Potential (DCP). We know that there are large differences between various scientific subfields in the frequency at which authors cite papers. In view of this, for each journal an indicator is calculated of the citation potential in the subject field it covers. This citation potential is included in SNIP's denominator, the DCP. SNIP is IPP divided by DCP.

SNIP enables direct comparison of sources in different subject fields. Citation potential is shown to vary not only between journal subject categories (groupings of journals sharing a research field) or disciplines (e.g., journals in Mathematics tend to have lower values than journals in Life Sciences), but also between journals within the same subject category. For instance, basic journals tend to show higher citation potentials than applied or clinical journals. Likewise, journals covering emerging topics tend to be higher than periodicals in classical subjects, or more general journals.

SNIP helps authors to identify which journals are performing best within their subject field, helping them decide where to publish. Mouse over the circles in the visualization and click on the year to view the journal's metrics. The size of the circles are compared to the highest values in the 5-year range. This highest value is represented by a closed circle, and the open circles indicate the journal's value compared to this highest value.

See [Journal Metrics site \(https://www.scopus.com/sources\)](https://www.scopus.com/sources) for background info and more datasets.

OTHER METRICS IN IMPACT

> [CITESCORE \(/JOURNALS/0959-6526/CITESCORE\)](#)

> [IMPACT FACTOR \(/JOURNALS/0959-6526/IMPACT_FACTOR\)](#)

> [5 YEAR IMPACT FACTOR \(/JOURNALS/0959-6526/IMPACT_FACTOR_5_YEAR\)](#)

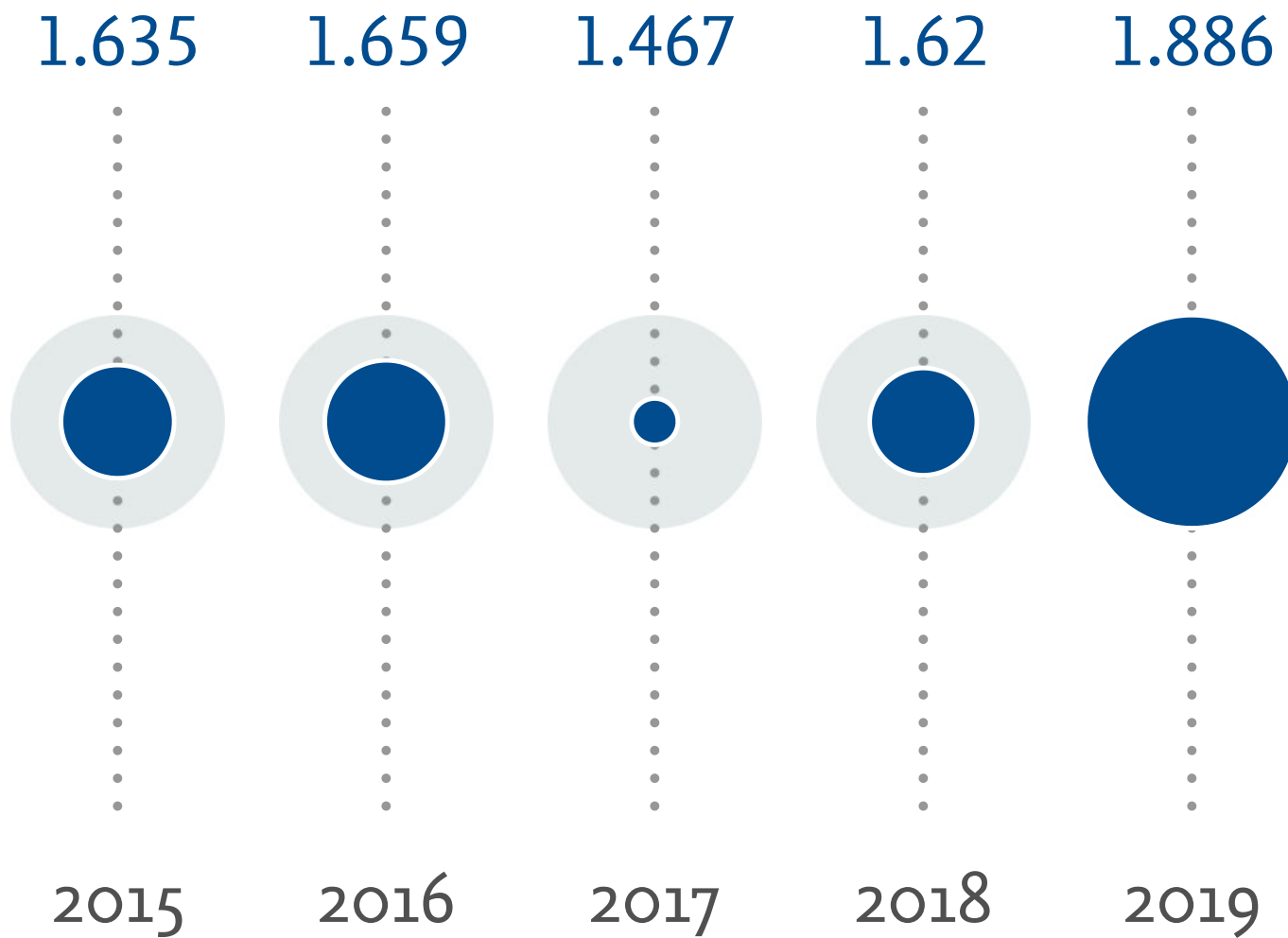
> [ARTICLE INFLUENCE & EIGENFACTOR \(/JOURNALS/0959-6526/ARTICLE_INFLUENCE\)](#)

> [SJR \(/JOURNALS/0959-6526/SJR\)](#)

Elsevier © 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Elsevier.com (<http://www.elsevier.com>) | About Elsevier (<http://www.elsevier.com/about/at-a-glance>) | Terms & Conditions (<http://www.elsevier.com/legal/elsevier-website-terms-and-conditions>) | Privacy Policy (<http://www.elsevier.com/legal/privacy-policy>)

SJR



● SJR

ABOUT SJR

SCImago Journal Rank (SJR) is a prestige metric based on the idea that 'all citations are not created equal'.

METRICS

YEAR	SJR
2019	1.886
2018	1.620
2017	1.467
2016	1.659
2015	1.635

DEFINITION

SJR

SCImago Journal Rank (SJR) is a measure of the number of times an average paper in a particular journal is cited, and as such is conceptually similar to the Impact Factor. A major difference is that instead of each citation being counted as one, as with the Impact Factor, the SCImago Journal Rank assigns each citation a value greater or less than 1.00 based on the rank of the citing journal. The weighting is calculated using a three-year window of measurement and uses the Scopus database. Authors can use these metrics when deciding where to publish.

The idea is to assign weights to bibliographic citations based on the importance of the journals that issued them. Citations issued by more important journals will be more valuable than those issued by less important ones. This 'importance' will be computed recursively, i.e., the important journals will be those which in turn receive many citations from other important journals.

See [our Journal Metrics site \(https://www.scopus.com/sources\)](https://www.scopus.com/sources) for background information and datasets.

OTHER METRICS IN IMPACT

-
- > **CITESCORE (/JOURNALS/0959-6526/CITESCORE)**

 - > **IMPACT FACTOR (/JOURNALS/0959-6526/IMPACT_FACTOR)**

 - > **5 YEAR IMPACT FACTOR (/JOURNALS/0959-6526/IMPACT_FACTOR_5_YEAR)**

 - > **ARTICLE INFLUENCE & EIGENFACTOR (/JOURNALS/0959-6526/ARTICLE_INFLUENCE)**

 - > **SNIP (/JOURNALS/0959-6526/SNIP)**

Elsevier © 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Elsevier.com (<http://www.elsevier.com>) | About Elsevier (<http://www.elsevier.com/about/at-a-glance>) | Terms & Conditions (<http://www.elsevier.com/legal/elsevier-website-terms-and-conditions>) | Privacy Policy (<http://www.elsevier.com/legal/privacy-policy>)



Source details

Journal of Cleaner Production

Scopus coverage years: from 1993 to Present

Publisher: Elsevier

ISSN: 0959-6526 E-ISSN: 1879-1786

Subject area: Environmental Science: General Environmental Science

Business, Management and Accounting: Strategy and Management

Engineering: Industrial and Manufacturing Engineering

Energy: Renewable Energy, Sustainability and the Environment

CiteScore 2019

10.9



SJR 2019

1.886



SNIP 2019

2.394



[View all documents >](#)

[Set document alert](#)

[Save to source list](#) [Source Homepage](#)

[CiteScore](#) [CiteScore rank & trend](#) [Scopus content coverage](#)

i Improved CiteScore methodology



CiteScore 2019 counts the citations received in 2016-2019 to articles, reviews, conference papers, book chapters and data papers published in 2016-2019, and divides this by the number of publications published in 2016-2019. [Learn more >](#)

CiteScore 2019 ▼

$$10.9 = \frac{137,661 \text{ Citations } 2016 - 2019}{12,637 \text{ Documents } 2016 - 2019}$$

Calculated on 06 May, 2020

CiteScoreTracker 2020 ⓘ



$$13.0 = \frac{201,701 \text{ Citations to date}}{15,504 \text{ Documents to date}}$$

Last updated on 02 March, 2021 • Updated monthly

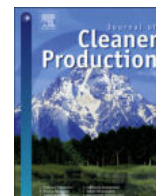
CiteScore rank 2019 ⓘ

Category	Rank	Percentile
Strategy and Management		
Engineering		
Industrial and Manufacturing Engineering	#9/340	97th
Energy		
Renewable	#18/179	90th

[View CiteScore methodology >](#) [CiteScore FAQ >](#) [Add CiteScore to your site](#)

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 213 de 231

ANEXO VIII: “Reduction of Water and Energy Consumption in Sanitary-Ware industry by Absorption Machine Operated with Recovered Heat”. COPIA DE LA PUBLICACIÓN.



Reduction of water and energy consumption in the sanitary ware industry by an absorption machine operated with recovered heat



Carlos Cuviella-Suárez^a, Antonio Colmenar-Santos^{a, *}, David Borge-Diez^b, África López-Rey^a

^a Department of Electrical Engineering, Electronic, Control, Telematics and Applied Engineering Chemistry, UNED, Juan Del Rosal, 12 – University City, 28040, Madrid, Spain

^b Department of Electrical and Systems and Automatic Engineering, University of León, School of Industrial and Computer Engineering, Campus of Vegazana, 24071, León, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 20 December 2019

Received in revised form

31 December 2020

Accepted 20 January 2021

Available online 25 January 2021

Handling editor: Yutao Wang

Keywords:

Ceramic industry

Energy reduction

Water saving

Factory design optimization

Absorption

Recovered heat

ABSTRACT

Water scarcity is a real problem that affects directly over one third of the world population, and greenhouse gases only worsen the situation. Due to this, action must be taken against the over-exploitation of resources. Water accounting and saving should be mandatory for a proper sustainable industry. In this regard, the sanitary ware industrial sector, as an intensive consumer of water, should make a social commitment to contribute to stopping water overuse. Sanitary ware manufacturing delivers an amount of water equivalent to the half of the total production weight via evaporation. The aim of this research was to find a green process to reuse the evaporated water and thereby reduce the overall water consumption level as well as promote a cleaner technology with low environmental impact. The key point in supporting sustainability restriction is to match water condensation with heat recovery to avoid any energy surplus. The thermal energy recovered from kiln exhaust gets transferred into a cold flow, which condenses the evaporated water by an absorption cycle. Computational modeling was used to thermodynamically analyze and optimize the performance of this novel technology. The proposed model was applied to the most extended technologies to reduce natural gas usage by 25% and total water usage by 16%. Besides, the surplus of condensed water from combustion and from air moisture has been quantified to be added to savings. The present research provides a practical tool for the sector to use in designing more efficient, green manufacturing plants while supporting a more sustainable business model. It demonstrates and quantifies the potential of water saving in the sanitary ware industry, which had never before been tackled.

© 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

The ceramic industry is traditionally an intensive consumer of resources, especially energy and water, which are usually closely linked (Dubreuil et al., 2013). There is much literature on reducing the consumption of both these resources (Silvestri et al., 2020) in general and with respect to the ceramic industry in particular. However, most of the literature is focused on the tiles field rather than Sanitary ware manufacturing. In this regard, the measures provided to save water and energy within the tile industry do not reach the scope of the Sanitary ware possibilities even though some

solutions are applicable. Some of them regard raw materials as (Mezquita et al., 2017), where energy and water requirements are reduced during slip preparation through selected raw materials. Another example is that of (Wang, 2018), wherein the savings from using wollastonite as base material were analyzed (Tables 13 and 14).

Ceramic processing and the generic industrial sector have been widely studied from different perspectives. In 2001, Agrafiotis and Tsoutsos analyzed all the energy-saving technologies developed during the two last decades of the past century. There have been many new ideas and developments regarding not only energy but resources in general. Nevertheless, some research is devoted to analyzing restrictions to efficiency rather than solutions, as in the study by da Silva et al. (2017), which considers the efficiency problem for the red ceramic industry, which is a sub-sector of the

* Corresponding author.

E-mail address: acolmenar@ieec.uned.es (A. Colmenar-Santos).

Abbreviations

NG	Natural gas
CO ₂	Carbon dioxide
HVU	Heating and ventilation unit
IL	Ignition loss (volatile organic materials)
rho	Density
WD	Ware dryer
CF	Conventional factory
OF	Optimized factory
p.u.	Per unit
AB	Absorption machine
NASA	National Aeronautics and Space Administration
JANAF	Joint Army Navy Air Force
RH	Recovered heat
IR ₃	Infinitely reusable, recyclable, and renewable industrial ecosystem

ceramic industry. Different factors that restrict the implementation of green technologies have been analyzed. [Huazhe et al. \(2019\)](#) studied how to recover water from cement paste using an approach based on thicken tailings in residual water. From an energy point of view, there has been much research regarding heat recovery. [Delpech et al. \(2017\)](#) described the general ceramic process and reviewed waste heat recovery from exhaust in the ceramic industry. A ratio of potential heat recovery was determined, which can be reused in similar fields such as concrete or steel manufacturing. Furthering the ceramics industry, some authors tackle this subject in a more extensive way: [Jouhara et al. \(2018\)](#) analyzed the state-of-the-art heat recovery potential and its applications in different industrial sectors. In particular, tile manufacturing has been well researched from a resource consumption perspective, as in [Mezquita et al. \(2017\)](#); the authors found that the residual heat from high temperatures is thermally suitable for direct recovery through thermal processes, such as drying or heating ([Mezquita et al., 2014](#)). This article focuses on direct heating rather than water saving application. When recovering heat, a heat transfer through a heat exchanger is needed. Depending on the technology selected for the heat exchanger, the recovery potential is reportedly improved by the heat pipe design ([Delpech et al., 2018](#)) in ceramic sector. [Egilegor et al. \(2020\)](#) discussed the use of heat pipe heat exchangers in three fields, including the tile manufacturing sector. In addition to this pipe technology, [Delpech et al. \(2019\)](#) proposed a radiative ceiling of pipes for a higher exergetic degree of recovery and its reuse within the drying process. Similarly, [Woolley et al. \(2018\)](#) proposed a four-step framework for manufacturers to assess the potential of heat recovery. After reviewing literature on ceramics manufacturing savings, it can be stated that much effort has been devoted to energy saving in general but not so much to water or the Sanitary ware industry.

The Sanitary ware production requirements are somewhat different from those of the tile manufacturing processes based on the method of extracting the water contained in the slip. The slip for tiles is spray-dried in an atomizer before the resultant granulated gets pressed to conform to the product which is already dry. On the other hand, the slip for sanitary ware is liquid when cast into the mold, after which the water has to be extracted. Depending on the material of this mold, the required amount of water to be flushed after removing the conformed piece is substantially different. Besides, if the mold is made of plaster, it requires more water to be produced. [Fig. 1](#) shows the water consumption map for

the two main manufacturing technologies ([Cuviella-Suárez et al., 2018](#)).

Most of the water has to be treated before entering the manufacturing process. This is due to the fact that dissolved salts are unwanted from the production point of view. This implies a surplus of energy and an extra amount of water from the treatment rejection. The most relevant fraction of water is delivered as liquid effluent through a treatment plant before being wasted. The way to treat the recovery of this water has been developed by [Cuviella-Suárez et al. \(2019\)](#). In this sense, the present research can be considered as a complementary action to close the loop of water recovery in sanitary ware industrial field.

The amount of evaporated water from slip, glaze, and molds during drying and heating processes equals to 7411 m³/year for a plaster mold factory and 5849 for a resin mold. This is quite a significant amount in the case of a plaster mold factory. Nevertheless, this research focuses on the water delivered by evaporation from the slip during the casting and drying processes. Accordingly, the main aim of this research was to describe a way to recover water from the slip for its reuse in the production cycle for better environmental efficiency; the proposed method involves an absorption cycle fueled by residual heat from the process itself. It is a novel way of rearranging the thermal map of the factory, which is particularly interesting in this industrial sector. The high temperature levels required for sintering ceramics or vitrifying glazes demand a great amount of heat, which is usually obtained from fossil fuels, mainly natural gas (NG). The recovery of heat waste from this firing process is in line with that given in the study by [Urbaniec et al. \(2016\)](#), wherein the waste from one system was used as the resource for another. The origin of data to build up the thermal map has been the model of the processes, as per [Milani et al. \(2017\)](#), wherein a kiln for ceramics was conceived as a series of modules. In this model, the defined temperature has to be regulated, and the thermal consumers in a Sanitary ware production line need to be analyzed ([Cuviella-Suárez et al., 2018](#)).

Once the heat source availability has been analyzed, the possibility of water recovery needs to be assessed. Besides, apart from environmental benefits, there is a potential economic profit. [Abd El-Salam and El-Naggar \(2010\)](#) quantified the economic benefits of saving water by conventional measures to control consumption. In relation to heat recovery, [Brückner et al. \(2015\)](#) analyzed the economy of transforming recovered heat into heating or cooling systems.

Regarding water saving, there is some research on industrial processes for recovering the water involved. Condensed water is treated for recovered throughout the general manufacturing line in the food industry. [Suárez and Riera \(2015\)](#) proposed recovering water from a flash cooler in a dairy processing unit by reverse osmosis. Along the same lines, [Amón et al. \(2015\)](#) analyzed the water–energy relationship involved in the treatment of tomatoes with steam and found an opportunity for recovering both energy and water from the steam.

There are other studies outside the food industry on recovering energy from latent heat in exhausting gases. For instance, [Gao et al. \(2019\)](#) proposed a method to recover moisture from flue gas in the boiler of a power plant by means of a ceramic membrane array. This method of condensing the water differs from that of the present paper. [Xiong et al. \(2017\)](#) studied how to recover water and heat from condensates in a coal mine by using fluorine plastic heat exchangers. [Liew et al. \(2014\)](#) focused on the sensible heat of the water after being condensed in a total-site heat integration. Although these studies tackle the subject of water recovery, none of them seems to the present research with regard to the use of heat recovery involving an absorption machine.

Closer to the present research, several studies focus on

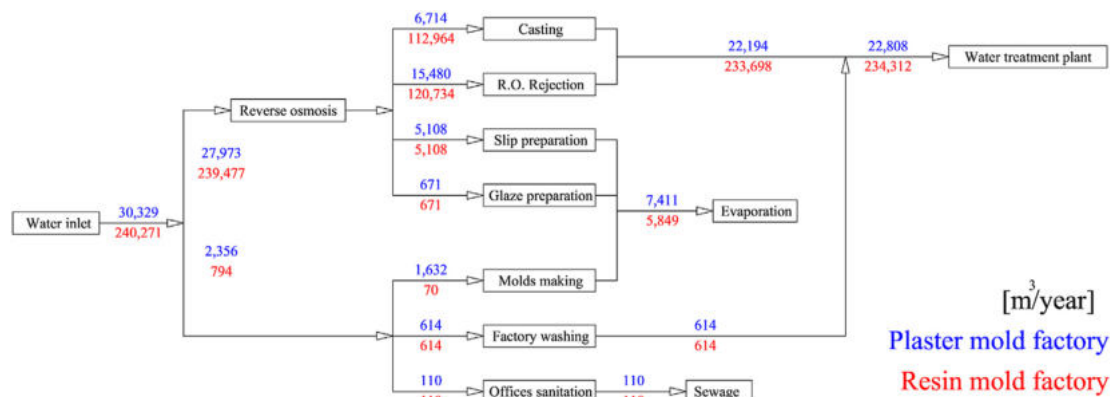


Fig. 1. Water balance in a sanitary ware factory (Blue for plaster molds and red for resin molds).

condensate from air conditioning with differences in the absorption cycle. Guz and Karen (2005) presented the economic potential of recovering water via condensation to the point of some communities enforcing new regulations regarding this matter. This paper may seem the present research but for the absorption machine. This makes a key difference because of the recovered heat. The present research combines this target with heat recovery. Similarly, Eades (2018) analyzed the recovery of condensates from air handling units in laboratories for reuse and explored the possibility of recovering sensible heat. Licina and Sekhar (2012) proposed condensing air from air handling units. The same remark is applicable to it. Their methodology was quite similar to that of the present research; psychrometric relationships were used to predict condensate generation based on the ambient meteorological conditions.

Finally, Algarni et al. (2018) reviewed the state-of-the-art air conditioning condensate recovery process. Again, their approach regarded the perspective of producing water from air conditioning rather than process water. Moreover, the recovered heat was not taken into account. Further, the drying process was not considered, and the study dealt with liquid condensate rather than the process of condensation required. Thus, there are several differences between their research and the present one.

After reviewing the literature on the subject, the present authors have concluded that the proposed recovery of water from the current processes is totally novel, with heat being recovered through an absorption machine in the Sanitary ware process. Similar attempts developed in other sectors cannot be considered the same. In this regard, this research’s aims were novel within the Sanitary ware manufacturing industrial sector. By means of the proposed system, water and CO₂ emissions will be lowered to fit the global requirements regarding climate change and sustainability, prompting the companies to improve the environmental performance. A proper environmental management account should include a water account (Christ and Burritt, 2013, 2017). The “zero liquid discharge” concept should be considered when designing the processes in an industry. Moreover, a health perspective that is environment-, society- and people-friendly should be taken into account if an industry aims to be really sustainable (Monfort et al., 2014). In other industrial sectors, the nexus “water reuse-resources recovery” has previously been assessed (Bayon et al., 2019; Onishi et al., 2017). The same aim has been considered from the perspective of life cycle assessment by Ros-Dosdá et al. (2018), who analyzed the tiles industry and met the European CO₂ targets.

Sustainability is not a scientific and environmental concept specific to papers, congresses, or specialized books but, rather, an

axis of rotation in any industry, process, and product. Many industries or processes find ingenious ways to improve efficiency in pursuit of sustainability. Ceramics sector must contribute to reducing pressure on natural resources by reforming their characteristics out of respect for biodiversity, climate, and ecosystems. Companies must develop a culture of saving energy and materials in their operations, by significantly reducing harmful emissions, evolving towards a low-carbon society, and providing efficient use of resources and clean energy. A life cycle assessment is a useful tool for a qualitative and quantitative check of consumption. This approach will not only reduce pollution but also make the surviving companies more competitive.

The adoption of harsh environmental standards is not only a matter of quality improvement, as it directly affects the cost and may limit the viability of a process, industry, or product. Water, energy, or raw materials, and compliance with technical standards are becoming key performance indicators, which can determine the survival of a company.

As the final conclusion after the reviewed literature, it can be stated that this research fills a gap in the state-of-the-art water recovery by combining heat and water recovery through an absorption cycle, providing a more sustainable process for Sanitary ware manufacturing.

2. Material and methods

The present research focused on the recovery of water from raw materials. For this purpose, the starting point was to assess the water content within the slip, which had to be eliminated from the ware by evaporation along the manufacturing line through different production processes.

To allow for the calculation, thermodynamic models were considered for every component of the system. Computational modeling allows the researcher to make predictions of the results that can be tested during the second stage of research (van Vugt et al., 2019). In the first stage, the results have to be coherent with the existing data. In the area of hybrid simulation (Brailsford et al., 2019), the research provides a tool for better evaluation of the relationship between actual existing data in the sanitary-ware manufacturing and the parameters for optimizing performance and resource efficiency, as other authors have developed in other fields (Nabavi-Pelesaraei et al., 2013). Many researchers such as Nabavi-Pelesaraei et al. (2013; 2019) have made use of these models for the peanut-processing and rice-processing industries.

Once the inlet and outlet flows for each component are calculated, the next step is to assess the best configuration for linking inlets of low thermal levels with outlets of high thermal levels. In

this sense, the kiln exhausting is applied to the dryer and HVU as a source of heat and the water carrier for evaporation. Later on, this vaporized water can be condensed through an absorption machine that can be operated with either NG or recovered heat from the kiln when there is excess.

The starting point of the calculation was to characterize every component of the system by flows and thermodynamic values in a conventional factory (CF), where everything is fueled by NG and vaporized water is not recovered. Then, they could be linked in a sort of optimized factory (OF). The approach of this research depended on comparing energy and water requirements for both configurations.

In this research, the CF consisted of a kiln, an HVU, and a dryer fueled by NG, as shown in Fig. 2.

This research proposes the reduction of energy by recovering heat from kiln exhaustion to fuel the WD and HVU to avoid NG consumption. On the other hand, water recovery is based on an absorption machine producing cool to condensate evaporated water during kiln exhausting. There is research regarding industrial applications of absorption machines, operated with residual heat (Lamine and Said, 2014). The calculated available recovered heat is given in Appendix 1. The three flows out of the kiln were mixed in mixer M1, which provided a relatively dry and hot flow to feed the dryer, HVU, and eventually the absorption machine when excess heat was available.

Since the thermal characteristics of the recovered heat are higher than required in WD and HVU, this research proposes taking advantage of it to condense the evaporated water, as shown in Fig. 3.

With this model, the recovered heat from a kiln with high oxygen content and humidity at a relatively high temperature is mixed with fresh air at the hygrometric requirement for either WD or HVU. This process is first carried out by the mixer M1, wherein different flows from the kiln are mixed together. Subsequently, mixers M2 and M5 regulate the heating flow at the required temperature for both WD and HVU. This mixture is blown into the dryer chamber or casting hall, and it absorbs condensed water from the

ware or mold in the condensers M3 and M6, which are basically heat exchangers; a change of phase takes place before downloading it to the external atmosphere. Besides, the refrigeration of the absorption cycle is provided by fresh air once it is pre-heated before mixing with recovered fumes from the kiln by the mixer M4. The absorption machine model selected for this research is based on a one-stage conventional commercial lithium bromide machine, as shown in Fig. 4.

These schemes are valid for different types of technologies. However, thermal and water requirements differ depending on the manner of casting.

According to Cuviella-Suárez et al. (2018), there are two main casting technologies applied to Sanitary ware manufacturing: plaster or resin molds. From the perspective of this research, the only difference between them is the way the water is absorbed from the slip by the mold. For plaster molds, the water has to be evaporated in a relatively dry environment within the casting hall provided by the heating ventilation units (HVU's) fueled by NG. On the other hand, retained water in resin molds is removed by compressed air blown throughout them after flushing with clean water. Considering this liquid waste water was not in the scope of this research. However, in plaster mold technology, there is a significant amount of water evaporated through the ventilation exhausting, which can be recovered by condensation.

Common components in Sanitary ware formulation are clays and kaolin as plastic materials, and quartz, feldspar, and chamottes as hard materials. These materials are usually given as a mixture of different components, as shown in tables A1 to A4 in Appendix A. To calculate the thermal magnitudes, it is important to assess some fundamental variables related to the raw materials, such as density; these have been calculated as per the formulae for solid materials, as shown in Table 1 for slip and Table 2 for glaze.

Once the solid material composition is characterized, the quantity of water needed to produce the slip has to be calculated. The slip then has to be cast into either plaster or resin molds. The variable which states the relative water content is the density of the required slip. This research calculated it as 1795 kg/m³ and the

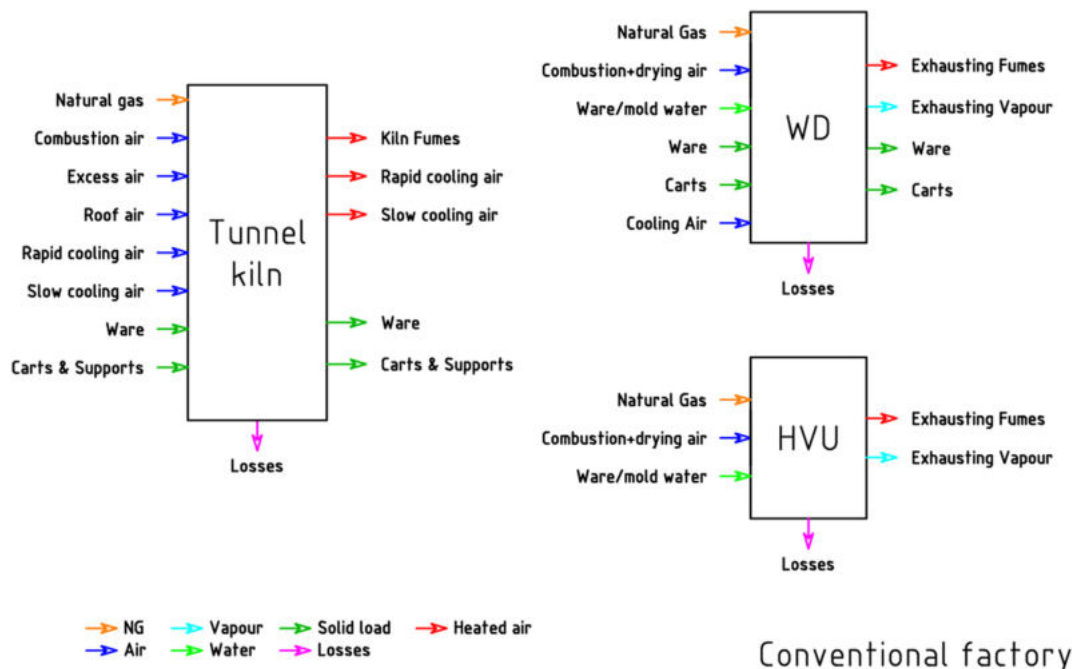


Fig. 2. Model schemes of thermal consumers in a conventional factory of sanitary-ware.

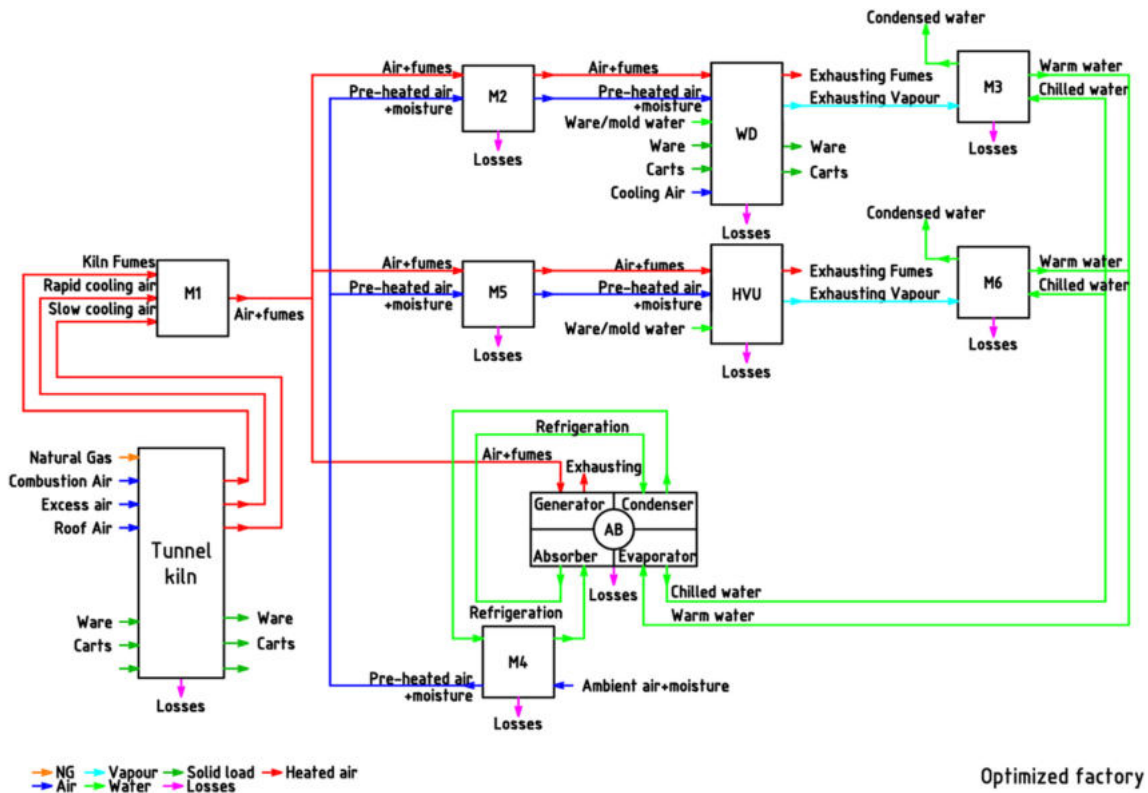


Fig. 3. Model schemes of thermal consumers in an optimized factory of sanitary-ware and thermal links arrangement.

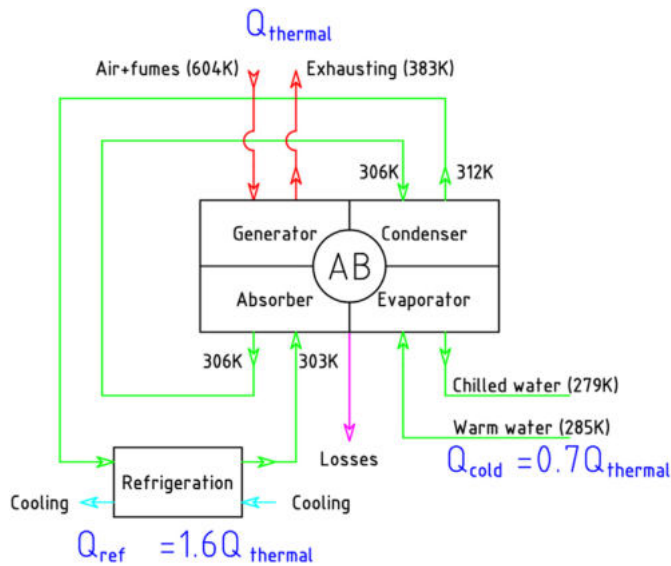


Fig. 4. Model scheme of the absorption cycle selected.

variables to state the absolute content of water depend on the factory and the type of product. The production parameters in this research are shown in Table 3.

Though there is no standard factory size, one standard tunnel kiln can fire number of toilet seats per year. Thus, this research considered this reference for calculation as the standard production unit. It was assumed that a regular labor week is 5/7 days, with a one-month leave. Additionally, 20 kg per piece was considered a good average weight for a toilet seat. All the calculations have been

carried out for these hypotheses.

Table 4 shows the amount of water contained in a slip or ware from slip preparation till drying for every piece of ware.

The procedure to remove water from slip is sequentially described below:

- Water from slip to mold that has to be removed from the mold
- Water evaporated from ware during casting environmental conditions
- Water evaporated from both the ware and mold during mold-drying environmental conditions
- Water evaporated from the ware within the ware dryer (WD)

The amount of water to be removed during each process is shown in Table 5.

Evaporation of water can be carried out by controlled psychrometry within the environment relative to every process in either the casting hall or dryer chamber (Cuviella-Suárez et al., 2018).

After the casting procedure, the ware is demolded and stood with no manipulation until its water content has dried up to 20%. Once this point has been reached, the temperature and humidity set-up is changed to provide drying conditions with higher temperature and lower humidity in order to evaporate the water in the molds. Meanwhile, water is reduced from 20% to 17% in the standing ware. After this period (next duty cycle), the mold is ready to work again with a fresh slip, and the ware is to be taken into the dryer where the remaining 17% of moist gets removed.

Environmental drying performance of the air depends on the psychrometric characteristics of the ambient air. Fig. 5 shows this study's temperature, humidity, and solar radiation, provided by National Weather Service for one year, in periods of 30 min.

Climate variability affects HVU performance all year long

Table 1
Formula and density of slip raw materials (Ceramic Technology Sanitary-ware, 2010).

SLIP FORMULA			rho
			kg/m3
PLASTIC MATERIALS	Ball clay	26.0%	2871
	Kaolin	27.5%	2948
	sub-Total =	53.5%	2910
ARID MATERIALS	Quartz	9.5%	3
	Feldspar	29.5%	2848
	Chamotte	7.5%	3118
	sub-Total =	46.5%	2903
TOTAL =		100.0%	2907

Table 2
Formula and density of glaze raw materials (Ceramic Technology Sanitary-ware, 2010).

GLAZE FORMULA			rho	
			kg/m3	
PLASTIC MATERIALS	Kaolin	10.0%	2948	
ARID MATERIALS	Feldspar	29.0%	2848	
	Nepheline	5.0%	2600	
	Quartz	20.0%	2650	
	Calcium carbonate	9.0%	2710	
	Wollastonite	7.0%	2950	
	Dolomite	5.0%	2840	
	Magnesium carbonate	2.0%	2960	
	Barium carbonate	1.0%	4290	
	Talcum	2.0%	2750	
	Zinc oxide	2.0%	5610	
	Zirconium silicate	8.0%	4560	
	TOTAL =		100.0%	3007

Table 3
Production parameters of the selected case study factory.

PRODUCTION PARAMETERS	
Produced pieces per year	500,000
Working days per year	232
Produced pieces per day	2155
Averaged dry weigh of the piece (kg)	20

Table 4
Water content of the ware piece for different processes along the manufacturing chain (Ceramic Technology Sanitary-ware, 2010).

WATER CONTENT/DRY WEIGH	%	Kg
Slip	48%	9.62
Demolding	21%	4.20
After casting period	20%	4.00
Entering the ware dryer	17%	3.40

Table 5
Water to be eliminated per day from ware for different processes along the manufacturing chain.

WATER TO BE ELIMINATED	kg/piece	kg/day	Kg/year
Water in slip	9.62	20,742	4812
Water retained in mold	5.42	11,690	2712
Water evaporated in HVU in casting period	0.20	431	100
Water evaporated in HVU in drying period	0.60	1293	300
Water evaporated in Ware-Dryer	3.40	7328	1700
TOTAL =	9.62	20,742	

because of the temperature, humidity, and solar radiation. This research took this effect into account by calculating resource performance every half hour.

To absorb water from the ware and mold, the air has to be unsaturated but within the ranged temperature and humidity, which are shown in Tables 6 and 7 for both types of factory, depending on the casting technology.

Knowing the water's evaporation point, as well as the drying ability of the environment, the thermal requirement can be computed in order to carry out the evaporation. Besides that, thermal requirements for transmission losses and solar radiation have to be met.

Fig. 6 shows the clear difference between casting and drying periods in a plaster mold-based factory due to the amount of water to be evaporated.

On the other hand, in a resin mold-based factory, the water from molds is not evaporated. Hence, thermal power is much smaller, and there is no great difference along the cycle but the one related to climate conditions, as shown in Fig. 7.

Regarding the drying process, climate changes do not affect performance since the fresh air required is taken from the factory hall, which would previously have been treated by HVU.

At 17% water content, the ware is taken into the dryer; the environmental conditions for the same are shown in Table 8 for five different drying phases.

The process in the dryer is the same as in a HVU from a thermodynamic point of view. Fresh, warm air is blown through the

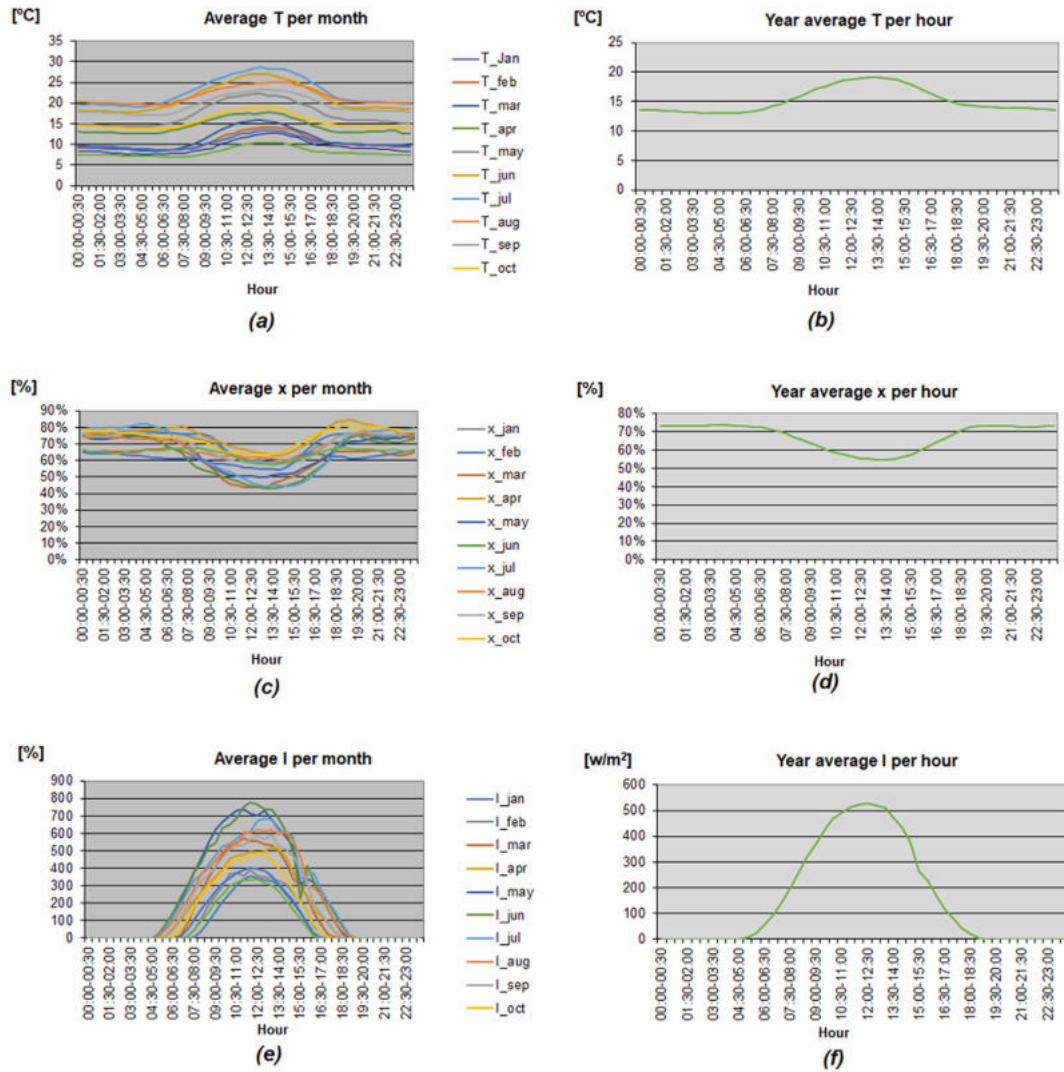


Fig. 5. Average climate conditions per hour of the day (T for Temperature, x for humidity and I for Solar radiation). (a), (c) and (e) represent the average values of every month. (b), (d) and (f) the annual averages.

Table 6
Operation parameters of a HVU cycle in a plaster mold factory.

		CASTING	DRYING
States		1	2
Time	h	10	14
T _{hall}	°C	25	40
T _{hall}	K	298	313
X _{hall}	%	75%	50%
e _{w hall}	Pa	3169	7377
X _{s hall}	g/kg	20.08	48.86
X _{hall}	g/kg	15.06	24.43
T _{external}	°C	17	14
T _{external}	K	290	287
X _{external}	%	61%	72%
e _{w external}	Pa	1921	1595
X _{s external}	g/kg	12.02	9.95
X _{external}	g/kg	7.37	7.17
Inlet ware water content	kg	20,742	8621
Water to mold	kg	11,690	0
Water to evaporate from ware	kg	431	1293
Ware remaining water	kg	8621	7328
Water to evaporate from mold	kg	0	11,690

Table 7
Operation parameters of a HVU cycle in a resin mold factory.

		CASTING
States		1
Time	h	24
T _{hall}	°C	25
T _{hall}	K	298
X _{hall}	%	75%
e _{w hall}	Pa	3169
X _{s hall}	g/kg	20.08
X _{hall}	g/kg	15.06
T _{external}	°C	15
T _{external}	K	288
X _{external}	%	68%
e _{w external}	Pa	1725
X _{s external}	g/kg	10.77
X _{external}	g/kg	7.28
Inlet ware water content	kg	20,742
Water to evaporate from ware	kg	1724

ware to evaporate the water within in. The main difference from HVU is the source of fresh air. While it was taken from the external atmosphere for HVU, it is supplied from the internal environment

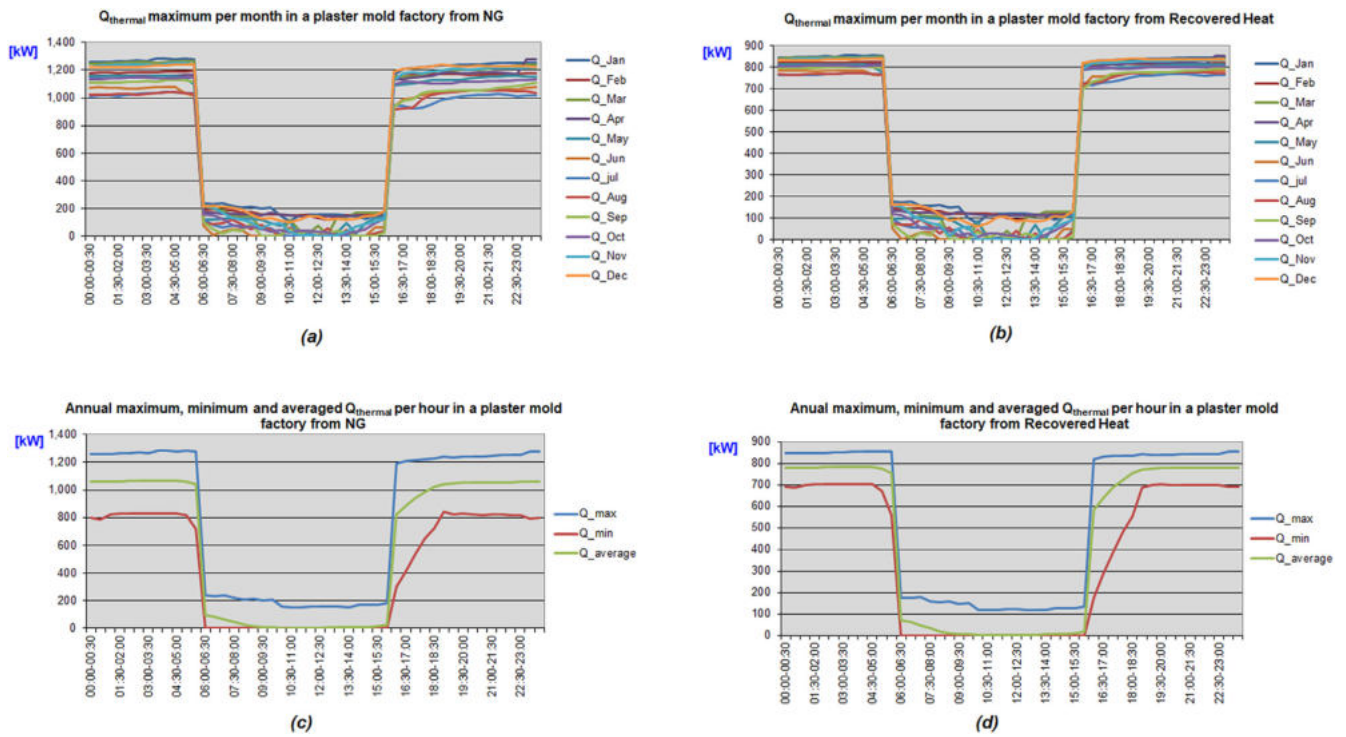


Fig. 6. Thermal power required for HVU in a plaster mold factory. (a) and (b) averaged power every month when supplied with either NG or RH. (c) and (d) max, min and annual average values.

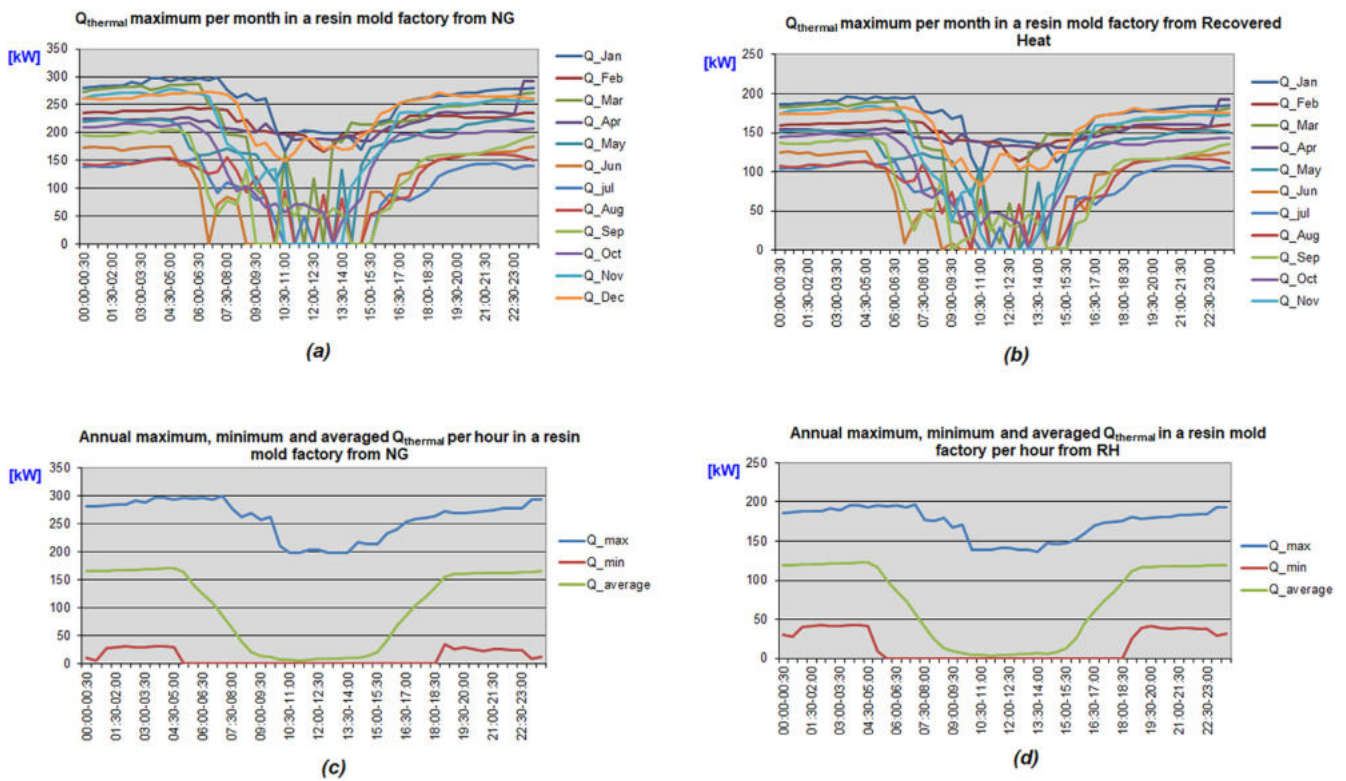


Fig. 7. Thermal power required for HVU in resin mold factory. (a) and (b) averaged power every month when supplied with either NG or RH. (c) and (d) max, min and annual average values.

Table 8
Operation parameters of a ware-dryer cycle.

		AMBIENT	HEATING				COOLING
States		0	1	2	3	4	5
Time	h		2	3	2	3	1
T _{hall}	°C	25	38	50	75	90	25
T _{hall}	K	298	311	323	348	363	298
X _{hall}	%	55%	75%	50%	30%	20%	55%
e _{w hall}	Pa	3169	6449	12,339	38,654	70,529	3169
X _{s hall}	g/kg	20.08	42.29	86.28	383.79	1425.68	20.08
X _{hall}	g/kg	11.05	31.72	43.14	115.14	285.14	11.05
Inlet water content	kg		3664	3125	2371	1293	
Water to evaporate	%		2.50%	3.5%	5.00%	6.00%	
Outlet water content	kg		3125	2371	1293	0	
Water to evaporate	kg		630	882	1261	1513	

in the production hall for the dryer. Thus, the dryer is not affected by climate conditions. The duty cycle of the dryer is repeated twice every day.

Constructional parameters of the ware dryer can be taken from **Table 9**:

The resultant demand of the dryer and the exhaust water released are shown in **Fig. 8**, either supplied by natural gas or recovered heat.

3. THEORY/CALCULATION

Since the purpose of the studied processes is to dry ware via evaporation, the key variable at any temperature and relative humidity is the amount of air needed to saturate the atmosphere.

Depending on the heating media and the process, the inlets are as follows:

- NG (mainly CH₄)
- Air for combustion
- Air to dry the humidity by psychrometry
- Moist in the air
- Fumes from kiln recovery (mainly CO₂, H₂O, N₂ and dilution air)
- Water from ware to be evaporated
- Ware and other solids (Carts)
- Cooling air

Table 9
Construction parameters of the ware dryer.

PRODUCTION PARAMETERS OF THE WARE DRYER		
Length	21,520	mm
Wide	11,800	mm
High	2900	mm
“U” enclosure	2.83	w/m ² /°C
Heating transfer surface	332	m ²
Carts number	64	
Pieces per cart	16	
Cart weigh	200	kg
Production	5.00E+05	Pieces/year
Labor days	232	days/year
N ^a cycles	2	cycles/day
Pieces in dryer	1078	pieces in dryer
Wet weigh of piece	23	kg
Dry weigh of piece	20	kg
Initial water content	17.00%	Base húmeda
Water content	3665	kg
Specific heat of cart	0.522	KJ/kg/°C
Specific heat of ware	1.13	KJ/kg/°C
LHV NG	48,000	kJ/kg
Temperature of the hall	25	°C
Humidity in the hall	50.00%	

Table 10
Natural gas consumption in a conventional factory.

Cj/year	PLASTER	RESIN
Q _{ng kiln}	63,692	63,692
Q _{ng dryer}	8347	8347
Q _{ng HVU}	19,358	3210
Q _{ng}	91,397	75,249
Q _{ng absorption}	25,799	6100
Q _{ng water recovery}	117,196	81,349

The outlets are:

- Combustion products (mainly CO₂, H₂O, N₂)
- Air heated and saturated
- Moist within the saturated air
- Ware and other solids (Carts)

Both WD and HVU processes are regulated within specific ranges of temperature and humidity. When the process is led by NG combustion, the regulation of temperature is carried out by adjusting the NG supply and the humidity by fresh dry air. On the other hand, when recovered heat (RH) at 604 K is provided to absorb the humidity, it has to be diluted with fresh air to meet the temperature specification and reduce its relative humidity. External temperature may be higher than that required in the hall. Under such circumstances, there is no need to add NG or recovered heat.

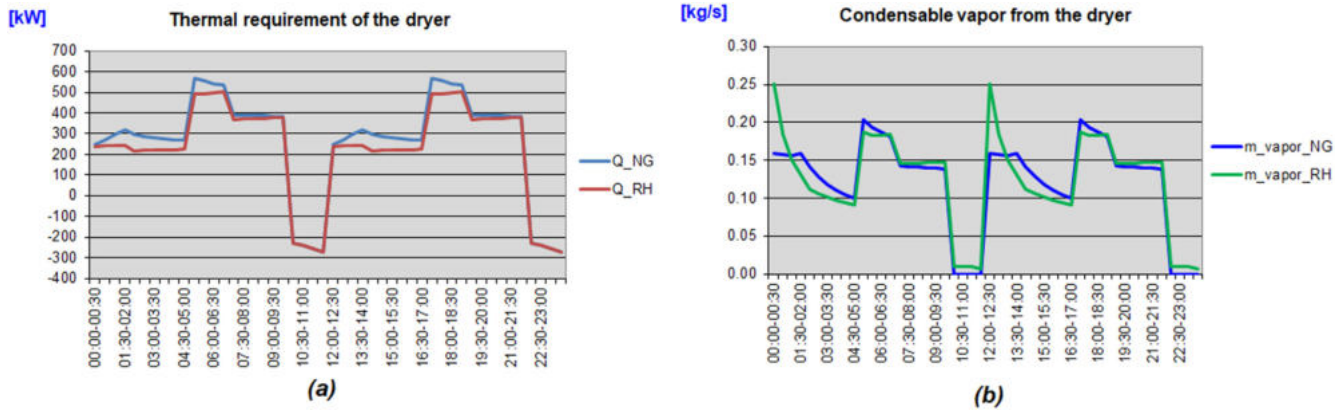


Fig. 8. Thermal demand of the dryer [kW] and potential condensation from exhausting [kg/s]. (a) Thermal required power. (b) condensable water.

Besides, fresh air humidity might be near saturation. In this case, air has to be heated either by NG or RH.

The calculation of the relative composition of this mixture was derived from the system:

$$m_{evaporate} = (x_{IN} - x_{RH}) \cdot (m_{RH} + m_{fresh\ air}); \quad (1)$$

$$x_{IN} = \frac{x_{RH} \cdot m_{RH} + x_{fresh\ air} \cdot m_{afresh\ air}}{m_{RH} + m_{fresh\ air}}. \quad (2)$$

where.

- $m_{evaporate}$ = The amount of water to be evaporated [kg/s]
- x_{IN} = Moisture of the air inside [kg/kg]
- x_{RH} = Moisture of the inlet air (recovered heat) [kg/kg]
- m_{RH} = Mass of recovered heat [kg/s]
- $m_{fresh\ air}$ = Mass of fresh air to dilute RH [kg/s]
- $x_{fresh\ air}$ = Moisture of the fresh air to evaporate water [kg/kg]

Equation (1) comes from the evaporation capability, which corresponds to the difference of humidity in the hall and the blown mixture from the outside (RH in the event of recovered heat). On the other hand, equation (2) represents the water content of the blown mixture.

The system of equations is applied every 30 min to processes within the WD, HVU, and kiln, according to the set-up conditions, the source of the thermal energy, and the type of factory to obtain the thermal requirement in every case. The procedure is repeated 17,520 times during the year with this model.

The single obtained values for thermal loads, fresh air, recovered heat requirements, and condensable masses can be summed up or averaged for the whole year. At this point, a comparison of consumption among the different configurations is feasible and can be calculated as the total amount of NG in a CF versus an OF. For a conventional factory, the amount equals the sum of the kiln, WD, and HVU. Eventually, it is considered alongside the absorption machine as a means to recover condensed water. On the other hand, in the OF, only the kiln has to be considered. Afterwards, the total amount of recovered heat has to be computed to find out whether the kiln is able to supply it. Otherwise, the lack of heat should be supplied by NG.

For a CF without water recovery, all the equipment has to be fueled by natural gas:

$$Q_{NG\ total} = Q_{NG\ kiln} + Q_{NG\ WD} + Q_{NG\ HVU}. \quad (3)$$

where.

- $Q_{NG\ total}$ = NG required to supply thermal demand [kW]
 - $Q_{NG\ kiln}$ = NG required to supply kiln demand [kW]
 - $Q_{NG\ WD}$ = NG required to supply WD demand [kW]
 - $Q_{NG\ HVU}$ = NG required to supply HVU demand [kW]
- For a CF where water is recovered, there is a surplus thermal requirement for the absorption machine:

$$Q_{NG\ total} = Q_{NG\ kiln} + Q_{NG\ WD} + Q_{NG\ HVU} + Q_{NG\ abs}. \quad (4)$$

where.

$Q_{NG\ abs}$ = NG required to supply the absorption machine [kW]

For an OF, in principle, kiln exhausting might be able to supply the rest of the equipment. Otherwise, the difference between their thermal requirement and recovered heat should be supplied with natural gas:

$$Q_{NG\ total} = Q_{NG\ kiln} + Q_{NG\ lack}. \quad (5)$$

where.

$Q_{NG\ lack}$ = NG required to supply thermal demand, which has not been supplied by RH [kW].

On the other hand, the total condensable water from exhausting is calculated by adding all contributions:

$$m_{condensable} = m_{evaporate_dryer} + m_{evaporate_HVU} + m_{cond\ NG/RH} + m_{cond\ fresh\ air}. \quad (6)$$

where.

- $m_{condensable}$ = Total condensable water [kg/s]
- $m_{evaporate_dryer}$ = Water contained in ware in dryer [kg/s]
- $m_{evaporate_HVU}$ = Water contained in ware and molds in casting hall [kg/s]
- $m_{cond\ NG/RH}$ = Moisture from combustion of NG in a CF or from RH in an OF [kg/s]
- $m_{cond\ fresh\ air}$ = Moisture of fresh air utilized for evaporation [kg/s]

All these consumptions have been calculated as per models described by Cuviella-Suárez et al. (2018) and Cuviella-Suárez et al. (2019). Calculation details are provided in Appendix A.

3.1. Sensitivity analysis

A sensitivity analysis was carried out to determine the variability of the main outputs—thermal power required and condensable water—depending on the most influential climate inputs. In this research, ambient temperature and solar radiation were chosen for this purpose. The procedure for the whole year was repeated with different scenarios of either temperature or radiation. The scenarios were simulated by changing the temperature or radiation with a scale coefficient plus a random coefficient, according to

$$X_{sim} = X_{real} \cdot \left(f_{scale} + \frac{f_{random} - 0.5}{10} \right). \quad (7)$$

where,

X_{sim} = Scaled temperature/radiation to assess new outputs [kg/kg]

X_{real} = Real temperature/radiation from National Weather Service [kg/kg]

f_{scale} = Scale coefficient between 0.7 and 1.3 to simulate warmer or cooler climates

f_{random} = Random number between 0 and 1; affected by -0.5 and divided by 10, it obtains a scale deviation of $+ - 0.05$ in pursuit of randomization of climate variations

4. Results

This research aimed to assess the reachable savings of energy and water in a Sanitary ware factory by recovering heat from a kiln to reuse as heating and drying sources in the WD and HVU. The relevant results are those related to NG and water consumptions. The study also considered the amount of recovered heat from kiln exhausting needed to substitute NG in the CF in order to assess the capability of the kiln as heat supplier for the whole system. Another key variable was the amount of fresh air required to evaporate the water, according to environmental humidity. Thus, the considered variables for the calculations were.

- NG consumption, which is computed for the kiln, WD, and HVU in a CF and for the kiln and eventual lack of heat in the WD, HVU, or absorption machine in an OF
- Amount of recovered heat from the kiln to supply WD, HVU, and absorption machine
- Amount of fresh air to add to recovered heat and adjust the thermal requirement in each equipment
- Condensed water from WD and HVU exhausting

The requirements change every 30 min due to climate variations. For the sake of clarity, Figs. 9–12 show the respective averages for the following:

- A plaster mold conventional factory
- A resin mold conventional factory
- A plaster mold optimized factory
- A resin mold optimized factory

4.1. Each of them shows the

- maximum, minimum, and averaged demand for the whole year;
- maximum, minimum, and averaged condensate for every month;

- maximum, minimum, and averaged demand for the whole year; and
- maximum, minimum, and averaged condensate for every month.

The annual values were calculated to assess the error for each. Further, the monthly values permit the assessment of seasonal variability.

Fig. 9(a) shows that the demand is very stable. There is a small difference between the minimum and maximum amounts. It can be seen in (c) that this stability is maintained along the year. This is due to the fact that only the HVU system depends on the climate condition. Fig. 9(b) and (d) refer to condensable water, which depends on the moisture in the ambient air. This effect is repeated for all configurations with more impact on the condensate curves. The evaporation shape of the dryer in these figures, especially in the condensate ones, can be seen.

Fig. 10 shows similar characteristics, with the only difference being the total amount due to the fact that water from the mold is evaporated only in the plaster factory and not in the resin mold factory. For other consumptions, there is no difference. The shape of the curve is also different since there are two periods of operation for HVU in a plaster factory. At night, there is a surplus of thermal requirement to dry the mold and more evaporated water. Hence, there is a valley between 6 h and 14 h, during which time only water from the ware is extracted. Again, the evaporation peaks of the dryer can be seen in the condensate graphs.

Fig. 11 presents a flat in the middle of the day. This is explained by the recovered heat, which is enough to feed both the dryer and HVU without NG. Thus, only the kiln has to be supplied. Since the plaster molds require the water to be evaporated at night, there is extra heat from NG to be supplied to the HVU. However, the condensed water is about a half of the plaster factory because of water from plaster molds and water from the ambient air. More evaporated water means that more fresh air will be blown and, hence, more moisture introduced into the system.

Fig. 12 is particularly interesting since the thermal demand is absolutely flat. This means that only kiln has to be supplied with NG for the whole year. The dryer and HVU can be supplied with recovered heat at any time all year long.

5. Discussion

Based on the annual calculations, the following table of results was obtained from Tables A10 and A11 in Appendix A.

$Q_{ng \text{ kiln}}$, $Q_{ng \text{ dryer}}$, and $Q_{ng \text{ HVU}}$ are the energies for one year consumed by the kiln, dryer, and HVU, respectively, and Q_{ng} is the total amount of energy consumed. When an absorption machine is added to recover water, $Q_{ng \text{ absorption}}$ is the thermal requirement for NG. $Q_{ng \text{ water recovery}}$ is the total NG energy required for all facilities. Thermal requirement is 21% greater in a plaster mold factory than in a resin mold factory because of the water extracted from molds. When water is recovered, a surplus of energy has to be added, 28% in a plaster mold factory and 8% in a resin mold factory. Again, this significant difference is due to the water evaporated and, subsequently, condensed. In this research, thermal energy had to be supplied to recover the evaporated water, which is in contrast to Gao et al.'s (2019) research, wherein the purpose of the condensation was to recover its latent heat. In this sense, the present research is more aligned with Amón et al. (2015), who produced the steam from tomato desiccation and then recovered both heat and water. However, in that study, the vapor was profited into a subsequent process rather than used to recover fresh water to feed back as raw material. On the other hand, Liew et al. (2014) profited the sensible heat of the absorber cycle of the absorption machine to

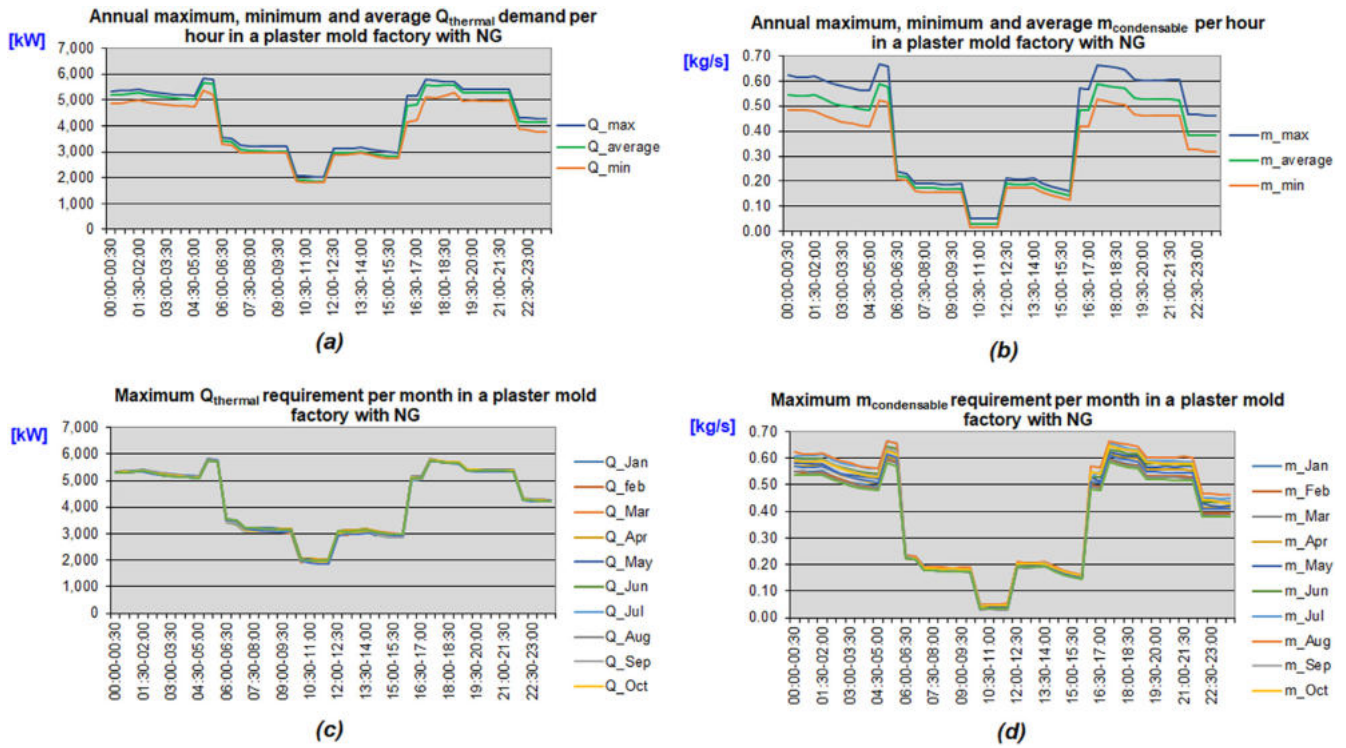


Fig. 9. Required thermal power and condensable water in a plaster mold CF. (a) annual max, min and averaged power. (b) annual max, min and averaged condensable humidity. (c) maximum required power every month. (d) maximum condensable water every month.

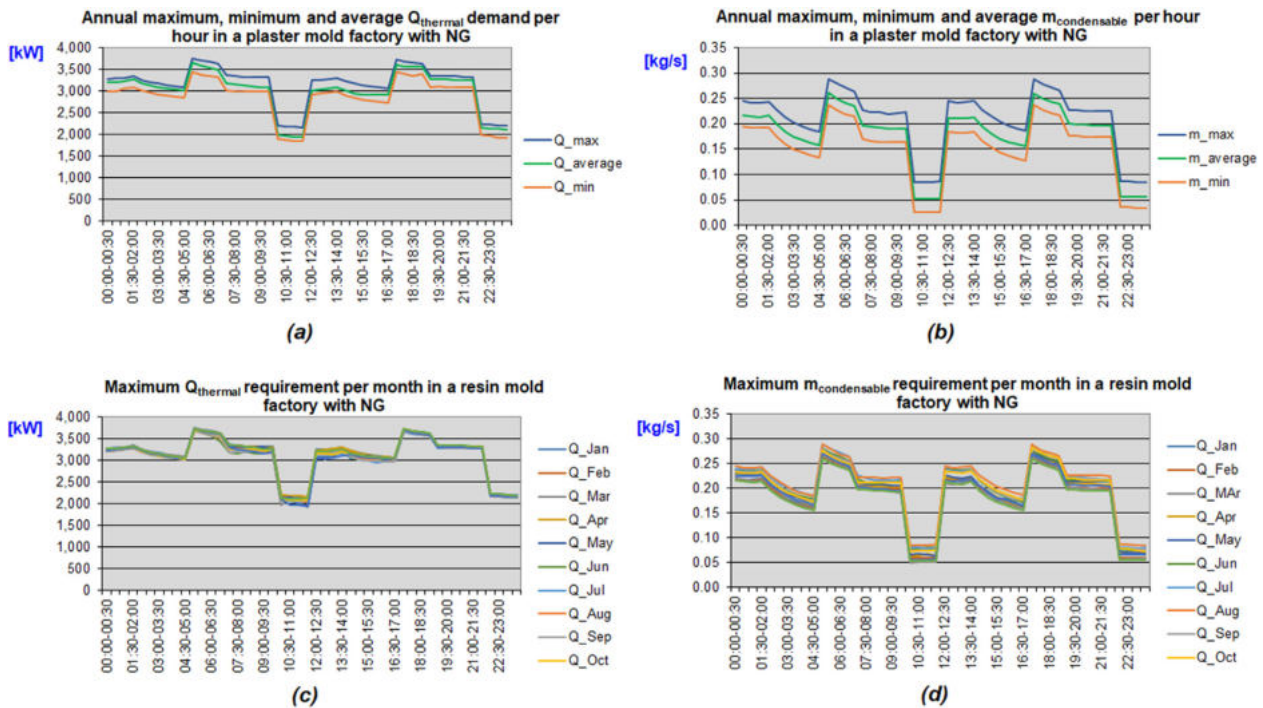


Fig. 10. Required thermal power and condensable water in a resin mold CF. (a) annual max, min and averaged power. (b) annual max, min and averaged condensable humidity. (c) maximum required power every month. (d) maximum condensable water every month.

preheat the air blown into dryer and HVU. This resulted in an energy saving surplus to reduce their fuel requirements (Table 10).

Regarding water recovery, Table 11 shows the water that can be obtained from the exhausting flows (Table 12).

Condensable water in a dryer, HVU, and the total is represented by m_{cond} dryer, m_{cond} HVU, m_{cond} total respectively. Regarding recoverable water, the difference is due to the water eliminated through mold flushing in a resin factory. Recoverable water via

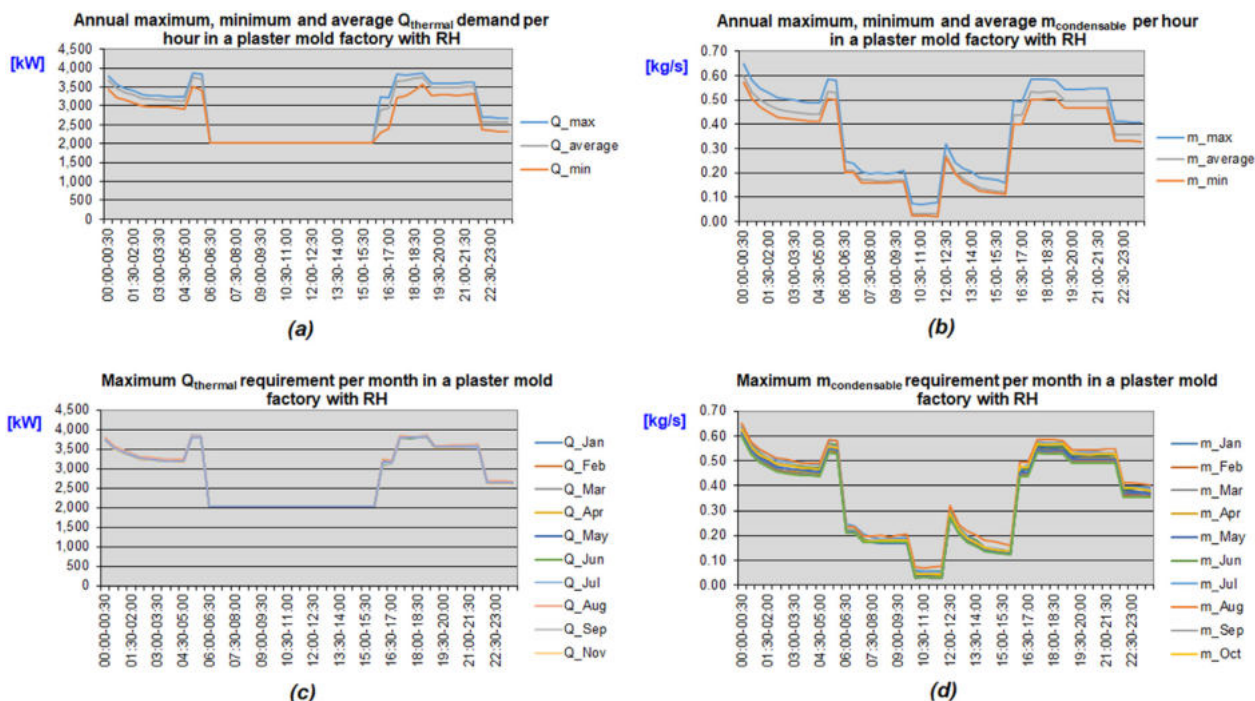


Fig. 11. Required thermal power and condensable water in a plaster mold OF. (a) annual max, min and averaged power. (b) annual max, min and averaged condensable humidity. (c) maximum required power every month. (d) maximum condensable water every month.

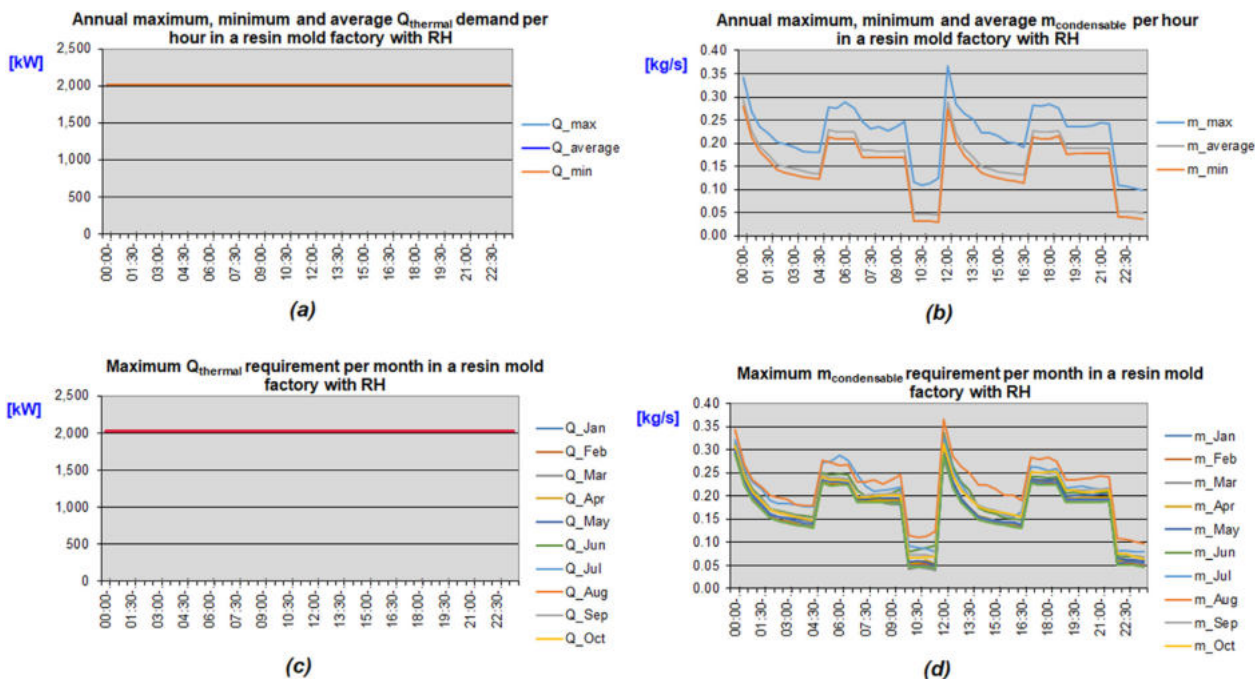


Fig. 12. Required thermal power and condensable water in a resin mold OF. (a) annual max, min and averaged power. (b) annual max, min and averaged condensable humidity. (c) maximum required power every month. (d) maximum condensable water every month.

Table 11
Recoverable water from dryer and HVU exhaust in a conventional factory.

t/year	PLASTER	RESIN
m _{cond} dryer	3868	3868
m _{cond} HVU	7494	1733
m _{cond} Total	11,362	5601

condensation in a plaster mold factory is double the water in a resin factory. When compared with Table 5, it can be seen that quantities are greater than those corresponding to the water strictly arising from slip, which is 4812 m³/year. This difference lies in the water coming from the ambient moisture. It is remarkably greater in the plaster factory due to the amount of ambient air blown to evaporate the water out. In this sense, this research seems to form the

Table 12
Natural gas consumption in an optimized factory.

Gj/year	PLASTER	RESIN
Q _{ng} kiln	63,692	63,692
Q _{RH}	52,968	52,968
Q _{demand} dryer	7254	7254
Q _{condensable} dryer	9250	9250
Q _{absorption} dryer	13,214	13,214
Q _{demand} HVU	14,191	2285
Q _{condensable} HVU	16,166	3083
Q _{absorption} HVU	23,094	4404
Q _{ng} dryer	0	0
Q _{ng} HVU	1	0
Q _{ng} abs	23,395	0
Q _{leftover}	11,179	21,861
Q _{ng} total	87,088	63,692

Table 13
Water and exhausting masses in an optimized factory.

t/year	PLASTER	RESIN
m _{RH} kiln	135,980	135,980
m _{RH} dryer	27,018	27,018
m _{fresh} dryer	42,268	42,268
m _{condensable} dryer	3905	3905
m _{RH} left for HVU	108,962	108,962
m _{RH} HVU	47,113	7610
m _{fresh} HVU	99,018	55,225
m _{condensable} HVU	6710	1262
m _{RH} left for Abs	61,852	101,352
m _{RH} need abs	93,213	45,229
m _{RH} Abs	33,153	45,229
m _{RH} leftover	28,699	56,123
m _{fresh} demand	141,286	97,493
m _{condensable}	10,615	5167

Table 14
Real consumptions of assessed real plants.

	PRODUCTION	NG	WATER
	t/year	GJ/kg	kg/kg _{product}
Research Estimation (Plaster) =	10,000	89.38	3.08
Research Estimation (Resin) =	10,000	52.69	3.08
Plant 1 =	10,000	108	–
Plant 2 =	5120	79.2	–
Plant 3 =	2900	100.8	–
Plant 4 =		47.16	15.60

perspective of the vapor latent heat to fuel the absorption machine (Lamine and Said, 2014). However, the vapor in that study is a product during the process. In this research, by contrast, it is a residue, which is aimed to be profited. More aligned with this research, there are studies by Guz, and Karen (2005), Licina and Sekhar (2012), Suárez and Riera (2015), and Algarni et al. (2018), where the resultant condensates from air conditioning are profited as water to be reused. However, the water in these studies is already in a liquid form. On the contrary, the vapor in the current study has to be condensed before being reused.

Q_{RH} represents the energy recovered from kiln exhausting, Q_{demand} dryer and Q_{demand} HVU are the energies required to carry out these processes, either with NG or RH. Q_{condensable} dryer and Q_{condensable} HVU are the energies delivered by condensing vapors contained in dryer and HVU exhausting flows, respectively. This research considered the water from flows through dryer and HVU. Nevertheless, there is a residual amount of energy and moisture within the exhausting of the generator at the absorption cycle. There is still an opportunity to try to recover some energy and

water from this flow, as done in Xiong et al. (2017), where a ceramic matrix was proposed to recover both energy and water from an exhausting flow. In this sense, Eades (2018) proposed taking relatively cold condensates from air handling units to precool and dehumidify inlet air. Thus, the required energy at the air handling unit would be decreased. Regarding this research, the water condensed outlet was at a relative low temperature, potentially lower than the ambient. In such cases, it could be profited as a cooler agent before being recovered as fresh water. Q_{absorption} dryer and Q_{absorption} HVU are the thermal energies required by the absorption machine to condensate vapors. Q_{ng} dryer and Q_{ng} HVU Q_{ng} abs and Q_{ng} total are the energies supplied by NG to each equipment, when there is a lack of recovered heat. Q_{leftover} represents the amount of energy from RH that is not used. There are periods when thermal requirement is low (summer, midday) and, therefore, there is a leftover of recovered heat that can be stored for other periods (winter, night) when there is a lack of it and NG consumption is raised. Recovered heat can supply a dryer for a whole year as well as the HVU in a plaster mold factory and resin mold factory. When water is recovered, the absorption machine can be supplied with recovered heat as well. However, in a plaster mold factory, NG is required to reach the heat demand due to excess vapor to condensate. Total consumption of NG is 37% greater in a plaster mold OF.

m_{RH} kiln denotes the available amount of recovered heat. m_{RH} dryer and m_{RH} HVU are the amounts of recovered heat consumed by both the dryer and HVU. m_{fresh} dryer and m_{fresh} HVU are the amounts of fresh air required in a dryer and HVU to carry the evaporated water. m_{condensable} dryer and m_{condensable} HVU are the types of water contained in dryer and HVU exhausting flows, respectively.

A calculation was carried out by feeding RH to the dryer, then the HVU, and finally to the absorption machine. Hence, the m_{RH} left for abs and m_{RH} abs. m_{RH} leftover is the amount of recovered heat that cannot be used within these processes. m_{fresh} demand and m_{condensable} are the total fresh air required to adjust the temperature of recovered heat to meet the process specification and the total water to be condensed, respectively. It is important to note that the actual use of RH for the absorption process (m_{RH} abs) is less than the required amount (m_{RH} leftover) for the whole year. The explanation lies in the fact that there are periods when there is excess RH that is not needed for absorption. The possible storage of heat from periods of excess, to be consumed during periods of lack, would reduce the NG required for absorption. Again, condensable water potential is doubled in a plaster factory. All these data are compared in Fig. 13.

In summary, we can calculate the NG savings from a CF, where no water is recovered, up to an OF with recovered heat and water. The required amount of water for ware manufacturing is calculated in Tables 3 and 4:

$$m_{process\ water} = 5 \cdot 10^5 \frac{pieces}{year} \cdot 9.62 \cdot \frac{kg_{water}}{piece} = 4,810 \frac{t_{water}}{year} \quad (8)$$

To summarize the savings, the compared results for CF and OF are as follows:

The plaster mold conventional factory requires 91,397 GJ of NG and does not recover any evaporated water. When water is condensed via absorption, the energy rises up to 117,196 GJ and recovers 11,362 t of water. Optimization of the factory reduces the consumption up to 87,088 GJ and recovers 10,615 t of water. Savings yield 25.7% reduction in NG and more than double of required process water. Besides, there is an excess recovered heat of 11,179 GJ available for other processes.

The same reasoning for the resin factory leads to 75,249 GJ with no water recovery and up to 81,349 GJ after adding the absorption

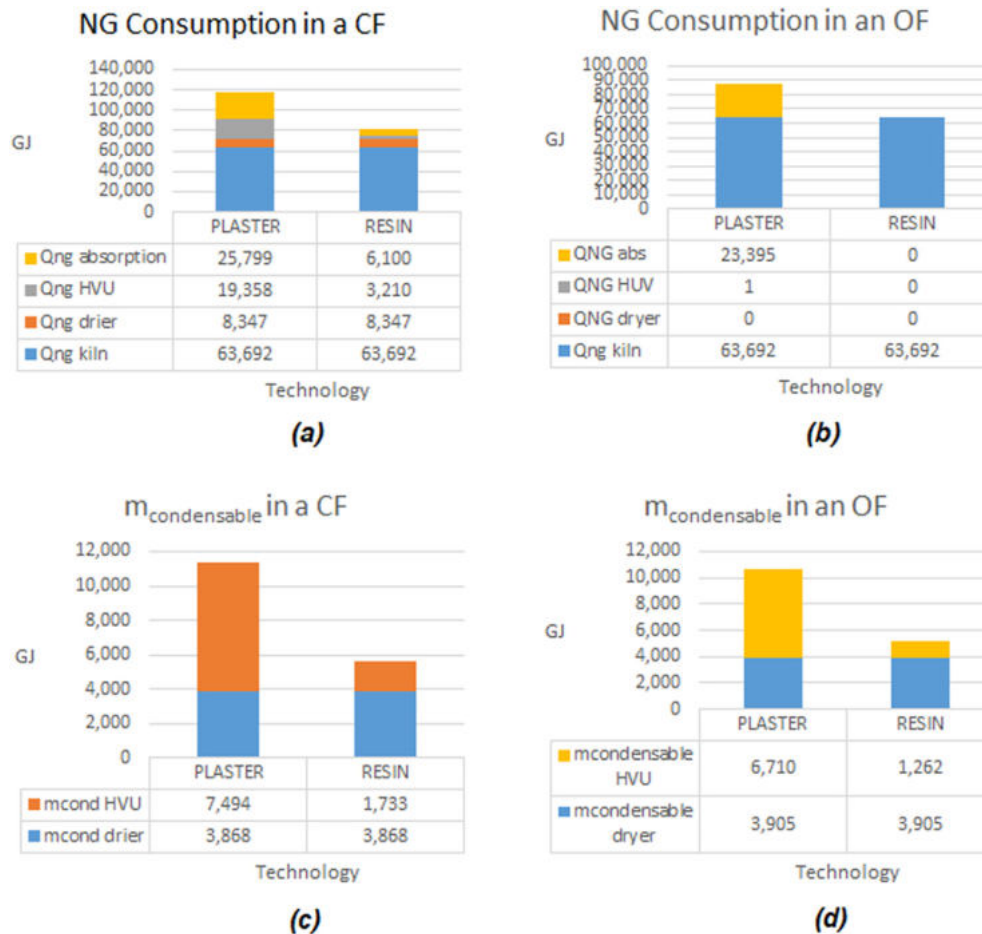


Fig. 13. Results for the different configurations of the case study plant. (a) NG consumption in a CF. (b) NG consumption in an OF. (c) condensable water in a CF. (d) condensable water in an OF.

machine to recover 5601 t. OF consumption is 63,692 GJ to recover 5167 t, which means 21.7% NG reduction and water recovered to supply the whole annual process requirement. In this case, the leftover recovered heat equals 21,861 GJ, which can be put to other uses.

After reviewing the results, this practice is suggested as a regular action to save energy other than water. It may be added to specialized literature regarding summaries of recovery heat uses Brückner et al. (2015); or Agrafiotis and Tsoutsos (2001).

The objective of the study was to recover 4.810 t/year of evaporated water, and it has been demonstrated how the recovered water was greater in every tried configuration. This result indicates that this action can be regarded a standard measure to save water; this has been done in some regions Guz & Karen (2005) and has become an obligation for new buildings.

Though no empirical observation was carried out, the research estimates have been compared with real consumptions in four existing factories. Three of them are described in Lecomte (n.d.) and the fourth one in Lv et al. (2019).

As stated by van Vugt et al. (2019), computation modelling allows for predicting the amount of water that can be saved by comparing it with the required modelled water; this is consistent with the real measurements. Hybrid simulation has established the validation of the model to conclude that it is appropriate to set the amount of water that is possible to condense and save.

5.1. Sensitivity analysis

Fig. 14 shows the curves of sensitivity analysis of Q_{ng} and $m_{condensable}$ for $T_{ambient}$. In (a) and (b) it can be seen that Q_{ng} presents a minimum about 0.85 T due to fresh air requirement. When temperature is low, there is a greater requirement of heat to warm up the air. When temperature rises, required power decreases, while the water contained in fresh air increases because relative humidity has not been changed. This factor becomes more important as the temperature increases up the point when absorption requirement overtakes the rest of demands, making the global power rise up.

As expected, resin factory shows curves with less thermal power required, as well as less condensable humidity.

When fresh air temperature overcomes the required temperature in the system, it is not possible to achieve the set point. On the other hand, when relative humidity is high, it happens that required fresh air is almost saturated. The combination of both effects produces a huge amount of air to be blown. Hence, power and condensates start to increase abruptly.

Fig. 15 shows the sensitivity analysis curves of Q_{ng} and $m_{condensable}$ for I_{solar} . When radiation is varied to maintain the temperature, there is less power required. This means that less water enters the system from either combustion air or recovered heat. Thus, both curves decrease in both factory types. For the resin mold OF, it has already been said that only power for the kiln is required. Hence, the curve is flat as the kiln requirement has nothing to do

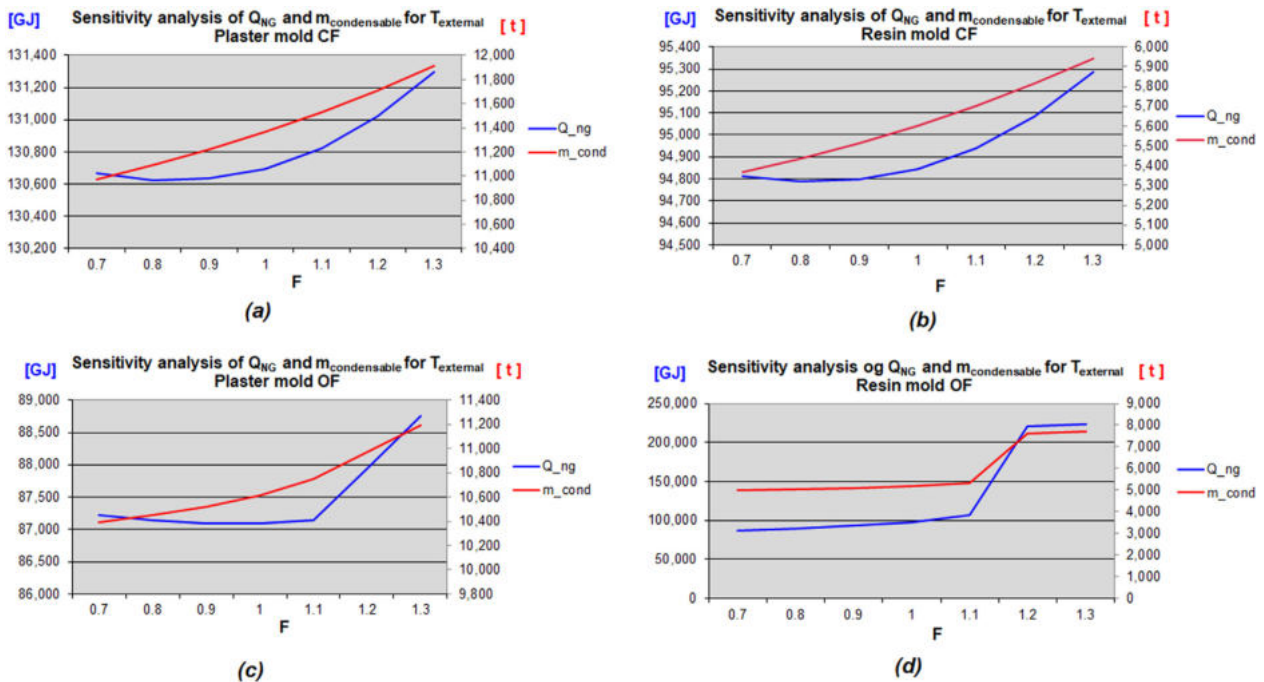


Fig. 14. Sensitivity analysis of Q_{NG} and $m_{condensable}$ for $T_{ambient}$ for the different configurations of the case study. (a) plaster mold CF. (b) resin mold CF. (c) plaster mold OF. (d) resin mold OF.

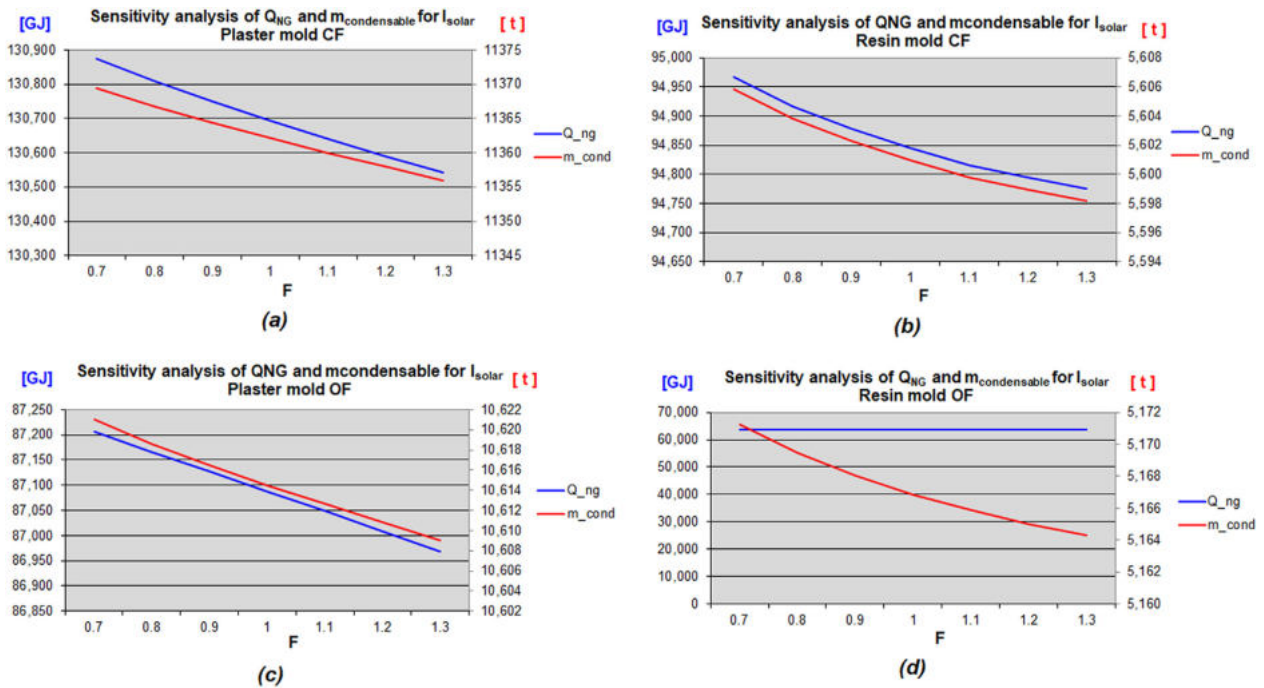


Fig. 15. Sensitivity analysis of Q_{NG} and $m_{condensable}$ for I_{solar} for the different configurations of the case study. (a) plaster mold CF. (b) resin mold CF. (c) plaster mold OF. (d) resin mold OF.

with external conditions.

6. Conclusion

The research aimed to suggest and demonstrate the reduction of energy and water consumption and emissions in a Sanitary ware factory to make the sector more sustainable. It has shown how to

link equipment from the thermal point of view to optimize consumption of the primary energy. Water reduction implies an increase in energy due to the presence of a thermal requirement. However, when this energy is taken from heat recovery, the global energy can be significantly reduced up to 27%.

This research provides a practical tool to optimize sanitary ware facilities to improve their efficiency. Energy consumption can be

reduced by over 25%, and water from raw materials can be totally recovered, which represents up to 24% of the total water required through the global process of a factory in the case of plaster molds. CO₂ and natural gas get proportionally reduced. With less fuel burnt, less CO₂ is emitted.

The general concept of saving natural gas by recovering heat has been proved to work for any configuration, regardless of the extra heat in an absorption machine. This proves that the model is appropriate for the focus of this research.

In pursuit of IR₃, this research contributes to the search of zero water discharge in the sanitary-ware industry and the boost in energy efficiency. As mentioned above, water recovery policies may become standard by local or national regulations. This research has this future in mind.

Nevertheless, some limitations of the present study and recommendations for future studies should be considered.

This study made use of only the tunnel kiln despite the shuttle kiln being a common solution to repair ware in the second fire. The exhausting of this kiln can be added to obtain more thermal savings.

The scope of this research was limited to resource savings. It would be worth studying the economic impact of an investment in achieving reductions, considering the increasing price of water, which is becoming a scarce resource.

This research has not considered renewable energies that can be applied to improve the global efficiency of the factory.

This research was focused on the Sanitary ware industry; future research may apply the findings to any sector where a combination of recovered heat and moist exhausting is achievable.

A sensitivity analysis was performed for temperature and radiation. It is advisable to carry out a combined multivariable analysis that includes humidity in the future.

Modelling processes and thermal engineering have been applied to show the potential for saving as well as to identify and quantify the equipment more likely to reduce energy. In this regard, the present research contributes to improving the sustainability of the sanitary ware industry by modelling factories and quantifying their savings of thermal energy and water.

Sustainability is presently a key consideration when designing manufacturing plants. Hence, resource consumption, environmental impact, and the way both concepts are linked for cleaner production should be taken into account in any industrial and economic decision regarding manufacturing facilities. This research was aimed at supporting such an effort.

CRedit authorship contribution statement

Carlos Cuviella-Suárez: Data curation, Writing – original draft, Simulation. **Antonio Colmenar-Santos:** Conceptualization, Methodology, Writing – review & editing. **David Borge-Diez:** Conceptualization, Writing – review & editing. **África López-Rey:** Supervision, Writing – review & editing.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.



Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126049>.

References

- Abd El-Salam, M.M., El-Naggar, H.M., 2010. In-plant control for water minimization and wastewater reuse: a case study in pasta plants of Alexandria Flour Mills and Bakeries Company, Egypt. *J. Clean. Prod.* 18, 1403–1412. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.05.006>.
- Agrafiotis, C., Tsoutsos, T., 2001. Energy saving technologies in the European ceramic sector: a systematic review. *Appl. Therm. Eng.* 21, 1231–1249. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(01\)00006-0](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(01)00006-0).
- Algarni, S., Saleel, C.A., Mujeebu, M.A., 2018. Air-conditioning condensate recovery and applications—current developments and challenges ahead. *Sustain. Cities Soc.* 37, 263–274. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.11.032>.
- Amón, R., Maulhardt, M., Wong, T., Kazama, D., Simmons, C.W., 2015. Waste heat and water recovery opportunities in California tomato paste processing. *Appl. Therm. Eng.* 78, 525–532. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.11.081>.
- Bayon, L.L.E., Ballesteros, F.C., Garcia-Segura, S., Lu, M.-C., 2019. Water reuse nexus with resource recovery: on the fluidized-bed homogeneous crystallization of copper and phosphate from semiconductor wastewater. *J. Clean. Prod.* 236, 117705. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117705>.
- Brailsford, S.C., Eldabi, T., Kunc, M., Mustafee, N., Osorio, A.F., 2019. Hybrid simulation modelling in operational research: a state-of-the-art review. *Eur. J. Oper. Res.* 278, 721–737. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.10.025>.
- Brückner, S., Liu, S., Miró, L., Radspieler, M., Cabeza, L.F., Lävemann, E., 2015. Industrial waste heat recovery technologies: an economic analysis of heat transformation technologies. *Appl. Energy* 151, 157–167. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.147>.
- Ceramic Technology Sanitary-Ware, 2010th ed, 2010. SACMI IMOLA S.C.
- Christ, K.L., Burritt, R.L., 2013 February 1. Environmental management accounting: the significance of contingent variables for adoption. *J. Clean. Prod.* 41, 163–173. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.007>.
- Christ, K.L., Burritt, R.L., 2017. Water management accounting: a framework for corporate practice. *J. Clean. Prod.* 152, 379–386. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.147>.
- Cuviella-Suárez, C., Colmenar-Santos, A., Borge-Diez, D., López-Rey, Á., 2019. Heat recovery in sanitary-ware industry applied to water and energy saving by multi-effect distillation. *J. Clean. Prod.* 213, 1322–1336. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.269>.
- Cuviella-Suárez, C., Colmenar-Santos, A., Borge-Diez, D., López-Rey, Á., 2018. Management tool to optimize energy and water consumption in the sanitary-ware industry. *J. Clean. Prod.* 197 (1), 280–296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.195>.
- da Silva, A.C., Méxas, M.P., Quelhas, O.L.G., 2017. Restrictive factors in implementation of clean technologies in red ceramic industries. *J. Clean. Prod.* 168, 441–451. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.086>.
- Delpéch, B., Axcell, B., Jouhara, H., 2019. Experimental investigation of a radiative heat pipe for waste heat recovery in a ceramics kiln. *Energy* 170, 636–651. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.133>.
- Delpéch, B., Axcell, B., Jouhara, H., 2017. A review on waste heat recovery from exhaust in the ceramics industry. *E3S Web Conf.* 22, 00034 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172200034>.
- Delpéch, B., Milani, M., Montorsi, L., Boscardin, D., Chauhan, A., Almahmoud, S., Axcell, B., Jouhara, H., 2018. Energy efficiency enhancement and waste heat recovery in industrial processes by means of the heat pipe technology: case of the ceramic industry. *Energy* 158, 656–665. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.041>.
- Dubreuil, A., Assoumou, E., Bouckaert, S., Selosse, S., Maïzi, N., 2013. Water modeling in an energy optimization framework – the water-scarce middle east context. *Appl. Energy, Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems* 101, 268–279. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.032>.
- Eades, W.G., 2018. Energy and water recovery using air-handling unit condensate from laboratory HVAC systems. *Sustain. Cities Soc.* 42, 162–175. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.07.006>.
- Egilegor, B., Jouhara, H., Zuazua, J., Al-Mansour, F., Plesnik, K., Montorsi, L., Manzini, L., 2020. ETEKINA: analysis of the potential for waste heat recovery in three sectors: aluminium low pressure die casting, steel sector and ceramic tiles manufacturing sector. *Int. J. Thermofluids* 1–2, 100002. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2019.100002>.
- Gao, D., Li, Z., Zhang, H., Zhang, J., Chen, H., Fu, H., 2019. Moisture recovery from gas-fired boiler exhaust using membrane module array. *J. Clean. Prod.* 231, 1110–1121. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.320>.
- Guz, Karen, 2005. Sustainability: condensate water recovery. *ASHRAE J.* 47 (No6), 54–56.
- Huazhe, J., Shufei, W., Yixuan, Y., Xinming, C., 2019. Water recovery improvement by shearing of gravity-thickened tailings for cemented paste backfill. *J. Clean. Prod.* 118882. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118882>.
- Jouhara, H., Khordehghah, N., Almahmoud, S., Delpéch, B., Chauhan, A., Tassou, S.A., 2018. Waste heat recovery technologies and applications. *Therm. Sci. Eng. Prog.* 6, 268–289. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.04.017>.
- Lamine, C.M., Said, Z., 2014. Energy analysis of single effect absorption chiller (LiBr/H₂O) in an industrial manufacturing of detergent. *Energy Procedia, Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability (TMREES14 – EUMISD)* 50, 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.013>.
- Lecomte, T., n.d. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large

- Combustion Plants - Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control) 986.
- Licina, D., Sekhar, C., 2012. Energy and water conservation from air handling unit condensate in hot and humid climates. *Energy Build.* 45, 257–263. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.016>.
- Liew, P.Y., Wan Alwi, S.R., Lim, J.S., Varbanov, P.S., Klemeš, J.J., Abdul Manan, Z., 2014. Total Site Heat Integration incorporating the water sensible heat. *J. Clean. Prod.*, Emerging industrial processes for water management 77, 94–104. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.047>.
- Lv, J., Gu, F., Zhang, W., Guo, J., 2019. Life cycle assessment and life cycle costing of sanitary ware manufacturing: a case study in China. *J. Clean. Prod.* 238, 117938. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117938>.
- Mezquita, A., Boix, J., Monfort, E., Mallol, G., 2014. Energy saving in ceramic tile kilns: cooling gas heat recovery. *Appl. Therm. Eng.* 65, 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.01.002>.
- Mezquita, A., Monfort, E., Ferrer, S., Gabaldón-Estevan, D., 2017. How to reduce energy and water consumption in the preparation of raw materials for ceramic tile manufacturing: dry versus wet route. *J. Clean. Prod.* <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.082>.
- Milani, M., Montorsi, L., Stefani, M., Saponelli, R., Lizzano, M., 2017. Numerical analysis of an entire ceramic kiln under actual operating conditions for the energy efficiency improvement. *J. Environ. Manage., Environmental management as a pillar for sustainable development* 203, 1026–1037. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.076>.
- Monfort, E., Mezquita, A., Vaquer, E., Celades, I., Sanfelix, V., Escrig, A., 2014. Ceramic manufacturing processes: energy, environmental, and occupational health issues. In: Hashmi, S., Batalha, G.F., Van Tyne, C.J., Yilbas, B. (Eds.), *Comprehensive Materials Processing*. Elsevier, Oxford, pp. 71–102. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00809-8>.
- Nabavi-Pelesaraei, A., Rafiee, S., Mohtasebi, S.S., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Chau, K., 2019. Comprehensive model of energy, environmental impacts and economic in rice milling factories by coupling adaptive neuro-fuzzy inference system and life cycle assessment. *J. Clean. Prod.* 217, 742–756. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.228>.
- Nabavi-Pelesaraei, A., Shaker-Kouhi, S., Dehpour, M., 2013. Modeling and optimization of energy inputs and greenhouse gas emissions for eggplant production using artificial neural network and multi-objective genetic algorithm. *Int. J. Adv. Biol. Biomed. Res.* 1478–1489.
- Onishi, V.C., Ruiz-Femenia, R., Salcedo-Díaz, R., Carrero-Parreño, A., Reyes-Labarta, J.A., Fraga, E.S., Caballero, J.A., 2017. Process optimization for zero-liquid discharge desalination of shale gas flowback water under uncertainty. *J. Clean. Prod.* 164, 1219–1238. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.243>.
- Ros-Dosdá, T., Fullana-i-Palmer, P., Mezquita, A., Masoni, P., Monfort, E., 2018. How can the European ceramic tile industry meet the EU's low-carbon targets? A life cycle perspective. *J. Clean. Prod.* 199, 554–564. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.176>.
- Silvestri, L., Forcina, A., Silvestri, C., Ioppolo, G., 2020. Life cycle assessment of sanitaryware production: a case study in Italy. *J. Clean. Prod.* 251, 119708. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119708>.
- Suárez, A., Riera, F.A., 2015. Production of high-quality water by reverse osmosis of milk dairy condensates. *J. Ind. Eng. Chem.* 21, 1340–1349. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.06.004>.
- Urbaniec, K., Mikulčić, H., Duić, N., Lozano, R., 2016. Sdewes 2014 – sustainable development of energy, water and environment systems. *J. Clean. Prod.*, special. SDEWES 2014 - Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems 130, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.062>.
- van Vugt, M., Moye, A., Sivakumar, S., 2019. Computational modelling approaches to meditation research: why should we care? *Curr. Opin. Psychol.*, Mindfulness 28, 49–53. <https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2018.10.011>.
- Wang, X.Y., 2018. Comparative study on energy saving of low-carbon materials in sanitary ware development. *Mater. Sci. Forum.* <http://10.4028/www.scientific.net/MSF.917.289> [WWW Document].
- Woolley, E., Luo, Y., Simeone, A., 2018. Industrial waste heat recovery: a systematic approach. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 29, 50–59. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.07.001>.
- Xiong, Y., Tan, H., Wang, Y., Xu, W., Mikulčić, H., Duić, N., 2017. Pilot-scale study on water and latent heat recovery from flue gas using fluorine plastic heat exchangers. *J. Clean. Prod.* 161, 1416–1422. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.081>.

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 214 de 231

ANEXO IX: “Reduction of Water and Energy Consumption in Sanitary-Ware industry by Absorption Machine Operated with Recovered Heat”. CERTIFICADO DE PUBLICACIÓN



Journal Of Cleaner Production

Certificate of publication for the article titled:

"Reduction of water and energy consumption in the sanitary ware industry by an absorption machine operated with recovered heat"

Authored by:

C. Cuviella-Suárez



A. Colmenar-Santos, D. Borge-Díez

Published in:

2021, Volume 292, Pages 126049

Serial number: PR-270919-A0BD98EDD052



 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 215 de 231

ANEXO X: “Reduction of Water and Energy Consumption in Sanitary-Ware industry by Absorption Machine Operated with Recovered Heat”. FACTOR DE IMPACTO



Journal of Cleaner Production

Country

[Netherlands](#) -  SCIMAGO INSTITUTIONS RANKINGS

173

Subject Area and Category

[Business, Management and Accounting Strategy and Management](#)

[Energy Renewable Energy, Sustainability and the Environment](#)

[Engineering Industrial and Manufacturing Engineering](#)

[Environmental Science Environmental Science \(miscellaneous\)](#)

H Index

Publisher

[Elsevier Ltd.](#)

Publication type

Journals

ISSN

09596526, 18791786

Coverage

1993-2020

Scope

The Journal of Cleaner Production is an international, transdisciplinary journal focusing on Cleaner Production, Environmental, and Sustainability research and practice. Through our published articles, we aim at helping societies become more sustainable. 'Cleaner Production' is a concept that aims at preventing the production of waste, while increasing efficiencies in the uses of energy, water, resources, and human capital. The Journal of Cleaner Production serves as a platform for addressing and discussing theoretical and practical cleaner production, encompassing environmental, and sustainability issues in corporations, governments, education institutions, regions, and societies. Subject areas include, but are not limited to: -Cleaner production and technical processes -Sustainable Development and Sustainability -Sustainable Consumption -Environmental and sustainability assessment - Sustainable Products and Services -Corporate sustainability and Corporate Social Responsibility -Education for Sustainable Development -Governance, legislation, and policy for sustainability



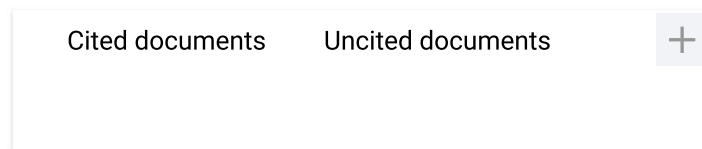
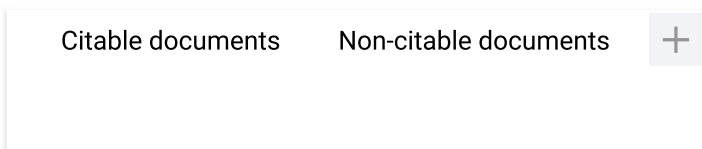
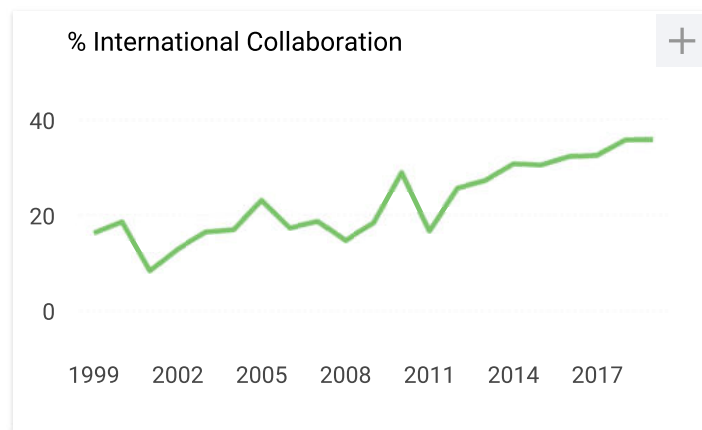
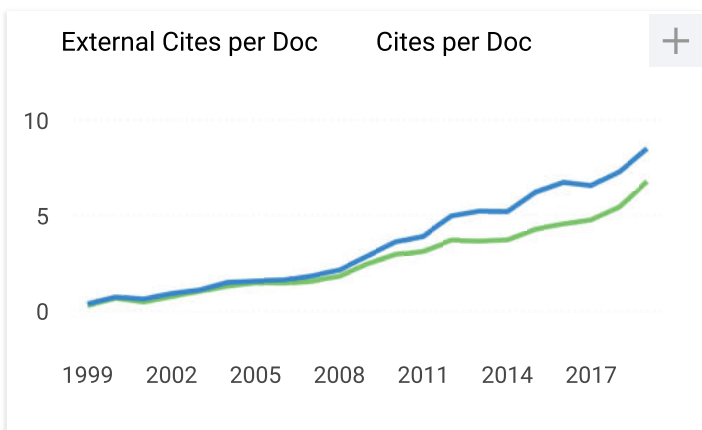
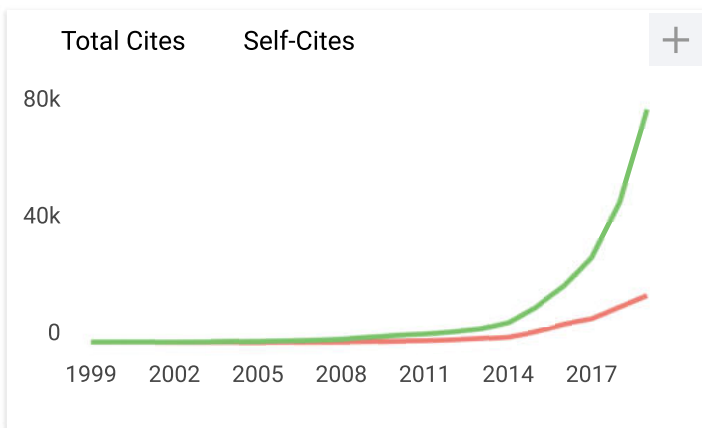
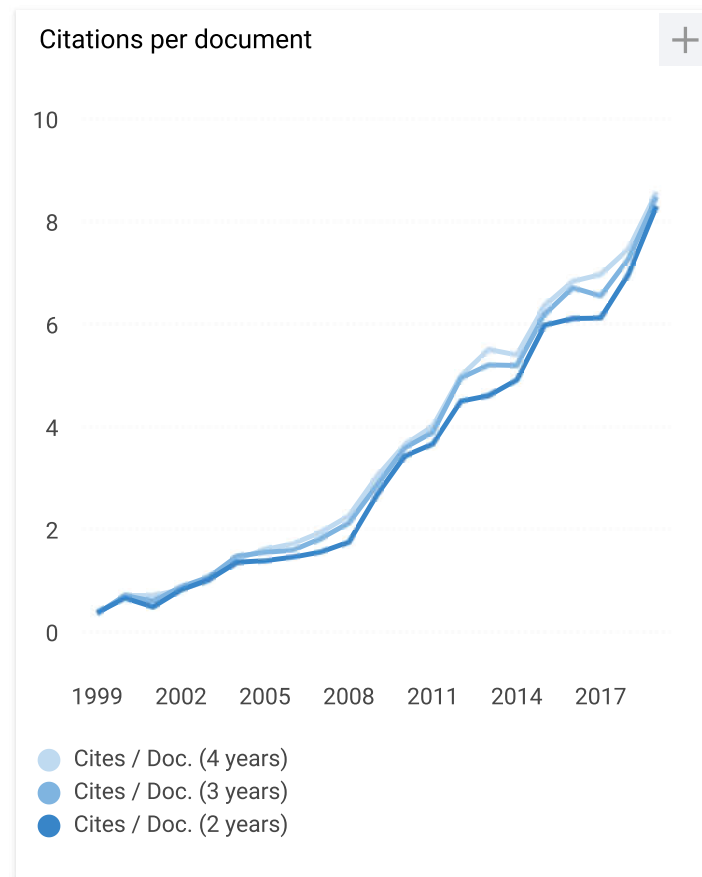
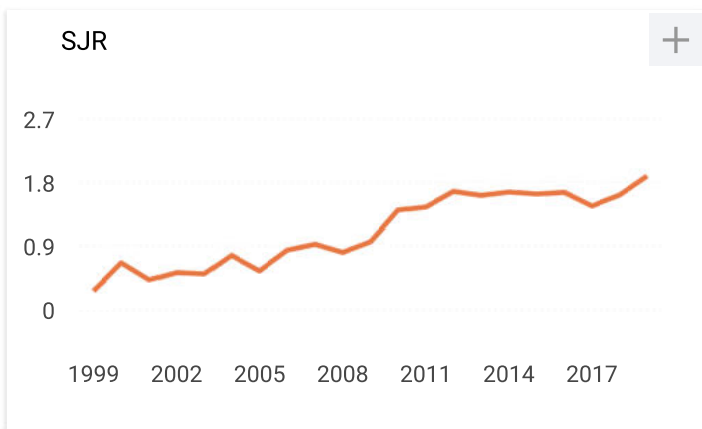
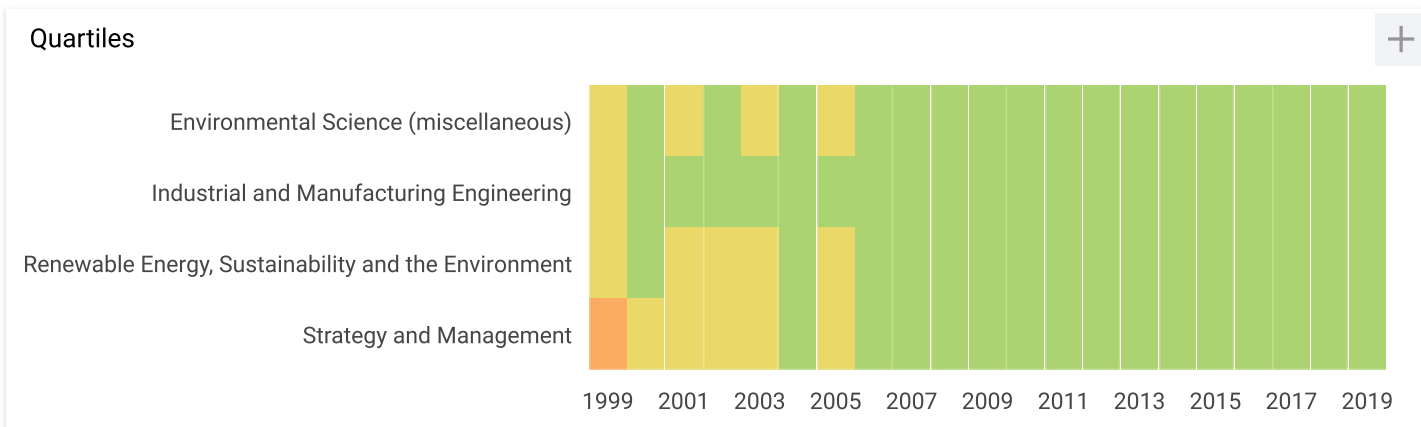
[Homepage](#)

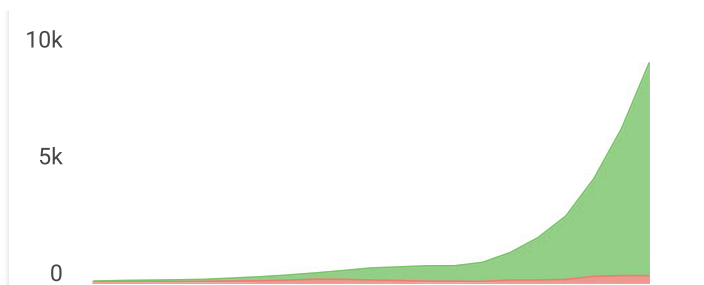
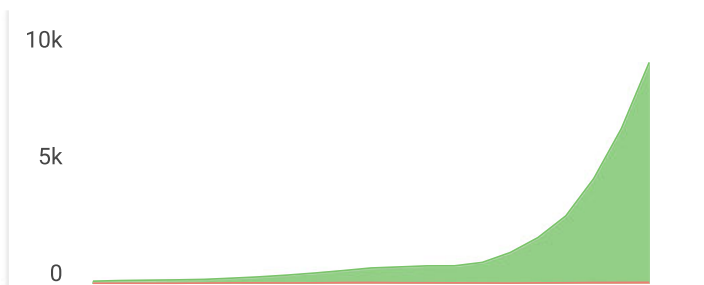
[How to publish in this journal](#)

[Contact](#)



[Join the conversation about this journal](#)





Journal of Cleaner Production

Q1

Environmental Science (miscellaneous)

best quartile

SJR 2019

1.89

powered by scimagojr.com

← Show this widget in your own website

Just copy the code below and paste within your html code:

```
<a href="https://www.scimaç
```

Metrics based on Scopus® data as of April 2020

N Nuryusnita 3 months ago

Good day

May I know where to check for how many issues published by certain journal publication?

thank you

Regard,
Yusnita

reply

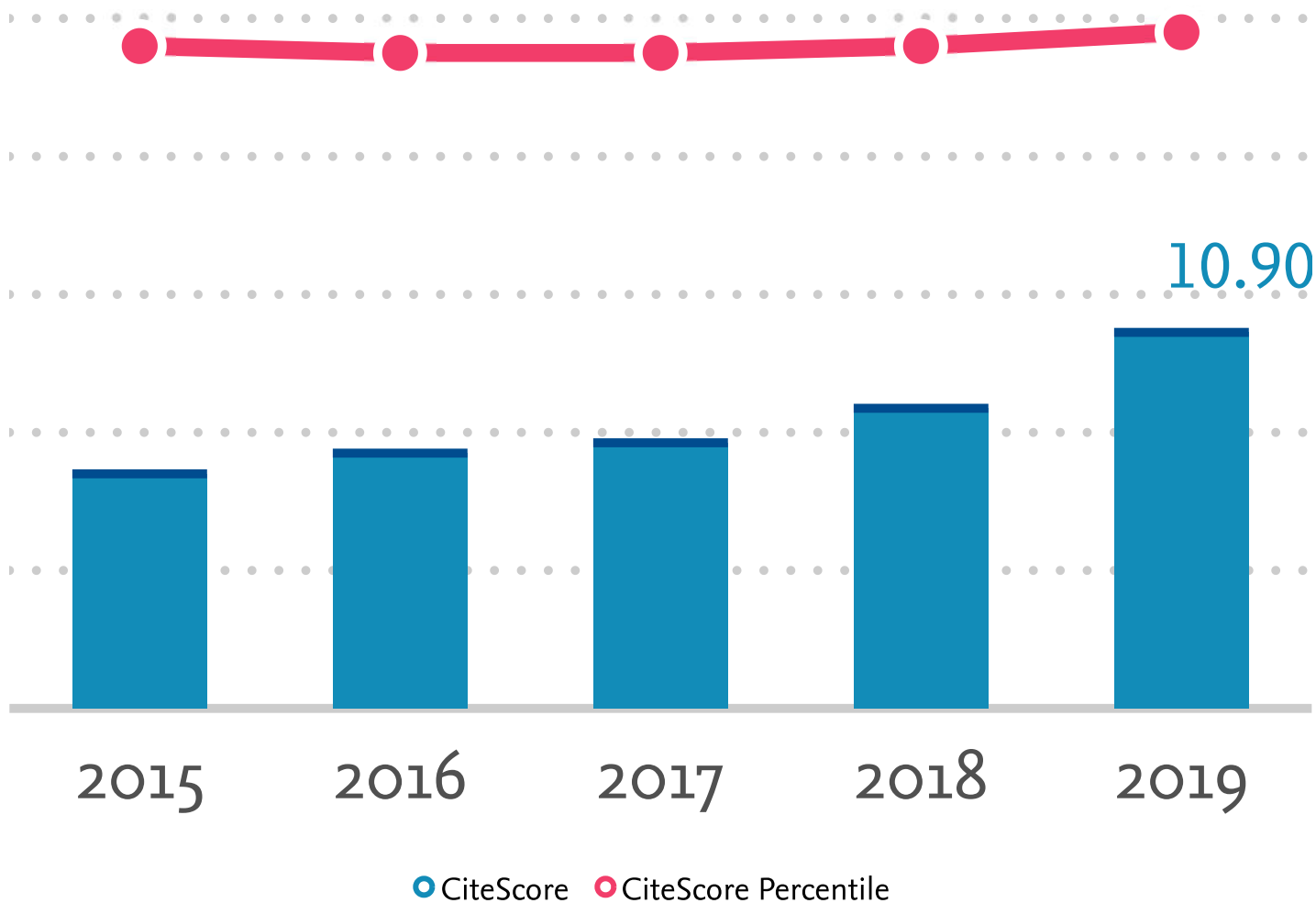


Melanie Ortiz 3 months ago

Dear Nuryusnita,
thank you for contacting us.

SCImago Team

CiteScore



ABOUT CITESCORE

CiteScore measures the average citations received per peer-reviewed document published in this title. CiteScore values are based on citation counts in a range of four years (e.g. 2016-2019) to peer-reviewed documents (articles, reviews, conference papers, data papers and book chapters) published in the same four calendar years, divided by the number of these documents in these same four years (e.g. 2016 – 19).

> View the full metrics for this title (<http://www.scopus.com/sourceid/19167>)

METRICS

YEAR	CITESCORE	CITESCORE PERCENTILE	CITATIONS	DOCUMENTS
2019	10.9	98	137661	12637
2018	8.7	96	85052	9776
2017	7.7	95	51626	6683
2016	7.4	95	33589	4540
2015	6.8	96	19673	2895

DEFINITION

CiteScore

CiteScore measures the average citations received per document published in a title. CiteScore values are based on citation counts in a range of four years (e.g. 2016-2019) to peer-reviewed documents (articles, reviews, conference papers, data papers and book chapters) published in the same four calendar years, divided by the number of these documents in these same four years (e.g. 2016 – 19).

For example, CiteScore 2019:

A = Citations to articles, reviews, conference papers, data papers and book chapters published in 2016-2019

B = Sum of articles, reviews, conference papers, data papers and book chapters published in 2016-2019

2019 CiteScore = A/B

A CiteScore is available for most active serial titles on Scopus — peer-reviewed journals, book series, conference proceedings and trade journals.

CiteScore Percentile

CiteScore Percentile indicates the relative standing of a serial title in its subject field.

A serial that has a CiteScore Percentile of 96% is ranked according to CiteScore as high or higher than 96% of titles in that category. A title will receive a CiteScore Percentile for each subject area in which it's indexed in Scopus.

CiteScore metrics

CiteScore™ metrics are a new standard that help to measure journal citation impact. They are comprehensive, transparent, current and free metrics calculated using data from Scopus®, the largest abstract and citation database of peer-reviewed literature.

CiteScore metrics is a family of eight indicators that offer complementary views to analyze the publication influence of serial titles of interest:

- CiteScore
- CiteScore Tracker
- CiteScore Percentile
- CiteScore Quartiles
- CiteScore Rank
- Citation Count
- Document Count
- Percentage Cited

This page shows the highest percentile and related rank for the title. A title will receive a CiteScore Percentile and rank for each subject area in which it's indexed in Scopus.

Full metrics for this title are available for free on [Scopus.com \(http://www.scopus.com/sourceid/19167\)](http://www.scopus.com/sourceid/19167)

OTHER METRICS IN IMPACT

> **IMPACT FACTOR (/JOURNALS/0959-6526/IMPACT_FACTOR)**

> **5 YEAR IMPACT FACTOR (/JOURNALS/0959-6526/IMPACT_FACTOR_5_YEAR)**

> **ARTICLE INFLUENCE & EIGENFACTOR (/JOURNALS/0959-6526/ARTICLE_INFLUENCE)**

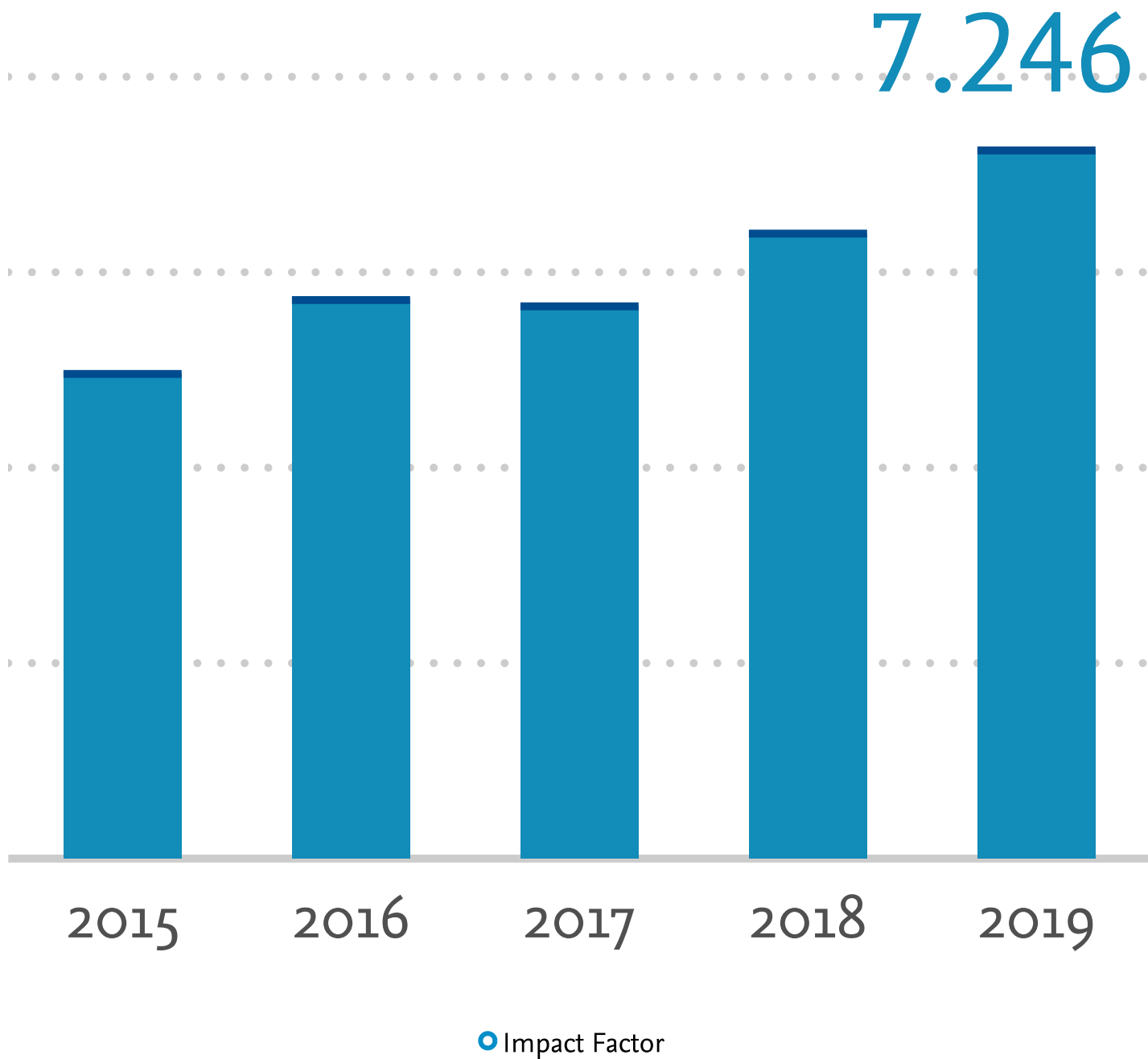
> **SNIP (/JOURNALS/0959-6526/SNIP)**

> **SJR (/JOURNALS/0959-6526/SJR)**

Elsevier © 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Elsevier.com (<http://www.elsevier.com>) | About Elsevier (<http://www.elsevier.com/about/at-a-glance>) | Terms & Conditions
(<http://www.elsevier.com/legal/elsevier-website-terms-and-conditions>) | Privacy Policy
(<http://www.elsevier.com/legal/privacy-policy>)

Impact Factor & Ranking



ABOUT IMPACT FACTOR & RANKING

Measure of the number of times an average paper in this journal is cited. Copyright Clarivate Analytics.

METRICS

YEAR	I.F.	ENGINEERING, ENVIRONME...	ENVIRONMENTAL SCIENCES	GREEN & SUSTAINABLE SCIE...
2019	7.246	8/53	19/265	7/49
2018		8/52	18/250	6/35
2017		7/50	21/241	6/33
2016		6/49	17/229	5/37
2015		5/49	16/224	5/29

DEFINITION

Impact Factor

The Journal Impact Factor is published each year by Clarivate Analytics. It is a measure of the number of times an average paper in a particular journal is cited during the preceding two years.

For example:

A = the number of times articles published in a specific journal in 2014 and 2015 were cited by journals during 2016.

B = the total number of 'citable items' published by that journal in 2014 and 2015. ('Citable items' are usually articles, reviews, proceedings, etc.; not editorials or letters-to-the-editor.)

2016 impact factor = A/B.

Actual value is intentionally only displayed for the most recent year. Earlier values are available in the Journal Citation Reports from Clarivate Analytics

ISI ranking

Journals are often ranked by Impact Factor in an appropriate Clarivate Analytics subject category. As there are now two Impact Factors published – two-year and five-year Impact Factors – this rank may differ, so care is needed when assessing these ranked lists to understand which of the two metrics is being used. In addition, journals can be categorized in multiple subject categories, giving them different ranks for each subject. Consequently, a rank should always be in context to the subject category.

OTHER METRICS IN IMPACT

> **CITESCORE** ([/JOURNALS/0959-6526/CITESCORE](#))

> **5 YEAR IMPACT FACTOR** ([/JOURNALS/0959-6526/IMPACT_FACTOR_5_YEAR](#))

> **ARTICLE INFLUENCE & EIGENFACTOR** ([/JOURNALS/0959-6526/ARTICLE_INFLUENCE](#))

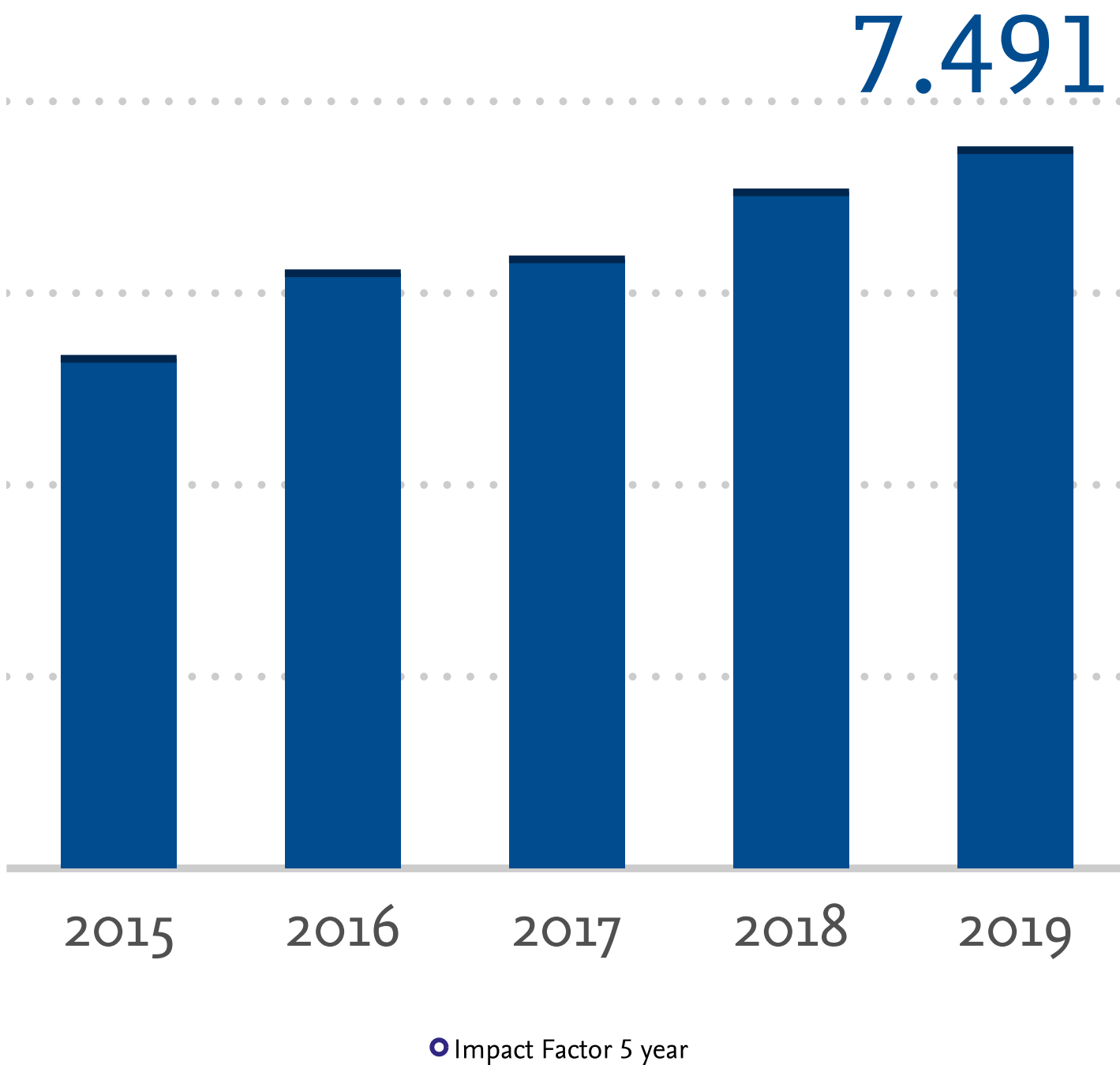
> **SNIP** ([/JOURNALS/0959-6526/SNIP](#))

> **SJR** ([/JOURNALS/0959-6526/SJR](#))

Elsevier © 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Elsevier.com (<http://www.elsevier.com>) | About Elsevier (<http://www.elsevier.com/about/at-a-glance>) | Terms & Conditions (<http://www.elsevier.com/legal/elsevier-website-terms-and-conditions>) | Privacy Policy (<http://www.elsevier.com/legal/privacy-policy>)

5 Year Impact Factor & Ranking



ABOUT 5 YEAR IMPACT FACTOR & RANKING

Impact Factor based on 5 years of history. Copyright Clarivate Analytics.

METRICS

YEAR	I.F.	ENGINEERING, ENVIRONME...	ENVIRONMENTAL SCIENCES	GREEN & SUSTAINABLE SCIE...
2019	7.491	8/52	18/241	7/41
2018		7/52	17/236	6/32
2017		7/50	19/231	6/32
2016		5/49	14/229	5/37
2015		6/48	19/218	5/27

DEFINITION

Impact Factor

A base of five years may be more appropriate for journals in certain fields because the body of citations may not be large enough to make reasonable comparisons, or it may take longer than two years to publish and distribute leading to a longer period before others cite the work.

Actual value is intentionally only displayed for the most recent year. Earlier values are available in the Journal Citation Reports from Clarivate Analytics.

ISI ranking

Journals are often ranked by Impact Factor in an appropriate Clarivate Analytics subject category. As there are now two Impact Factors published – two-year and five-year Impact Factors – this rank may differ, so care is needed when assessing these ranked lists to understand which of the two metrics is being used. In addition, journals can be categorized in multiple subject categories, giving them different ranks for each subject. Consequently, a rank should always be in context to the subject category.

OTHER METRICS IN IMPACT

> **CITESCORE (/JOURNALS/0959-6526/CITESCORE)**

> **IMPACT FACTOR (/JOURNALS/0959-6526/IMPACT_FACTOR)**

> **ARTICLE INFLUENCE & EIGENFACTOR (/JOURNALS/0959-6526/ARTICLE_INFLUENCE)**

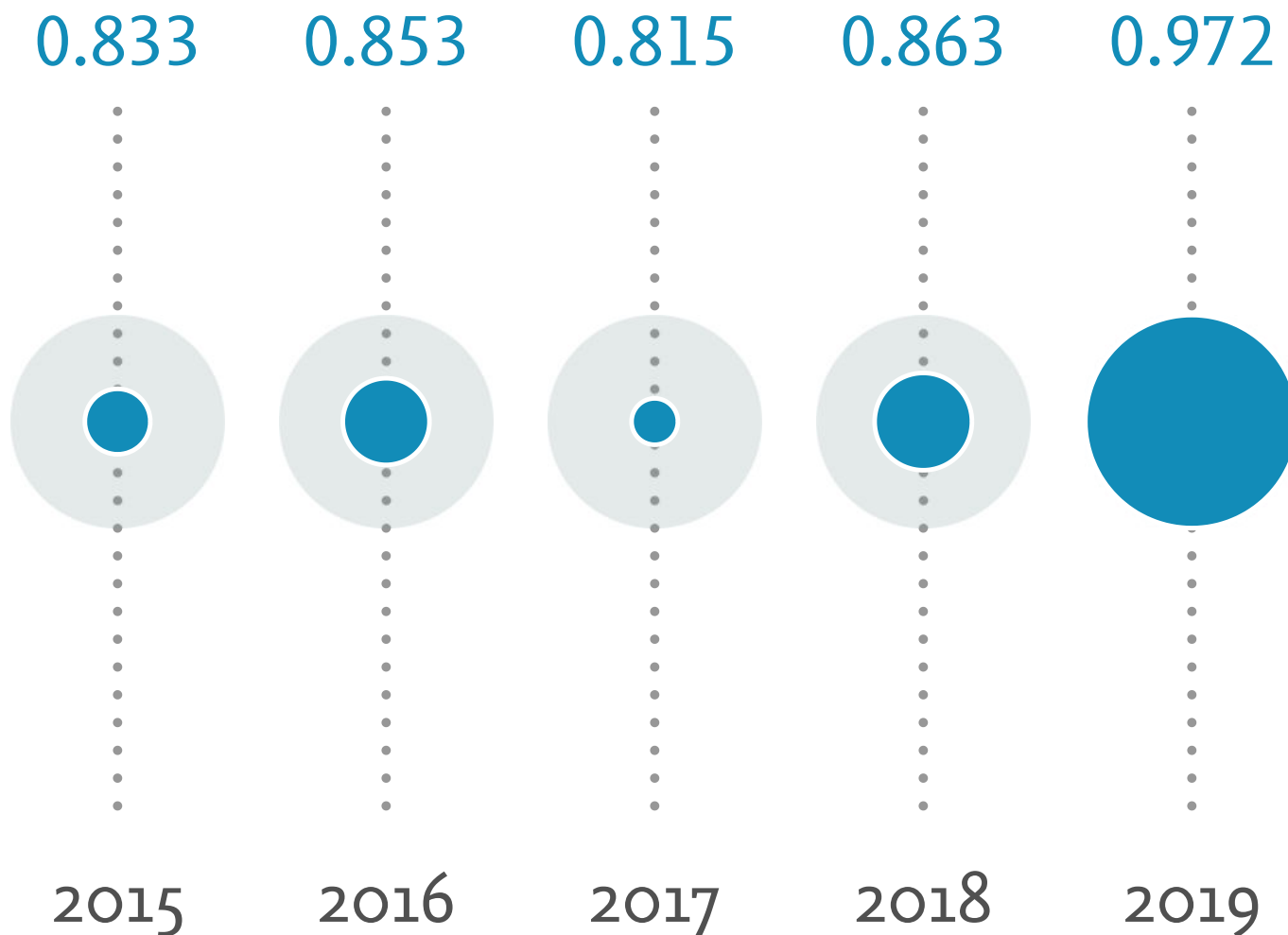
> **SNIP (/JOURNALS/0959-6526/SNIP)**

> **SJR (/JOURNALS/0959-6526/SJR)**

Elsevier © 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Elsevier.com (<http://www.elsevier.com>) | About Elsevier (<http://www.elsevier.com/about/at-a-glance>) | Terms & Conditions (<http://www.elsevier.com/legal/elsevier-website-terms-and-conditions>) | Privacy Policy (<http://www.elsevier.com/legal/privacy-policy>)

Article Influence & Eigenfactor



● Article influence

ABOUT ARTICLE INFLUENCE & EIGENFACTOR

Citations from highly ranked journals are more important and influential than those from lower ranked journals.

METRICS

YEAR	EIGENFACTOR	AI
2019	0.129	0.972
2018	0.084	0.863
2017	0.055	0.815
2016	0.039	0.853
2015	0.028	0.833

DEFINITION

Article Influence

Article Influence is calculated by dividing the Eigenfactor® score by the percentage of all articles recorded in the Journal Citation Reports that were published in a specific journal. The Article Influence score measures the average influence per article of the papers in a journal. As such, it is comparable to Clarivate Analytics widely used Impact Factor. Article Influence scores are normalized so that the mean article in the entire Clarivate Analytics Journal Citation Reports (JCR) database has an article influence of 1.00.

Eigenfactor®

The Eigenfactor® score is a rating of the total importance of a specific journal. Journals are rated according to the number of incoming citations, with citations from highly ranked journals weighted to make a larger contribution to the Eigenfactor® than those from poorly ranked journals. As a measure of importance, the Eigenfactor® score scales with the total impact of a journal. Journals generating higher impact to the field tend to have larger Eigenfactor® scores. The Eigenfactor® approach is thought to be more robust than the Impact Factor metric, which counts purely incoming citations without considering the significance of those citations.

Article influence and Eigenfactor® exclude self-citations.

OTHER METRICS IN IMPACT

> [CITESCORE \(/JOURNALS/0959-6526/CITESCORE\)](#)

> [IMPACT FACTOR \(/JOURNALS/0959-6526/IMPACT_FACTOR\)](#)

> [5 YEAR IMPACT FACTOR \(/JOURNALS/0959-6526/IMPACT_FACTOR_5_YEAR\)](#)

> [SNIP \(/JOURNALS/0959-6526/SNIP\)](#)

> [SJR \(/JOURNALS/0959-6526/SJR\)](#)

Elsevier © 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Elsevier.com (<http://www.elsevier.com>) | About Elsevier (<http://www.elsevier.com/about/at-a-glance>) | Terms & Conditions (<http://www.elsevier.com/legal/elsevier-website-terms-and-conditions>) | Privacy Policy (<http://www.elsevier.com/legal/privacy-policy>)

SNIP



● #Citations by papers past 3 years ● #Papers past 3 years

ABOUT SNIP

Source-Normalized Impact per Paper (SNIP) measures the impact of a paper within a subject field.

METRICS

YEAR	SNIP	CITATIONS	PAPERS
2019	2.394	68501	8577
2018	2.317	38890	5824
2017	2.383	21623	4056
2016	2.534	13943	2574
2015	2.396	8889	1761

DEFINITION

SNIP

Source-Normalized Impact per Paper (SNIP) measures contextual citation impact by weighting citations based on the total number of citations in a subject field. This unique perspective enables direct comparison of sources in different subject fields. The impact of a single citation is given higher value in subject areas where citations are less likely, and vice versa.

It is a ratio, with a numerator and a denominator. SNIP's numerator is a journal's impact per publication (IPP). This is simply the average number of citations received in a particular year (e.g. 2013) by papers published in the journal during the three preceding years (e.g. 2010, 2011 and 2012).

SNIP's denominator is the Database Citation Potential (DCP). We know that there are large differences between various scientific subfields in the frequency at which authors cite papers. In view of this, for each journal an indicator is calculated of the citation potential in the subject field it covers. This citation potential is included in SNIP's denominator, the DCP. SNIP is IPP divided by DCP.

SNIP enables direct comparison of sources in different subject fields. Citation potential is shown to vary not only between journal subject categories (groupings of journals sharing a research field) or disciplines (e.g., journals in Mathematics tend to have lower values than journals in Life Sciences), but also between journals within the same subject category. For instance, basic journals tend to show higher citation potentials than applied or clinical journals. Likewise, journals covering emerging topics tend to be higher than periodicals in classical subjects, or more general journals.

SNIP helps authors to identify which journals are performing best within their subject field, helping them decide where to publish. Mouse over the circles in the visualization and click on the year to view the journal's metrics. The size of the circles are compared to the highest values in the 5-year range. This highest value is represented by a closed circle, and the open circles indicate the journal's value compared to this highest value.

See [Journal Metrics site \(https://www.scopus.com/sources\)](https://www.scopus.com/sources) for background info and more datasets.

OTHER METRICS IN IMPACT

- > [CITESCORE \(/JOURNALS/0959-6526/CITESCORE\)](#)

- > [IMPACT FACTOR \(/JOURNALS/0959-6526/IMPACT_FACTOR\)](#)

- > [5 YEAR IMPACT FACTOR \(/JOURNALS/0959-6526/IMPACT_FACTOR_5_YEAR\)](#)

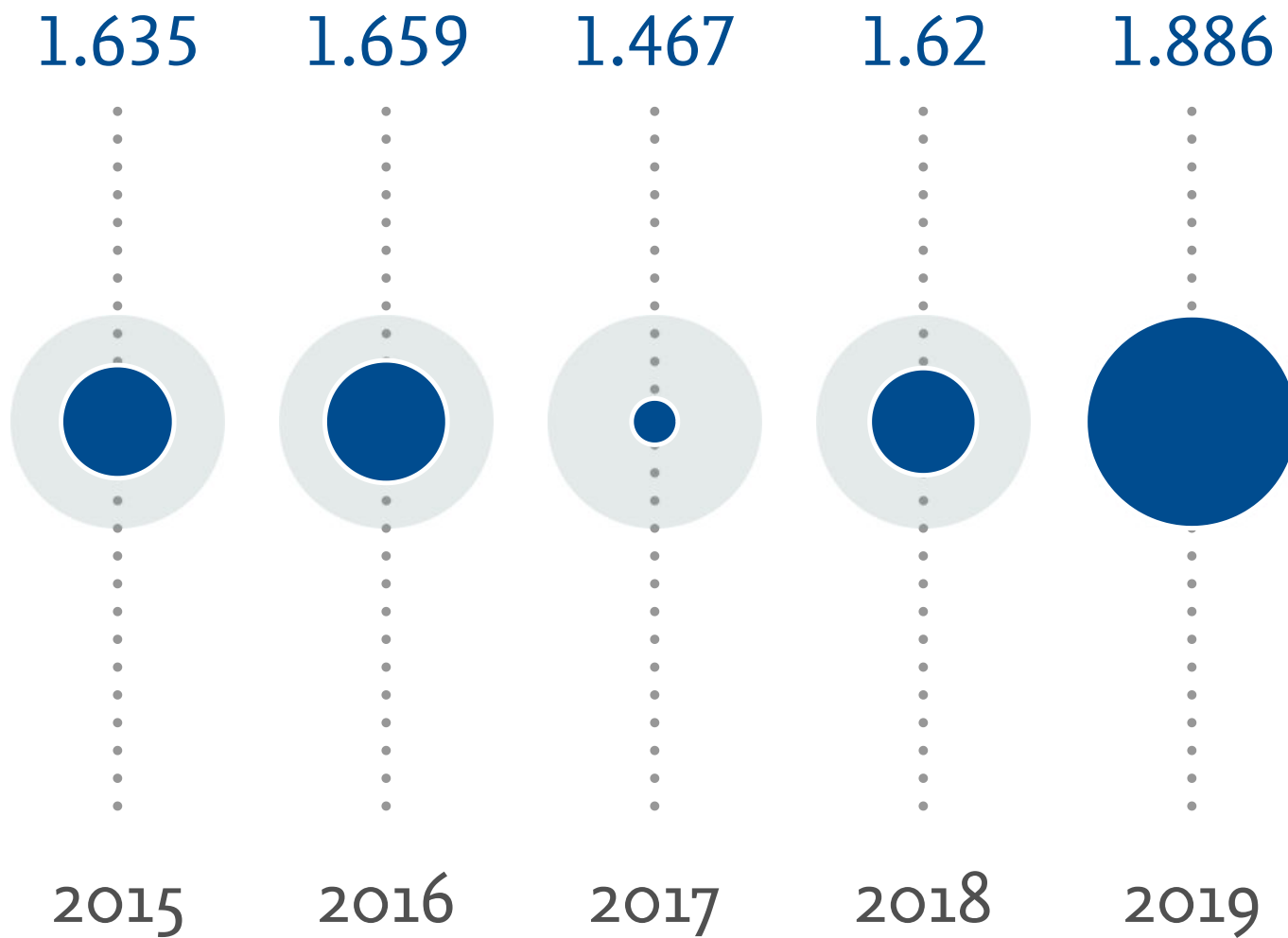
- > [ARTICLE INFLUENCE & EIGENFACTOR \(/JOURNALS/0959-6526/ARTICLE_INFLUENCE\)](#)

- > [SJR \(/JOURNALS/0959-6526/SJR\)](#)

Elsevier © 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Elsevier.com (<http://www.elsevier.com>) | About Elsevier (<http://www.elsevier.com/about/at-a-glance>) | Terms & Conditions (<http://www.elsevier.com/legal/elsevier-website-terms-and-conditions>) | Privacy Policy (<http://www.elsevier.com/legal/privacy-policy>)

SJR



● SJR

ABOUT SJR

SCImago Journal Rank (SJR) is a prestige metric based on the idea that 'all citations are not created equal'.

METRICS

YEAR	SJR
2019	1.886
2018	1.620
2017	1.467
2016	1.659
2015	1.635

DEFINITION

SJR

SCImago Journal Rank (SJR) is a measure of the number of times an average paper in a particular journal is cited, and as such is conceptually similar to the Impact Factor. A major difference is that instead of each citation being counted as one, as with the Impact Factor, the SCImago Journal Rank assigns each citation a value greater or less than 1.00 based on the rank of the citing journal. The weighting is calculated using a three-year window of measurement and uses the Scopus database. Authors can use these metrics when deciding where to publish.

The idea is to assign weights to bibliographic citations based on the importance of the journals that issued them. Citations issued by more important journals will be more valuable than those issued by less important ones. This 'importance' will be computed recursively, i.e., the important journals will be those which in turn receive many citations from other important journals.

See [our Journal Metrics site \(https://www.scopus.com/sources\)](https://www.scopus.com/sources) for background information and datasets.

OTHER METRICS IN IMPACT

-
- > **CITESCORE (/JOURNALS/0959-6526/CITESCORE)**

 - > **IMPACT FACTOR (/JOURNALS/0959-6526/IMPACT_FACTOR)**

 - > **5 YEAR IMPACT FACTOR (/JOURNALS/0959-6526/IMPACT_FACTOR_5_YEAR)**

 - > **ARTICLE INFLUENCE & EIGENFACTOR (/JOURNALS/0959-6526/ARTICLE_INFLUENCE)**

 - > **SNIP (/JOURNALS/0959-6526/SNIP)**

Elsevier © 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Elsevier.com (<http://www.elsevier.com>) | About Elsevier (<http://www.elsevier.com/about/at-a-glance>) | Terms & Conditions (<http://www.elsevier.com/legal/elsevier-website-terms-and-conditions>) | Privacy Policy (<http://www.elsevier.com/legal/privacy-policy>)



Source details

Journal of Cleaner Production

Scopus coverage years: from 1993 to Present

Publisher: Elsevier

ISSN: 0959-6526 E-ISSN: 1879-1786

Subject area: [Environmental Science: General Environmental Science](#)

[Business, Management and Accounting: Strategy and Management](#)

[Engineering: Industrial and Manufacturing Engineering](#)

[Energy: Renewable Energy, Sustainability and the Environment](#)

CiteScore 2019

10.9



SJR 2019

1.886



SNIP 2019

2.394



[View all documents >](#)

[Set document alert](#)

[Save to source list](#) [Source Homepage](#)

[CiteScore](#) [CiteScore rank & trend](#) [Scopus content coverage](#)

i Improved CiteScore methodology



CiteScore 2019 counts the citations received in 2016-2019 to articles, reviews, conference papers, book chapters and data papers published in 2016-2019, and divides this by the number of publications published in 2016-2019. [Learn more >](#)

CiteScore 2019

$$10.9 = \frac{137,661 \text{ Citations } 2016 - 2019}{12,637 \text{ Documents } 2016 - 2019}$$

Calculated on 06 May, 2020

CiteScoreTracker 2020



$$13.0 = \frac{201,701 \text{ Citations to date}}{15,504 \text{ Documents to date}}$$

Last updated on 02 March, 2021 • Updated monthly

CiteScore rank 2019

Category	Rank	Percentile
Strategy and Management		
Engineering		
Industrial and Manufacturing Engineering	#9/340	97th
Energy		
Renewable	#18/179	90th

[View CiteScore methodology >](#) [CiteScore FAQ >](#) [Add CiteScore to your site](#)

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 216 de 231

ANEXO XI: “Reduction of Water and Energy Consumption in Sanitary-Ware industry by Absorption Machine Operated with Recovered Heat”. Invitación como ponente en congreso “*International Conference on Environmental Science and Green Energy*” en París

[EXTERNAL] RV: Antonio Colmenar-Santos

Antonio Colmenar <acolmenar@ieec.uned.es>

Mar 02/03/2021 11:50

Para: Carlos Cuviella <carlos.cuviella@roca.net>

CC: 'David Borge Diez' <david.borge@unileon.es>; 'África López-Rey' <alopez@ieec.uned.es>

WARNING - EXTERNAL EMAIL

Please do not click on any link or open any attachment unless the source of the email is trusted and the content is secure. If in doubt about the legitimacy of this email, please contact to ITSupport for validation.

Real Sender: **acolmenar@ieec.uned.es** Source Server: **mail-**

eopbgr60067.outbound.protection.outlook.com

Buenos días de nuevo Carlos,

Igual te interesa, a ti o a alguno de los coautores, esto no suele ser normal.

Saludos,



Dr. Antonio Colmenar Santos
Profesor Titular acreditado a Catedrático
Tel. 34-913987788
e-mail: acolmenar@ieec.uned.es

Web personal: <http://tinyurl.com/y3kqe4dy>

Dpto. de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Control, Telemática y Química Aplicada a la Ingeniería
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales / UNED
C/ Juan del Rosal, 12
Ciudad Universitaria, s/n
28040 Madrid - ESPAÑA

De: Green Energy 2021 <contact@prideconferences.co.uk>

Enviado el: martes, 2 de marzo de 2021 11:42

Para: acolmenar@ieec.uned.es

Asunto: Antonio Colmenar-Santos

Importancia: Alta

Dear Dr. Antonio Colmenar-Santos ,

Greetings of the day!!

Hope you are doing well.

It's our pleasure to welcome you as one of our speaker for our upcoming congress on **“International Conference on Environmental Science & Green Energy”** which is scheduled at **Hampton by Hilton Paris Clichy, Paris, France** from **September 13 – 15, 2021**

Our research team had a glance on one of your publication titled **“Reduction of water and energy consumption in the sanitary ware industry by an absorption machine operated with recovered heat ”** which is very impressive, we appreciate if you could accept our invitation and deliver your lecture.

Kindly have glance on our web page for further details: [Green Energy 2021](#)

Highlights of the conference:

- 1) CPD certificate will be provided at the conference venue.
- 2) We are scheduled for city view of September 16, 2021 for all our participants without any charge.
- 3) As an invited speaker we will take care of your one night accommodation without any charge with food and beverages.
- 4) We will support your 25 percent of your travel.
- 5) Best 5 presentations will be awarded with USD 1500 per each.
- 6) Best 10 poster presentations will be awarded with USD 1000 each.
- 7) Soft copy of certificate will be sent upon on prior request.
- 8) Pickup and drop facility from airport to hotel and vice versa.
- 9) Conference pictures and videos will be distributed to all participants without any additional wages.
- 10) Translators will be available to translate all languages to English.

For further benefits and detailed explanation feel free to contact us.

Looking forward to hearing from you.

Regards,

Grayson Edward

Program Manager | Environmental Science & Green Energy

Pride Conferences

4 Lombard Street, London, EC3V 9HD, UK

T: +44 – 2392160593



FAX : 442081816247

E: contact@prideconferences.co.uk

AVISO LEGAL. Este mensaje puede contener información reservada y confidencial. Si usted no es el destinatario no está autorizado a copiar, reproducir o distribuir este mensaje ni su contenido. Si ha recibido este mensaje por error, le rogamos que lo notifique al remitente.

Le informamos de que sus datos personales, que puedan constar en este mensaje, serán tratados en calidad de responsable de tratamiento por la UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA (UNED) c/ Bravo Murillo, 38, 28015-MADRID-, con la finalidad de mantener el contacto con usted. La base jurídica que legitima este tratamiento, será su consentimiento, el interés legítimo o la necesidad para gestionar una relación contractual o similar. En cualquier momento podrá ejercer sus derechos de acceso, rectificación, supresión, oposición, limitación al tratamiento o portabilidad de los datos, ante la UNED, [Departamento de Política Jurídica de Seguridad de la Información](#), o a través de la [Sede electrónica](#) de la Universidad.

Para más información visite nuestra [Política de Privacidad](#).

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 217 de 231

ANEXO XII: “Sanitary-ware factories: heat recovery strategies to optimize energy and water consumption” COPIA DE LA PUBLICACIÓN



Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability,
TMREES18, 19–21 September 2018, Athens, Greece

Sanitary-ware factories: heat recovery strategies to optimize energy and water consumption

Carlos Cuviella-Suárez^a, Antonio Colmenar-Santos^b, David Borge-Diez^c, Enrique Rosales-Asensio^d

^{a,b,c,d} Juan del Rosal, 12 – Ciudad Universitaria, 28040 Madrid – SPAIN

Abstract

Sanitary-ware manufacturing has a specific particular configuration of energy consumption from the thermal point of view. Heat requirements and temperature levels through the different sub-processes in the manufacturing sequence are distributed in such a way that a proper network of recovered heat can save up to 1/3 of the primary energy consumption of the factory. A half of the total thermal requirement is devoted to fire the ware along a tunnel kiln that exhausts ¾ of this heat through the exhausting and cooling stacks at a temperature a proper temperature level to be recovered in the rest of common thermal processes as drying or heating. On the other hand, the great water consumption to flush resin molds can be saved by a multi-effect distillation treatment fed with recovered heat. Instead of rejecting it with solvated salts, a combined power plant optimally sized can be coupled to match both, electrical and thermal consumptions allowing for extra heat to distillate the flushing water. This research shows how sanitary-ware manufacturing can be re-engineered to save most of the water and 31 percent of primary energy

© 2019 The Authors. Published by Elsevier Ltd.

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Selection and peer-review under responsibility of the scientific committee of Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES18.

Keywords: Energy and water saving; Heat recovery; Multi-effect distillation; Sanitary-ware Industry; Combined Power Plant

1. Introduction

Ceramic industry is traditionally a great consumer of resources. In Europe, this industry employs 338.000 persons and provides a business turnover of 28 billion euros [1] and it is one of the large consumers of energy, which can

account for as much as 30% of the total production cost. Due to the high needs of resource, their price and CO₂ emissions regulation, the ceramic producers are facing economical and legal barriers to go on in a sustainable business model. The EASME created the IEE in order to create an energy-intelligent future for us all. It supported EU energy efficiency and renewable energy policies, with a view to reaching the EU 2020 targets (20% cut in greenhouse gas emissions, 20% improvement in energy efficiency and 20% of renewables in EU energy consumption). Currently, EU's Horizon 2020 program supports the research, demonstration and market up-take of energy-efficient technologies. CERAMIN is the particular project aiming the ceramic industry within this program [2].

Nomenclature

EASME	Executive Agency for Small and Medium-sized Enterprises
IEE	Intelligent Energy Europe
EU	European Union
CHP	Combined heat and power generation
MED	Multi-effect distillation
NG	Natural gas
GT	Gas turbine
ANN	Artificial neural network
HVU	Heating ventilation units
GRG	Generalized reduced gradient
LSA	Least squares adjustment
C_{cf}	Energy cost for a conventional factory (€/year)
kWh	Common unit to express energy consumption as kw per hour
p_{NG}	Price of the natural gas (€/kWh)
$Q_{tunnel\ kiln}$	Thermal power consumed by the tunnel kiln (kW)
$Q_{shuttle\ kiln}$	Thermal power consumed by the shuttle kiln (kW)
$Q_{boilers}$	Thermal power consumed by the boilers (kW)
$Q_{HVU's}$	Thermal power consumed by the HVU's (kW)
Q_{dryers}	Thermal power consumed by dryers (kW)
p_{elec}	Price of the electricity (€/kWh)
N_{elec}	Electrical power demanded (kW)
W_{cf}	Primary energy consumed by the conventional factory (kWh/year)
\dot{m}_w	Mass flow of water to be distilled
Q_{MED}	Thermal power consumed by the MED (kW)
η_{MED}	Efficiency of the MED
C_{o1f}	Energy cost for an optimized factory to save water (€/year)
W_{o1f}	Primary energy for an optimized factory to save water (kWh/year)
\dot{m}_a	Mass flow of inlet-air in the kiln (kg/s)
h_{ap}	Specific enthalpy of pre-heated inlet-air (kJ/kg)
\dot{m}_{rc}	Mass flow of rapid cooling air in the kiln (kg/s)
h_{rc}	Specific enthalpy of the rapid cooling air (kJ/kg)
h_{GTex}	Specific enthalpy of the GT exhausting flow (kJ/kg)
Q_{ap}	Thermal power consumed to pre-heating the inlet-air of the kiln (kW)
C_{o2f}	Energy cost for an optimized factory with GT powered by electrical average of the year (€/year)
W_{o2f}	Primary energy consumed by the optimized factory with GT powered by electrical average of the year (kWh/year)
$N_{network}$	Electrical power provided by the public network (kW)
G_{GT}	Primary power consumed by the GT (kW)
N_{GT}	Electrical power provided by the GT (kW)
Q_{GT}	Thermal power provided by the GT (kW)
η_{GT}	Electrical efficiency of the GT (dimensionless)

C_{o3f}	Energy cost for an optimized factory with GT powered to optimize the energy consumption of the year (€/year)
W_{o3f}	Primary energy consumed by the optimized factory with GT powered to optimize the energy consumption of the year (kWh/year)
C_{o4f}	Energy cost for an optimized factory with GT powered to optimize the energy cost of the year (€/year)
W_{o4f}	Primary energy consumed by the optimized factory with GT powered to optimize the energy cost of the year (kWh/year)
p.u.	Per unit

In this background, this research aims to show the way to decrease the energy requirements in the particular field of the ceramic sanitary-ware manufacturing. Though the tile production has been widely researched from the consumption point of view, no much research has been developed for the sanitary-ware. It has to be remarked that both are ceramic processes with almost the main manufacturing global method, although some important differences make the latter particularly interesting for the resources reduction study.

In sanitary-ware industry, the ware has to be dried after casting and before firing on the contrary of other ceramic processes. Besides, the hygrothermal environment in the casting hall has to be kept into a defined range. On the other hand, when resin molds are used to cast, much treated water is wasted to flush the mold in every casting cycle [1].

This research approaches these particularities to re-engineer the map of single energy and water flows reducing the global consumption in a factory type [1]. In this way, it provides a calculated way to apply the scheme of resources consumption to quantify the global saves of both, energy and water.

2. Methodology

Assuming that a proper map of energy and water so as thermodynamic conditions have been previously developed through the factory [1] as shown in table 1, the research proposes a heat recovery and a CHP plant implantation to reduce primary energy by saving fuel in some sub-processes, which are then supplied with heat recovered from kiln and gas turbine. Besides, water can be re-used by eliminating salts with a MED system.

Table 1. Global energy and water consumption

		CONSUMPTION		WASTE TO RECOVER	
ELECTRICITY		1,295	kW _{electrical}		
	Tunnel kiln	2,150	kW _{thermal}	Fumes exhausting	460 kW _{thermal}
				Rapid cooling	373 kW _{thermal}
				Slow cooling	827 kW _{thermal}
				Total	1660 kW _{thermal}
NATURAL GAS					
	Shuttle kiln	1,480	kW _{thermal}		
	Boilers	465	kW _{thermal}		
	Heating ventilation units	271	kW _{thermal}		
	Dryers	425	kW _{thermal}		
	Total	4,791	kW _{thermal}		
WATER					
	For flushing molds and losses through the reverse osmosis	7.62E-03	m ³ /s	7.62E-03	m ³ /s

A factory of sanitary-ware consumes:

- Electricity for motors, lighting, etc. Electricity is consumed with no waste in the scope of the factory
- Fuel (usually NG) for firing, heating and drying. The fuel is burnt and thus, combustion gases mixed with air in excess flow is delivered through the exhausting stacks in a temperature range over 200°C.

- Water as raw material, for washing, misting and mainly for flushing resin molds. All the water is finally wasted as vapor through the stacks of heaters and dryers or it is dumped to sewage after being contaminated with salts through the porous of the resin molds.

A conventional factory where no resource saving policy has been set, they are supplied by the networks of the providers for every sub-process and then wasted to atmosphere or sewage. Fig.1 shows the consumptions.

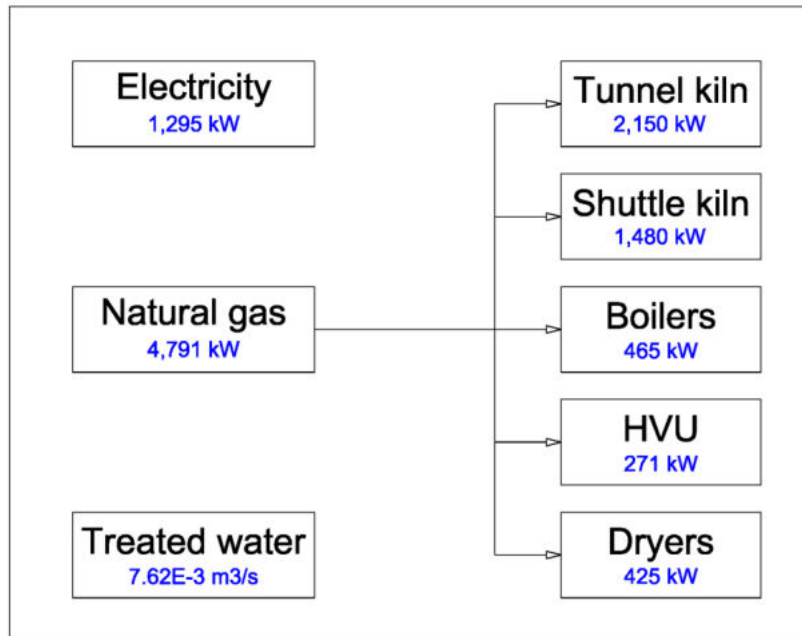


Fig. 1. Consumptions of energy and water in a conventional factory of sanitary-ware.

The proposal of this research is to combine network of recovered heat with a CHP plant based in gas turbine engine. With this configuration, the major consumer of heat in the factory (tunnel kiln) provides different grade heat air flows from the different exhausting stacks. This heat mixed with the one that comes from the turbine exhausting is managed to provide heating power to dryers, heaters and distillator. Fig. 2 shows the configuration.

Besides, the kiln itself is considered as a medium grade heat consumer since the combustion air can be preheated before entering the combustion chamber and thus, a significant save of gas can be achieved.

On the other hand there is an air flow into the kiln (roof air) used to create turbulences [1] which can be pre-heated as well as the combustion air in order to improve the efficiency of the kiln.

Most of the heat consumed in the kiln is devoted to heat air inside. The higher temperature of inlet-air, the less gas consumption.

The actual difficulty of the study is to match the produced energy with consumed at time. While the kiln is operated in a steady and continuous way, heat sinks are working with variable cycles. Hence, they have to be planned to work overlapped in such a way that the global heat demand curve is flattened. This means to delay starting time cycles to combine the thermal peak demand of some sinks with the low demand of others. This consideration is equivalent to design with averaged thermal powers. Regarding the turbine, it should be run at the design point with constant power supplied, but this is not the actual electrical demand of the factory which is varying as per the demand curve so the power has to be adjusted and so the efficiency of the turbine is decreasing as the load does. An hourly demand curve for one year is used to simulate the real behaviour of the system calculating the variables in every hour according the real demand and adding them together for the whole year.

The shape of daily demand curves type does not vary much along the months within the period of the year [3]. Nevertheless, the maximum of power depends more on the month. It can be seen a lower level of demand during

the months in summer. Daily curves for each month are shown in Fig. 3.

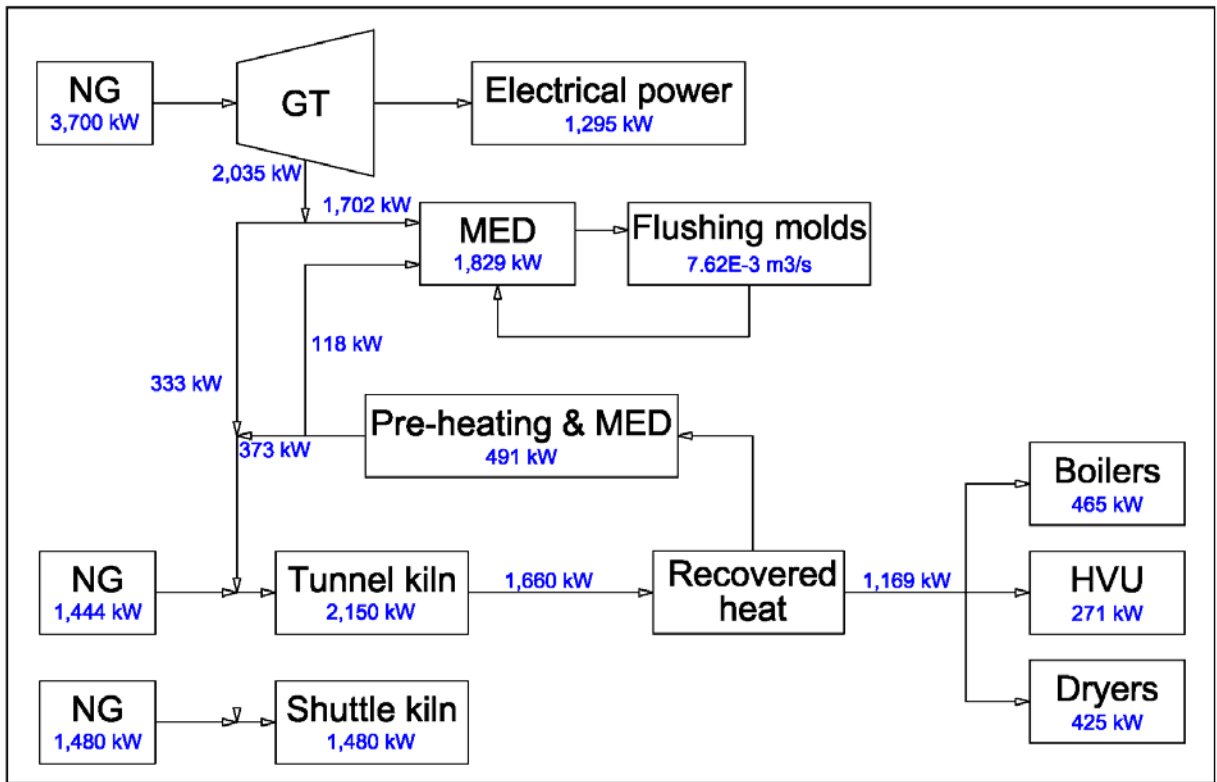


Fig. 2. Configuration proposed to recover heat from kiln and turbine power plant

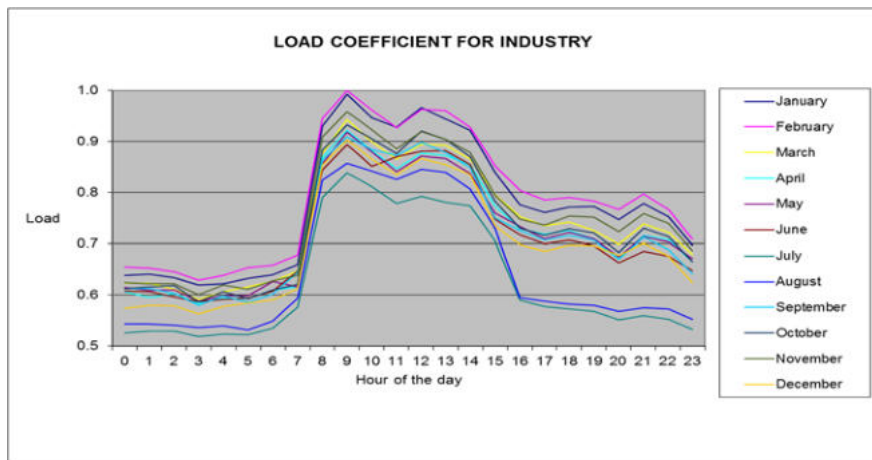


Fig. 3. Load coefficient type for an industrial demand curve.

Once the configuration and requirements are known, the only question is the size of the turbine. With a small turbine, electricity and natural gas have to be purchased to accomplish the requirements, although it will be run at

the design point all the yearlong with the best efficiency. On the other hand, when the turbine is oversized, it will be run off design most of the time which results in a low efficiency performance. It has to be optimized as per the real thermal and electrical demands. The optimization can be achieved either from the economical point of view depending on the prices of the energy or from the energy point of view depending on the actual consumption of fuel for the set of gas turbine, thermal requirements within the factory and the power station that supplies the network where the factory is linked to.

The energy optimization only depends on the demand. Thus, the energy optimization will be solved by calculating several pairs of turbine power-annual consumption and then a correlation is calculated by a LSA.

The economical optimization is not so easy since the optimal power is depending on the two variable prices. The process to calculate the optimal GT is to find a function which correlates every prices scenario with the corresponding optimal power.

The efficiency of a gas turbine is decreasing with the load [4] as Fig. 4 shows:

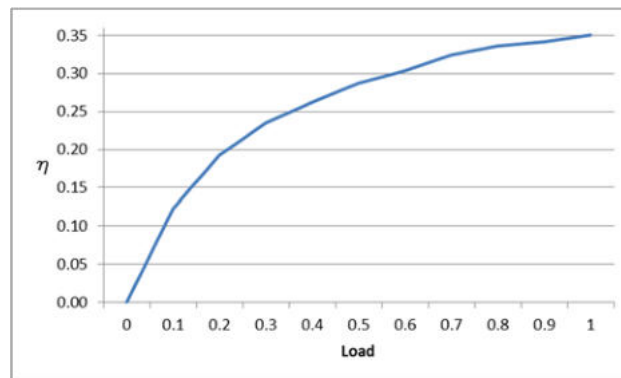


Fig. 4. Efficiency of a gas turbine versus load

For this purpose an artificial neural network is developed which is trained with several sets of data. Every set includes; NG price, electricity price, optimal power.

Every prices scenario is a single optimization problem that has to be solved by iterative minimization of the cost calculated along the year for the pair of prices and the demand curve and yields an optimal turbine power to minimize the total cost of NG and electricity.

The ANN is trained with these data to provide the function which yields the best turbine choice for every pair of prices.

3. Calculation

3.1 Primary energy for a conventional factory

Table 1 showed the energy and water consumptions in a factory where no saving measures have been carried out.

Primary energy is calculated under following hypothesis.

- An efficiency of 0.35 is considered in the case of the electricity from primary energy to electrical energy [5]
- The gas consumption is assumed to be primary energy

Once the available powers are quantified, the annual cost and primary energy have to be calculated as follows:

For the conventional factory, the cost is calculated multiplying each consumption by the corresponding price in every hour, and summing them all together for the whole year:

$$C_{cf} = \sum_{i=1}^{8,760} (p_{ng} \cdot (Q_{tunnel\ kiln} + Q_{shuttle\ kiln} + Q_{boilers} + Q_{HVU's} + Q_{dryers})) + p_{elec} \cdot N_{elec_i} \quad (1)$$

When tried different price scenarios, the powers do not change but the cost is varying as per the prices variation. However, primary energy is the same for any economic scenario.

On the other hand, the primary energy is calculated in a similar way. Thermal power for every consumer is added and then the electrical power divided by the efficiency of the electrical network (assumed equal to 0.35 [5]).

$$W_{cf} = \sum_{i=1}^{8,760} \left(Q_{tunnel\ kiln} + Q_{shuttle\ kiln} + Q_{boilers} + Q_{HVV's} + Q_{dryers} + \frac{N_{elec_i}}{0.35} \right) \quad (2)$$

3.2 Water saving measures

As mentioned in the introduction section, the proposed way to save the great amount of water dumped after flushing molds is to treat it by a MED to eliminate the dissolved salts and then re-use it to flush the molds in a closed loop with only fresh water to equilibrate losses.

- The water saving is transformed into primary energy as the thermal energy required for the MED to distillate the needed quantity. MED efficiency is assumed to be $\eta_{MED} = 2.4 \cdot 10^5 \frac{kJ}{m^3}$ [6].

Thermal power to distillate water is calculated by:

$$\dot{m}_w \cdot \eta_{MED} = Q_{MED} \quad (3)$$

With this new thermal power, the equations to calculate the increased thermal energy derived from the water saving would be:

$$C_{o1f} = \sum_{i=1}^{8,760} (p_{ng} \cdot (Q_{tunnel\ kiln} + Q_{shuttle\ kiln} + Q_{boilers} + Q_{HVV's} + Q_{dryers} + Q_{MED}) + p_{elec} \cdot N_{elec_i}) \quad (4)$$

$$W_{o1f} = \sum_{i=1}^{8,760} \left(Q_{tunnel\ kiln} + Q_{shuttle\ kiln} + Q_{boilers} + Q_{HVV's} + Q_{dryers} + Q_{MED} + \frac{N_{elec_i}}{0.35} \right) \quad (5)$$

3.3 Calculation of the heat required to pre-heating the inlet-air of the kiln

Provided exhausting and air flows through the stacks of the kiln [1], are shown in table 2.

Table 2. Thermodynamic conditions of the recovered heat

WASTED HEAT TO BE RECOVERED			
Stack	kW _{thermal}	kg/s	°C
Exhausting	460	1.51	327
Rapid cooling	373	0.45	868
Slow cooling	827	3.11	296

Inlet-air for the kiln is 1.16 kg/s [1].

In order to save the more fuel into the kiln, the more temperature for this inlet-air is desirable. Thus, the heat to heat-up inlet-air is provided from the rapid cooling stack (0.45 kg/s at 868 °C) and the rest (1.16-0.45 kg/s) is preheated by the GT exhausting stack at 500°C. Calculation of the higher possible temperature to preheat is made by energy balance.

$$\dot{m}_a \cdot h_{a_p} = \dot{m}_{rc} \cdot h_{rc} + (\dot{m}_a - \dot{m}_{rc}) \cdot h_{GT_{ex}} \quad (6)$$

The thermal power consumed to pre-heat the combustion air is given by:

$$Q_{a_p} = \dot{m}_a \cdot h_{a_p} \quad (7)$$

3.4 Primary energy for an optimized factory given the power of the gas turbine as the average of the year

Assuming the configuration of Fig. 2, cost and primary energy should be calculated as follows:

The procedure to calculate cost and primary energy is as follows:

- Load degree is calculated with the demand curve of electrical power and the gas electrical turbine power

$$Load = \frac{N_{elec}}{N_{GT}} \quad (8)$$

- When load is less than 1, the turbine runs off design with a lower efficiency but all the electricity is supplied by it. When the load is greater than 1, the turbine is run on the design point but electricity above the turbine power has to be purchased from electrical network
- The actual efficiency of the turbine under off-load operation is obtained from fig. 4
- For the periods where $N_{GT} < N_{elec}$, the difference has to be supplied from network:

$$N_{network} = N_{elec} - N_{GT} \quad (9)$$

- Then it can be calculated the gas consumption of the turbine:

$$G_{GT} = \frac{N_{GT}}{\eta_{GT}} \quad (10)$$

- The exhausting heat of the turbine is calculated by means of the heat-ratio of the turbine

$$Q_{GT} = heat_{ratio} \cdot N_{GT} \quad (11)$$

- Heat powers for kilns and MED are calculated from Fig. 2:

$$Q_{tunnel} = 1,444 \text{ kW} \quad (12)$$

$$Q_{shuttle} = 1,480 \text{ kW} \quad (13)$$

$$IF Q_{GT} \geq (1,829 - 118 + 333) THEN Q_{MED} = 0 \quad (14)$$

$$IF Q_{GT} < (1,829 - 118 + 333) THEN Q_{MED} = (1,829 - 118 + 333) - Q_{GT} \quad (15)$$

- Whith all the powers calculated already, they can be obtained cost and energy

$$C_{ozf} = \sum_{i=1}^{8,760} (p_{ng} \cdot (G_{GT} + Q_{tunnel \text{ kiln}} + Q_{shuttle \text{ kiln}} + Q_{MED}) + p_{elec} \cdot N_{network_i}) \quad (16)$$

$$W_{ozf} = \sum_{i=1}^{8,760} \left(G_{GT} + Q_{tunnel \text{ kiln}} + Q_{shuttle \text{ kiln}} + Q_{MED} + \frac{N_{network_i}}{0.35} \right) \quad (17)$$

3.5 Energy optimization. The power of the optimal gas turbine to minimize the primary energy

In the previous section, it has been considered that turbine power was known as the electrical average of the year. However this is not the real behavior, so electrical power of the GT has to be adjusted for either the lowest energy or cost. The process to optimize the energy involves an iterative procedure by a GRG method. The authors have tried to define a LSA polynomial function of GT power that yields the primary energy whose derivative provides the direction of the gradient. The function was set by a LSA where the pairs are found by solving the set of equations in the previous section for each supposed power providing the correspondent consumption of primary energy. The polynomial function was:

$$W_{o3f} = a_0 + a_1 \cdot N_{GT} + a_2 \cdot N_{GT}^2 + a_3 \cdot N_{GT}^3 + a_4 \cdot N_{GT}^4 + a_5 \cdot N_{GT}^5 \tag{18}$$

And its derivative function:

$$\frac{dW_{o3f}}{dN_{GT}} = 0 = a_1 + 2 \cdot a_2 \cdot N_{GT} + 3 \cdot a_3 \cdot N_{GT}^2 + 4 \cdot a_4 \cdot N_{GT}^3 + 5 \cdot a_5 \cdot N_{GT}^4 \tag{19}$$

Nevertheless, this approximation resulted not good enough to find the minimum of the actual function. Thus, the procedure to find the minimum of the primary energy has been set as a GRG method.

$$C_{o3f} = \sum_{i=1}^{8,760} (p_{ng} \cdot (G_{GT} + Q_{tunnel\ kiln} + Q_{shuttle\ kiln}) + p_{elec} \cdot N_{network_i}) \tag{20}$$

$$W_{o3f} = \sum_{i=1}^{8,760} \left(G_{GT} + Q_{tunnel\ kiln} + Q_{shuttle\ kiln} + \frac{N_{network_i}}{0.35} \right) \tag{21}$$

3.6 Economical optimization. The power of the optimal gas turbine to minimize the annual cost as a function of the prices of the energy.

The optimization process from the economical point of view depends on two variables, so it is not possible to carry it out by a LSA. The process is led by a GRG method where the bivariate function is set by an ANN according with the scheme of Fig. 5.

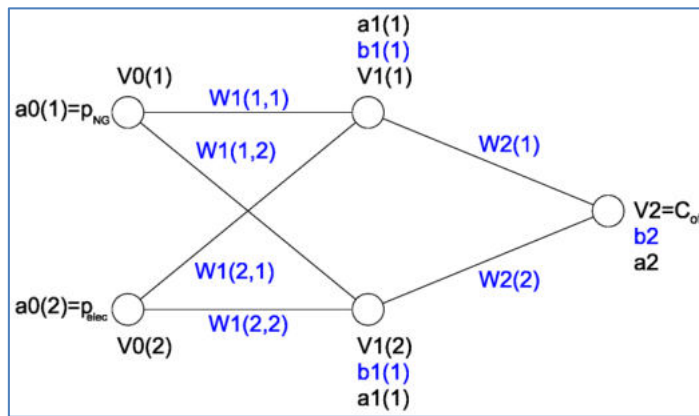


Fig. 5. Scheme of the ANN correlation for cost=f(P_{NG})

Correlation function is defined as follows:

$$V0(i) = \ln(a(i)) \quad (i = 1,2) \tag{22}$$

$$a1(j) = b1(j) + \sum_{i=1}^2 a0(i,j) \cdot W1(i,j) \quad (j = 1,2) \tag{23}$$

$$V1(j) = e^{a1(j)} \quad (j = 1,2) \tag{24}$$

$$C_{o4f} = a2 = V2 = b2 + \sum_{j=1}^2 V1(j) \cdot W2(j) = b2 + \sum_{j=1}^2 W2(j) \cdot e^{b1(j)} \cdot \prod_{i=1}^2 a0(i)^{W1(i,j)} \tag{25}$$

The ANN is defined by the parameters in blue: b1(j), W1(i,j), b2 and W2(j) which have to be iteratively approximated to the optimal solution where the error between correlated output and real one is less than the fixed tolerance. At this point, the ANN would yield a cost for every pair of energy prices as inputs

The process is carried out with a set of “N” known training values where there are two inputs defined for energy prices and the actual corresponding output for the annual total cost.

$$C_{o4f_n} = f(p_{NG_n}, p_{elec_n}) \quad (26)$$

This set of training values is got by solving “ N ” times the equations system in section 3.4 for different combinations of natural gas and electricity prices. Due to the complexity of the system, it cannot be directly solved. Every training value has to be calculated by another iterative process assuming a starting optimal power for the stated prices and then adjusting it to the best solution minimizing the cost by a GRG method.

The ANN is then trained with this set of values up to minimize the error of difference between the correlated cost and the actual one.

Finally, the correlated function is:

$$C_{o4f} = b2 + W2(1) \cdot e^{b1(1)} \cdot P_{NG}^{W1(1,1)} \cdot P_{elec}^{W1(2,1)} + W2(2) \cdot e^{b1(2)} \cdot P_{NG}^{W1(1,2)} \cdot P_{elec}^{W1(2,2)} \quad (27)$$

Energy is calculated for each optimized GT power as described in section 3.4.

4. Results

4.1 Primary energy for a conventional factory

Different price scenarios have been tested with the following results in table 3.

Table 3. Annual cost and primary energy in a conventional factory for different scenarios of energy prices

p_{NG} €/kWh	p_{elec} €/kWh	C_{ef} €/year	W_{ef} kWh/year
0.023	0.08	1,873,095	
0.023	0.09	1,986,557	
0.023	0.1	2,100,019	
0.023	0.11	2,213,481	
0.023	0.12	2,326,943	
0.024	0.08	1,915,069	
0.024	0.09	2,028,531	
0.024	0.1	2,141,993	
0.024	0.11	2,255,455	
0.024	0.12	2,368,917	
0.025	0.08	1,957,043	
0.025	0.09	2,070,505	
0.025	0.1	2,183,967	74,391,610
0.025	0.11	2,297,429	
0.025	0.12	2,410,890	
0.026	0.08	1,999,017	
0.026	0.09	2,112,479	
0.026	0.1	2,225,941	
0.026	0.11	2,339,403	
0.026	0.12	2,452,864	
0.027	0.08	2,040,991	
0.027	0.09	2,154,453	
0.027	0.1	2,267,915	
0.027	0.11	2,381,377	
0.027	0.12	2,494,838	

4.2 Primary energy for an optimized factory with MED

The thermal power required for the MED is shown in table 4.

Table 4. Q_{MED} requirement

HEAT TO DISTILLATE FLUSHING WATER		
mW	7.62E-03	m ³ /s
h_{MED}	2.40E+05	kJ/m ³
Q_{MED}	1,829	kW

And the different price scenarios have been tested with the following results in table 5.

Table 5. Annual cost and primary energy in an optimized factory with a MED to save the water for different scenarios of energy prices

p_{NG}	p_{elec}	C_{otr}	W_{otr}
€/kWh	€/kWh	€/year	kWh/year
0.023	0.08	2,241,553	
0.023	0.09	2,355,015	
0.023	0.1	2,468,477	
0.023	0.11	2,581,938	
0.023	0.12	2,695,400	
0.024	0.08	2,299,547	
0.024	0.09	2,413,009	
0.024	0.1	2,526,470	
0.024	0.11	2,639,932	
0.024	0.12	2,753,394	
0.025	0.08	2,357,541	
0.025	0.09	2,471,002	
0.025	0.1	2,584,464	90,411,505
0.025	0.11	2,697,926	
0.025	0.12	2,811,388	
0.026	0.08	2,415,534	
0.026	0.09	2,528,996	
0.026	0.1	2,642,458	
0.026	0.11	2,755,920	
0.026	0.12	2,869,382	
0.027	0.08	2,473,528	
0.027	0.09	2,586,990	
0.027	0.1	2,700,452	
0.027	0.11	2,813,914	
0.027	0.12	2,927,376	

4.3 Heat required pre-heating the combustion air of the kiln

The hottest configuration of air mixtures to pre-heat the inlet-air and the result of the feeding air to the kiln is shown in table 6.

Table 6. Thermodynamic conditions of pre-heated air

PRE_HEATING POWER FOR KILN INLET-AIR			
Air mixture	kW _t	kg/s	°C
From kiln rapid cooling	373	0.45	868
From GT exhausting	333	0.71	500
Pre-heated air	706	1.16	643

4.4 Cost and primary energy for an optimized factory given the power of the gas turbine as an average of the power along the year

The electrical averaged power for the year resulted to be 1,295 kW from the annual demand curve. This power is assumed for a prior approximation of the GT size within different price scenarios with the following results shown in table 7.

Table 7. Annual cost and primary energy in an improved factory with a GT sized as averaged electrical power for the period of a year for different scenarios of energy prices

p_{NG}	p_{elec}	C_{o2f}	W_{o2f}
€/kWh	€/kWh	€/year	kWh/year
0.023	0.08	1,488,513	
0.023	0.09	1,500,987	
0.023	0.1	1,513,462	
0.023	0.11	1,525,937	
0.023	0.12	1,538,411	
0.024	0.08	1,548,892	
0.024	0.09	1,561,366	
0.024	0.1	1,573,841	
0.024	0.11	1,586,316	
0.024	0.12	1,598,790	
0.025	0.08	1,609,271	
0.025	0.09	1,621,745	
0.025	0.1	1,634,220	63,943,118
0.025	0.11	1,646,694	
0.025	0.12	1,659,169	
0.026	0.08	1,669,649	
0.026	0.09	1,682,124	
0.026	0.1	1,694,599	
0.026	0.11	1,707,073	
0.026	0.12	1,719,548	
0.027	0.08	1,730,028	
0.027	0.09	1,742,503	
0.027	0.1	1,754,978	
0.027	0.11	1,767,452	
0.027	0.12	1,779,927	

4.5 Energy optimization. The power of the optimal gas turbine to minimize the primary energy

Section 3.5 describes the way to find the best technical configuration disregarding economic considerations but only primary energy. Table 8 shows the actual and LSA correlated values for primary energy versus GT power, so as the corresponding errors.

Table 8. Primary energy as a function of GT power (actual and correlated values).

N_{GT} kW	W_{o3f} kWh	LSA kWh	error p.u.
700	74,968,465	75,103,199	0.0018
800	72,519,158	72,382,421	-0.0019
900	70,214,336	70,066,388	-0.0021
1,000	68,118,017	68,101,956	-0.0002
1,100	66,348,951	66,449,387	0.0015
1,200	64,951,103	65,079,821	0.0020
1,300	63,897,086	63,972,752	0.0012
1,400	63,104,342	63,113,507	0.0001
1,500	62,546,445	62,490,717	-0.0009
1,600	62,203,965	62,093,793	-0.0018
1,700	61,987,185	61,910,405	-0.0012
1,800	61,920,403	61,923,956	0.0001
1,900	62,063,440	62,111,054	0.0008
2,000	62,402,689	62,438,992	0.0006
2,100	62,836,708	62,863,222	0.0004
2,200	63,303,829	63,324,831	0.0003
2,300	63,788,286	63,748,013	-0.0006
Minimum=	61,920,403	61,910,405	-0.0021
Maximum=	74,968,465	75,103,199	0.0020
Average=	65,127,906	65,127,907	0.0000

Table 9 provides the calculated coefficients for the polynomial function

Table 9. Coefficients of the polynomial function by a LSA

Polynomial 5th	Coefficients
a0=	1.1393E+08
a1=	-9.4609E+04
a2=	8.0618E+01
a3=	-4.4781E-02
a4=	1.5052E-05
a5=	-2.1037E-09

Fig.6 represents both, actual and correlated functions:

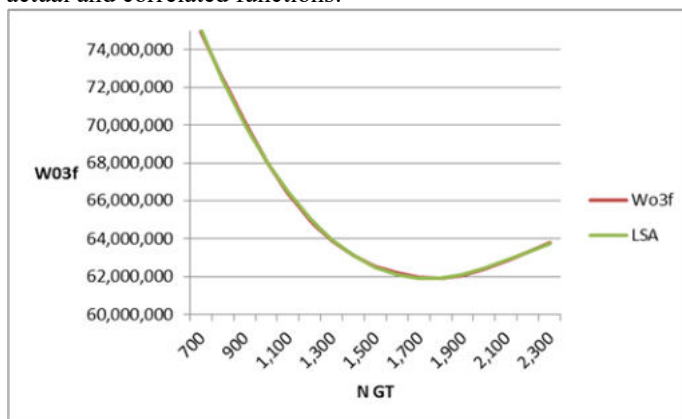


Fig. 6. Primary energy as a function of $N_{elec GT}$

Table 10 shows the difference the difference between primary energy calculated either by LSA or GRG methods.

Table 10. Primary energy for different GT powers (actual and LSA)

MINIMUM OF THE PRIMARY ENERGY			
	by LSA	by GRG	
$N_{elec\ GT\ optimal}$	1,742	1,785	kW
$DW_{of}/DN_{elec\ GT}$	1.00E-03		
W_{of}	61,893,275	61,917,783	kWh/year

4.6 Cost and primary energy for an optimized factory where the GT power is selected to optimize the cost for different price scenario

Different price scenarios have been tested with the following results in table 11. The primary energy is varying as the power of the turbine is changed to optimize the cost. Table 7 shows these values which have been used to define the ANN.

Table 11. Annual cost and primary energy in an improved factory with a GT optimally sized to minimize the cost for the period of a year for different scenarios of energy prices

P_{NG}	P_{elec}	$N_{elec\ GT}$	C_{of}	W_{of}
€/kWh	€/kWh	kW	€/year	kWh/year
0.023	0.08	1,815	1,425,785	61,927,797
0.023	0.09	1,831	1,426,710	61,940,908
0.023	0.1	1,844	1,427,509	61,955,793
0.023	0.11	1,855	1,428,201	61,971,244
0.023	0.12	1,863	1,428,818	61,984,277
0.024	0.08	1,808	1,487,407	61,923,791
0.024	0.09	1,826	1,488,398	61,936,271
0.024	0.1	1,838	1,489,243	61,948,486
0.024	0.11	1,850	1,489,978	61,963,905
0.024	0.12	1,859	1,490,627	61,977,557
0.025	0.08	1,802	1,549,010	61,921,138
0.025	0.09	1,820	1,550,066	61,931,439
0.025	0.1	1,833	1,550,956	61,942,958
0.025	0.11	1,845	1,551,736	61,957,088
0.025	0.12	1,855	1,552,421	61,971,244
0.026	0.08	1,795	1,610,592	61,918,964
0.026	0.09	1,813	1,611,712	61,926,717
0.026	0.1	1,829	1,612,653	61,938,972
0.026	0.11	1,840	1,613,476	61,950,836
0.026	0.12	1,851	1,614,200	61,965,329
0.027	0.08	1,790	1,672,154	61,918,090
0.027	0.09	1,808	1,673,332	61,923,792
0.027	0.1	1,824	1,674,334	61,934,581
0.027	0.11	1,835	1,675,198	61,945,107
0.027	0.12	1,846	1,675,961	61,958,407

4.7 Economical optimization. The power of the optimal gas turbine to minimize the annual cost as a function of the prices of the energy.

The resultant set of training values for the ANN is taken from table 7. With these values, the coefficients obtained after training the ANN were as shown in table 12.

Table 12. Coefficients of the ANN that represents the bivariate function $C_{\text{otf}}=f(P_{\text{NG}},P_{\text{elec}})$

ANN Coefficients	
W1(1,1)=	0
W1(1,2)=	0
W1(2,1)=	0
W1(2,2)=	0.0708528
W2(1)=	1.4165484
W2(2)=	4.1788884
b1(1)=	0
b1(2)=	6.2417886
b2=	6.926885

The maximum error with these only 25 training values resulted 0.75%.

5. Discussion

As defined in the introduction section, the target of this research is to show the way to reduce the energy and water consumption in the particular field of the sanitary-ware industry. The optimization has been carried out in different stages in order to understand how the reductions are achieved. From the conventional factory where no reduction measures have been carried out, the following steps have been simulated to quantify the saves of water and energy:

1. In the first stage, the water reduction has been approached by increasing the thermal power to distillate the water in order to be re-used.
2. In the second stage, a CHP has been introduced in the system to reduce the total primary energy. As a first approximation the GT has been sized as the electrical average for the year consumption.
3. In the third stage, the GT has been optimized to minimize the total consumed primary energy.
4. In a fourth stage, as an alternative, the optimization of the GT has been carried out from the economical point of view depending on the price of the energy where the best GT may differ from the energy optimal GT. It is important to reduce the primary energy from a sustainable point of view for the manufacturing companies. Nevertheless, it has to be accomplished within defined economical parameters. Otherwise, the sustainability of the company is jeopardized.

An overview table 13 has been made to better compare the results. Minimum, maximum and averaged values have been compared in order to calculate coherent decreases. Some of the magnitudes are not ranged, thus minimum, maximum and averaged are the equivalent:

Table 13. Comparison of reduction results

CONSUMPTION COMPARISON		N _{GT min}	N _{GT max}	N _{GT average}	W _{min}	W _{max}	W _{average}	C _{min}	C _{max}	C _{average}
		kW			kWh/year			€/year		
Reference	Conventional factory	--	--	--	74,391,610	74,391,610	74,391,610	1,873,095	2,494,838	2,183,967
Stage 1	MED Distiller	--	--	--	90,411,505	90,411,505	90,411,505	2,241,553	2,927,376	2,584,464
Stage 2	GT by averaged power	1,295	1,295	1,295	63,943,118	63,943,118	63,943,118	1,488,513	1,779,927	1,634,220
Stage 3	GT by energy optimization	1,785	1,785	1,785	61,917,783	61,917,783	61,917,783	1,426,022	1,677,518	1,551,770
Stage 4	GT by cost optimization	1,790	1,863	1,831	61,918,090	61,984,277	61,945,388	1,425,785	1,675,961	1,550,819

Fig.7 shows these data graphically. It can be seen the initial increase of both energy and cost to save water. But, on the other hand it yields benefits when a CHP is implanted.

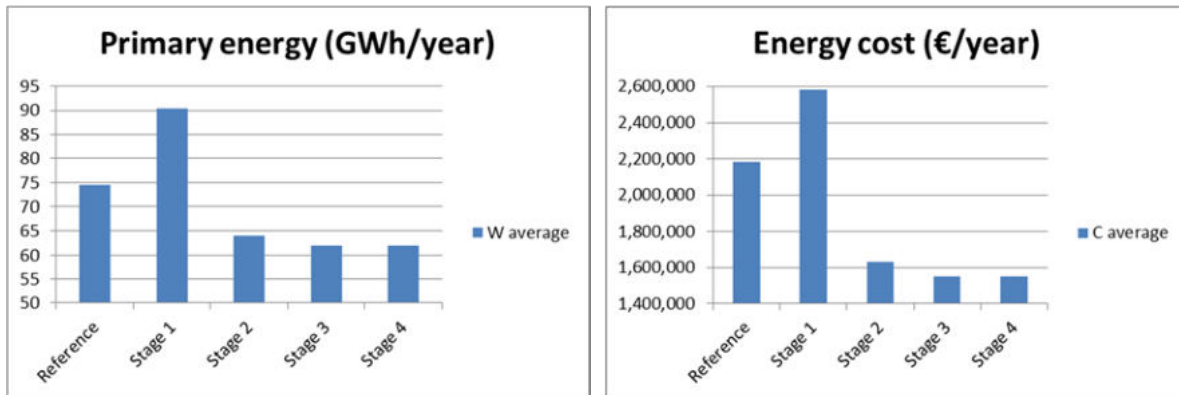


Fig.7 (a) Primary energy consumption (b) Energy cost for the different configurations of the factory

Starting from a conventional factory that disregards the savings, it has been stated that water can be saved at the expense of a 21.53% increase of thermal energy to distillate it with a MED. However, when the CHP is included within the system, there is a reduction between 14.05% and 16.77% regarding the primary energy yet there is a water saving. Table 14 shows the reductions

Table 14. Comparison of percentage reduction in regard to conventional factory

INCREASE COMPARED TO CONVENTIONAL		W _{min}	W _{max}	W _{average}	C _{min}	C _{max}	C _{average}
Stage 1	MED Distiller	21.53%	21.53%	21.53%	19.67%	17.34%	18.34%
Stage 2	GT by averaged power	-14.05%	-14.05%	-14.05%	-20.53%	-28.66%	-25.17%
Stage 3	GT by energy optimization	-16.77%	-16.77%	-16.77%	-23.87%	-32.76%	-28.95%
Stage 4	GT by cost optimization	-16.77%	-16.68%	-16.73%	-23.88%	-32.82%	-28.99%

Fig. 8 shows graphically these values compared each other

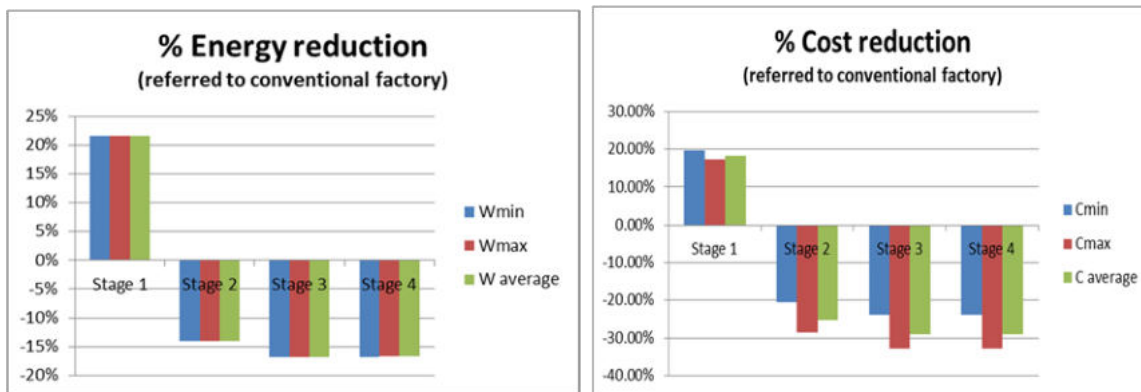


Fig.8 (a) % Primary energy consumption (b) Energy cost for the different configurations of the factory when compared with conventional factory

When comparison is made with regard to a concerned factory which has stated measures to save water, the reductions of energy are really important by including the CHP within the system as shown in table 15.

Table 15. Comparison of percentage reduction in regard to Stage 1 with MED Distiller

INCREASE COMPARED TO Stage 1		W_{min}	W_{max}	$W_{average}$	C_{min}	C_{max}	$C_{average}$
Stage 2	GT by averaged power	-29.28%	-29.28%	-29.28%	-33.59%	-39.20%	-36.77%
Stage 3	GT by energy optimization	-31.52%	-31.52%	-31.52%	-36.38%	-42.70%	-39.96%
Stage 4	GT by cost optimization	-31.52%	-31.44%	-31.49%	-36.39%	-42.75%	-39.99%

The reduction of primary energy by CHP configuration is almost one third of the energy consumed by factory with MED. Cost is above one third of the factory with MED

Fig. 9 clarifies these data.

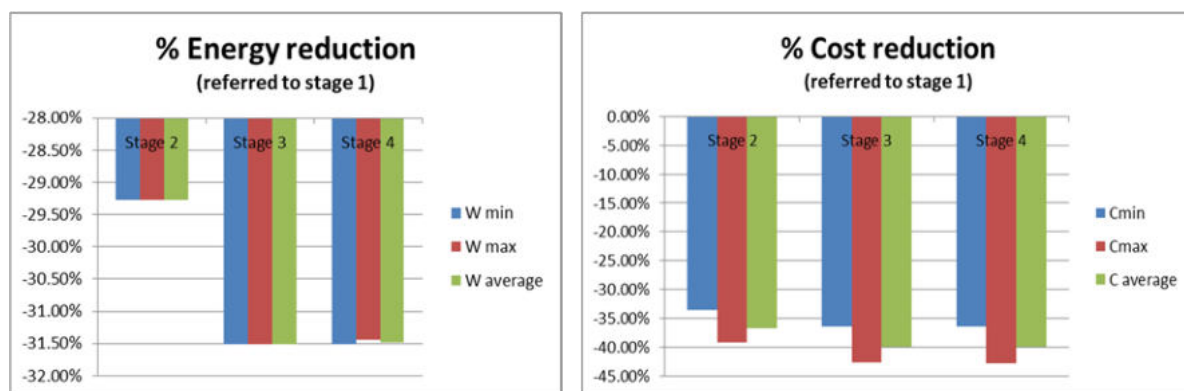


Fig.9 (a) % Primary energy consumption (b) Energy cost for the different configurations of the factory when compared with factory equipped with MED

6. Conclusions

This research aims to show how to apply a map of resources within a conventional factory of sanitary-ware to quantify the achievable reductions of water and primary energy. In this regard it contributes to provide a practical tool to design an efficient factory from the perspectives of energy and water. Thus, by reduction of primary energy it is improved the sustainability of the industry since the associated CO₂ emissions are as well reduced.

The most remarkable results are:

- The research describes the configuration of equipment to optimize the consumption of water and energy and the way its parts are energetically link each other.
- The flows of heat recovered are quantified to diversify the available heat into the different heat sinks depending on the heat requirements at any time.
- It has been shown that water reduction implies an increase of energy. However, with the application of a CHP, the global energy can be significantly reduced up to 31%.
- The calculated ANN to correlate the power of the GT with the prices of the energy is a practical tool to find the best design when deciding the new construction of a factory given the most probable scenario of energy price.
- Though the energy reduction is fixed after the design of the plant is done, the cost is varying constantly with the price of the energy. Usually, price variation is always upwards, thus the cost reduction is increasing as the prices rise.

Limitations and future studies can be mentioned as:



- The study has been focused on the tunnel kiln as it is operated on a continuous basis. Shuttle kiln operates in cycles from ambient to process to ambient temperature. This procedure makes difficult to take advantage of recovered heat from it. Nevertheless, it may result interesting to add this source of heat to the proposed system of this research to increase energy reductions

- The scope of this research includes the cost reduction calculation. However, an important investment has to be carried out to apply the reduction technique. It would be worth to include the investment expenses in the study to analyze the feasibility of the project.
- The water is becoming a scarce resource, thus the price of water has a growth trend. The study has not taken it into account but it is worth to include its cost together with the energy cost to better accomplish economical optimization and make more feasible the investment.
- The pre-heating of the inlet air to the kiln has been limited to the temperature provided by the recovered heats. However, a greater inlet temperature would decrease the gas consumption of the kiln. Alternative source of high quality heat might be studied to improve the efficiency of the kilns.

Sustainability is nowadays a key point to design and exploit manufacturing plants. Hence, resources consumption, environmental impacts and the way both concepts are linked for a cleaner production have to be taken into account in any industrial and economic decision to be made about manufacturing facilities. This research aims to support such an effort to be developed.

References

- [1] C. Cuviella-Suárez, A. Colmenar-Santos, D. Borge-Diez, and Á. López-Rey, "Management tool to optimize energy and water consumption in the sanitary-ware industry," *J. Clean. Prod.*, vol. 197, Part 1, pp. 280–296, Oct. 2018.
- [2] "CERAMIN PROJECT:Energy saving concepts for the European ceramic industry," *Intelligent Energy Europe*. [Online]. Available: /energy/intelligent/projects/en/projects/ceramin. [Accessed: 02-Aug-2018].
- [3] C. Cuviella-Suárez, A. Colmenar-Santos, and M. Castro-Gil, "Tri-generation system to couple production to demand in a combined cycle," *Energy*, vol. 40, no. 1, pp. 271–290, Apr. 2012.
- [4] A. Lazzaretto and T. Andrea, "Analytical and Neural Network Models for Gas Turbine Design and Off-Design Simulation," *Int. J. Thermodyn.*, vol. 4, pp. 173–182, Dec. 2001.
- [5] T. Lecomte, "Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants - Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control)," p. 986.
- [6] Artin Hatzikioseyan and Pavlina Kousi, "Modelling and thermodynamic analysis of a multi effect distillation (med) plant for seawater desalination (PDF Download Available)," *ResearchGate*, Jan. 2003.

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 218 de 231

ANEXO XIII: “Sanitary-ware factories: heat recovery strategies to optimize energy and water consumption”. CERTIFICADO DE PUBLICACIÓN



Certificate of Participation

This is to certify that the below mentioned authors have successfully participated in The International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability.

The presented Paper was published in a Journal Special Issue for TMREES Conference Series

Author/s: Antonio Colmenar-Santos, Carlos Cuvilla, David Borge-Diez and Enrique Rosales-Asensio

Title: Sanitary-ware factories: heat recovery strategies to optimize energy and water consumption

**TMREES18 International Conference
Athens-Greece / September 19 to 21, 2018.**

Paper Publisher: Elsevier, Energy Procedia (ISSN: 1876-6102)





General Chairs :

Chafic-T Salame Michel Aillerie Panagiotis Papageorgas

Program Chairs

Adawiya J. Haidar Akram Jabur Christelle Perilhon Georges Vokas

Adawiya J. H Akram Jabur

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 219 de 231

ANEXO XIV: “Exergoeconomics in the sanitary-ware industry to reduce energy and water consumptions” COPIA DE LA PUBLICACIÓN

Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability

TMREES19Gr

Athens, Greece • 4–6 September 2019

Editors • Adawiya J. Haider, Akram R. Jabur,
Chafic-Touma Salame and Georgios Vokas



Exergoeconomics in the sanitary-ware industry to reduce energy and water consumptions

Cite as: AIP Conference Proceedings 2190, 020061 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5138547>
Published Online: 11 December 2019

Carlos Cuviella-Suárez, Jorge Juan Blanes Peiró, David Borge-Diez, and Antonio Colmenar-Santos



View Online



Export Citation

Lock-in Amplifiers
up to 600 MHz



Zurich
Instruments



Exergoeconomics in the Sanitary-Ware Industry to Reduce Energy and Water Consumptions.

Carlos Cuviella-Suárez ^{1, a)}, Jorge Juan Blanes Peiró ^{2, b)}, David Borge-Diez ^{2, c)},
Antonio Colmenar-Santos ^{1, d)}

¹ Department of Electrical, Electronic and Control Engineering, UNED. Juan del Rosal, 12 – University City. 28040 Madrid – Spain

² Department of Electrical and Systems and Automatic Engineering. University of León, School of Industrial and Computer Engineering, Campus of Vegazana, s/n, 24071 León, Spain

^{a)}Corresponding author: carlos.cuviella@roca.net

^{b)}jorge.blanes@unileon.es

^{c)} dbord@unileon.es

^{d)} acolmenar@icec.uned.es

Abstract. Ceramic sanitary-ware manufacturing is an industrial sector within the ceramic field that globally demands more than 100,000 TJ of primary energy and 21,000 dam³ of water per year. This research aims to quantify the reachable level of improvement within this industrial field by application of thermal engineering through the different thermal processes along the manufacturing line and the way to apply it to recover the water of the process and reduce the total consumption of primary energy. Advanced exergetic analysis has been the selected technique applied to all thermal sub-processes that comprise the overall process. The novelty of this research lays on the application of heat recovery through the different thermal processes to minimize the global consumption of both, energy and water for the specific field of the sanitary-ware manufacturing where no research has been approached in this regard. This research shows that 20% of the inlet exergy in a conventional factory is recoverable and the way to achieve it by an optimized factory which saves 3% of primary energy and 100% of the flushing water for molds.

Keywords: Ceramic industry; Energy reduction; Water saving; Factory design optimization, Multi-effect distillation; Recovered heat; Exergetic analysis, thermal processes, thermal engineering.

ABBREVIATIONS

IR ₃	Infinitely reusable, recyclable, and renewable industrial ecosystem
MED	Multi-effect distillation
CF	Conventional factory
NG	Natural gas
GT	Gas turbine
HVU	Heat and ventilation unit
CHPP	Combined heat and power plant
OF	Optimized factory
PP	Power plant
BO	Boiler
WD	Ware dryer
TK	Tunnel kiln

SK	Shuttle kiln
FL	Flushing water
LHV	Lowest heat value
m.u.	Monetary unit
R.O.	Reverse Osmosis
p.u.	Per unit

FORMULAE

\dot{m}_{in}	Flow mass inwards (kg/s)
\dot{m}_{out}	Flow mass outwards (kg/s)
Q_{in}	Heat supplied to the system (kW)
h_{in}	Specific enthalpy inwards (kJ/kg)
W_{out}	Electrical power (kW)
h_{out}	Specific enthalpy outwards (kJ/kg)
Ex_f	Exergy of fuel (kW)
Ex_{in}	Exergy inwards (kW)
Ex_p	Exergy of product (kW)
Ex_{out}	Exergy outwards (kW)
Ex_l	Exergy of losses (kW)
Ex_d	Exergy destroyed (kW)
Ex_{gas}	Exergy of natural gas (kW)
q_p	Specific heat capacity (kJ/kg/K)
T	Temperature of the flow (K)
T_0	Temperature of dead state (K)
R	Ideal gas constant (J/mol/K)
P	Pressure (N)
P_0	Pressure of dead state (N)
$Ex_{liquid,solid}$	Exergy of a liquid or solid flow (kW)
v_m	Specific volume (m ³ /kg)
Ex_{NG}^{ch}	Specific chemical exergy of natural gas (kJ/kg)
LHV_{NG}	Low heat value of natural gas (kJ/kg)
n_H	Mole rate of hydrogen (mol)
n_C	Mole rate of carbon (mol)
η_{en}	Energy efficiency (p.u.)
η_{ex}	Exergy efficiency (p.u.)
C_{in}	Cost of exergy inwards (m.u.)
C_{out}	Cost of exergy outwards (m.u.)
c_{in}	Specific cost of exergy inwards (m.u./kW)
c_{out}	Specific cost of exergy outwards (m.u./kW)
γ_d	Exergy destruction ratio (p.u.)
Ex_{ft}	Exergy of the total fuel (kW)
r	Relative cost difference of exergy (p.u.)
c_p	Specific cost of exergy of product (m.u./kW)
c_f	Specific cost of exergy of fuel (m.u./kW)
η_{el}	Electrical efficiency (p.u.)
η_{th}	Thermal efficiency (p.u.)
E_{NG}	Energy of Natural Gas (kW)
E_f	Energy of fuel (kW)
E_p	Energy of product (kW)
E_{in}	Energy inwards (kW)
E_{out}	Energy outwards (kW)
Ex_{des}	Exergy destroyed (kW)
Ex_{rec}	Recoverable exergy (kW)

INTRODUCTION

The cost of thermal energy represents one of the largest items of production cost of ceramic tiles and the CO₂ emissions resulting from industrial activity are very significant. Any improvement in the efficiency of thermal processes will result in a substantial reduction of costs of manufacturing and CO₂ emissions. On the other hand, water is rising as a scarce resource though the impact on the cost is not so high by now. Given the growing importance of these issues, the environment and competitiveness, during the last years there has been a significant amount of information on the consumption of thermal energy in the sector of ceramics. In this scenario, it is essential to obtain information that allows establishing correlations between the characteristics of the industry (manufacturing process, characteristics of the facilities, operating conditions, main raw materials, etc.) and the thermal consumption in each stage of the process and the total emissions of CO₂. There is much research regarding industrial processes from the exergy point of view of exergy analysis. Most of this research aims to individual single industrial processes. However, there is little research concerning a complete industrial sector [1] from that perspective. Exergoeconomic analysis is a powerful tool to find opportunities of energy reduction and therefore, cost savings. Application of thermal engineering to the overall thermal process and the thermal links between sub-processes for manufacturing sanitary-ware is the most practical way to figure out the most suitable reduction of energy consumption. The authors have found much research regarding ceramic industry in general and tile manufacturing in particular, but little articles about sanitary-ware industry from the perspective of energy and water consumption. Sanitary-ware, as any ceramic process implies great amounts of energy and water along the manufacturing line. The novelty of this research lays on the specificity of the sanitary-ware industrial sector from the exergoeconomic perspective. It has not been approached from this perspective before. This study can be considered as a practical tool to identify the chances of energy and water reduction, quantify the avoidable exergy destruction and recover this exergy in order to reduce the global energy requirement so as the water need by re-utilization via distillation [2]. Any action aiming reduction of resources is advisable to keep a sustainable industry and minimizing the environmental impact [3]. As stated in [4], the IR3 concept proposes an infinitely reusable, recyclable, and renewable industrial ecosystem with no waste to download. By means of an exergoeconomic analysis of manufacturing, the authors further the previous energy assessment by Cuviella et al. in [5] optimizing required resources within the sanitary-ware manufacturing global process. Exergetic advanced analysis shows the chances to reduce avoidable exergy destruction furthering the energy approach [6] and benefit from it by water recycling.

MATERIALS AND METHODS

This study is based on the factory conception in [5] for the resin molds where 112,000 m³/year of water are required to flush the molds. During this process salts are added to the water so it has to be rejected. It would be reused when salt traces were removed as stated in [2] by a Multi-effect distillation (MED) [7]. The solving procedure starts from the conventional factory with an exergoeconomic analysis to quantify the exergy that can be recovered and to identify the possible ways to carry it out. Then the configuration of the factory is optimized by means of thermal engineering to recover residual heat from some sub-processes to be profited in other ones, so as to distillate water. Finally, both configurations are compared in order to show the global savings. The solving procedure is shown in fig 1 as follows:

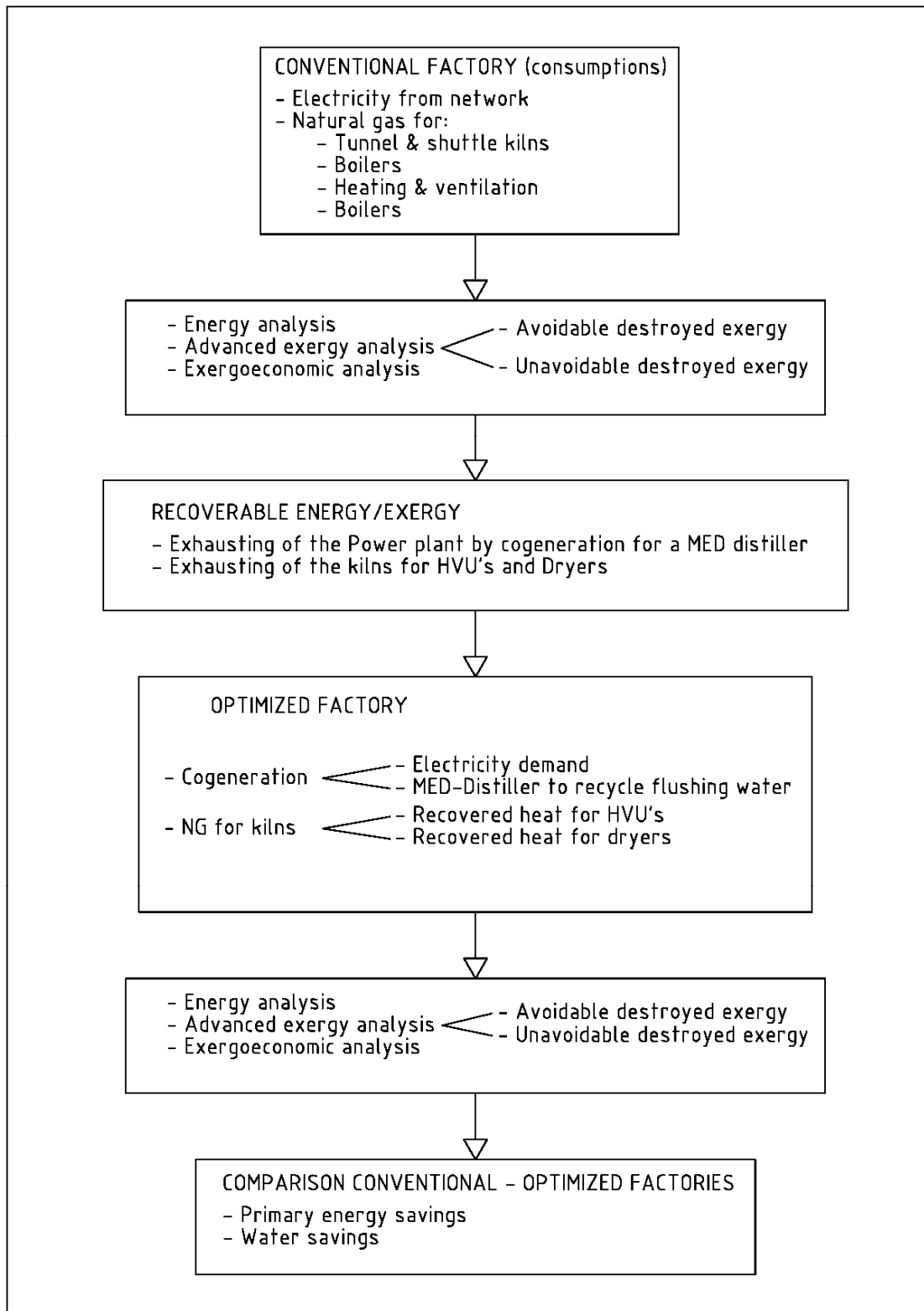


FIGURE 1. Flow-chart of solving procedure.

In a conventional factory (CF), all the thermal processes are led by natural gas (NG) supply, electricity from the network, through a conventional power plant, and water from the network, as fig 2 shows:

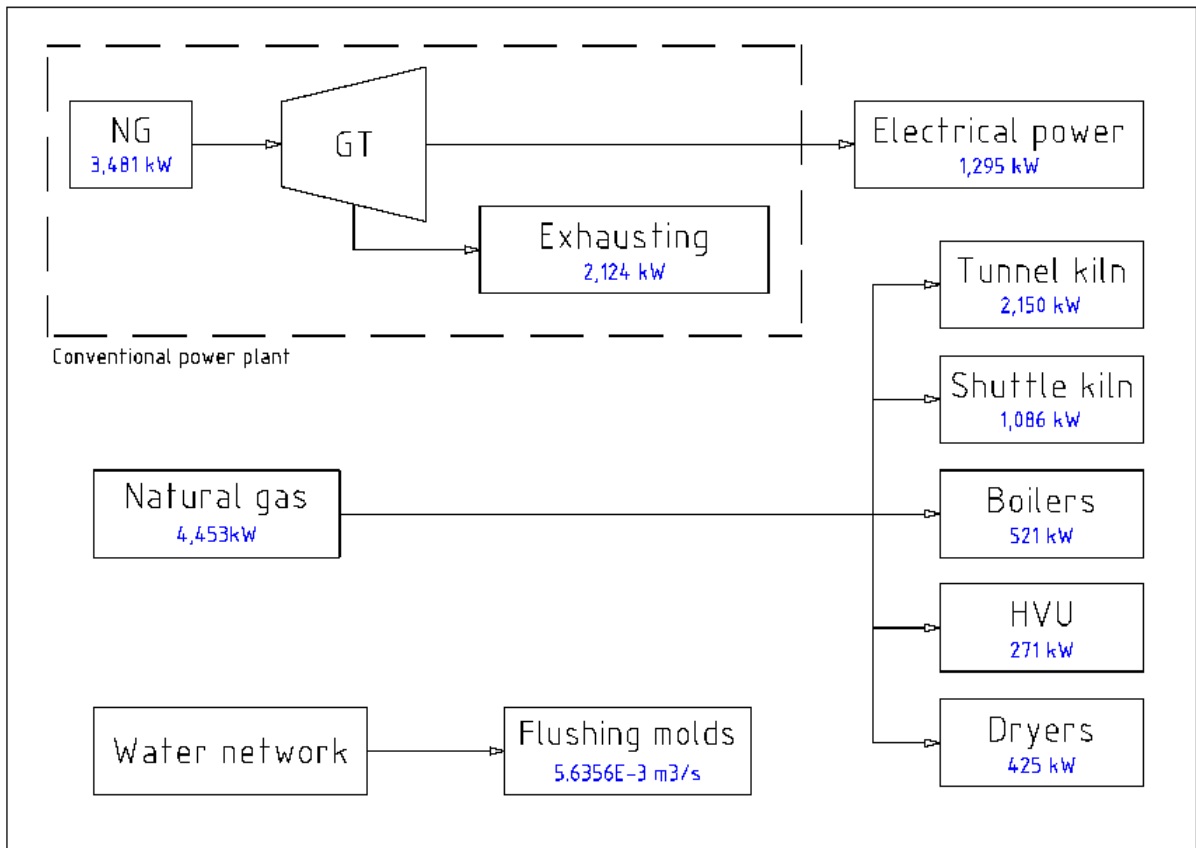


FIGURE 2. Thermal, electrical power and water requirement of a CF.

On the other hand, all residual heat is delivered to the atmosphere carrying certain degree of exergy which might be profited for other purposes when properly analyzed [8].

As suggested in [5], the proposal of this research is to rearrange the requirements by means of a combined heat and power plant (CHPP) which supplies the electrical power and allows for extra heat to distillate the water from flushing molds to be re-utilized. Besides, heat from the exhausting of the kilns is recovered to preheat airs into the kilns and to supply thermal consumers by the factory as fig.3 shows:

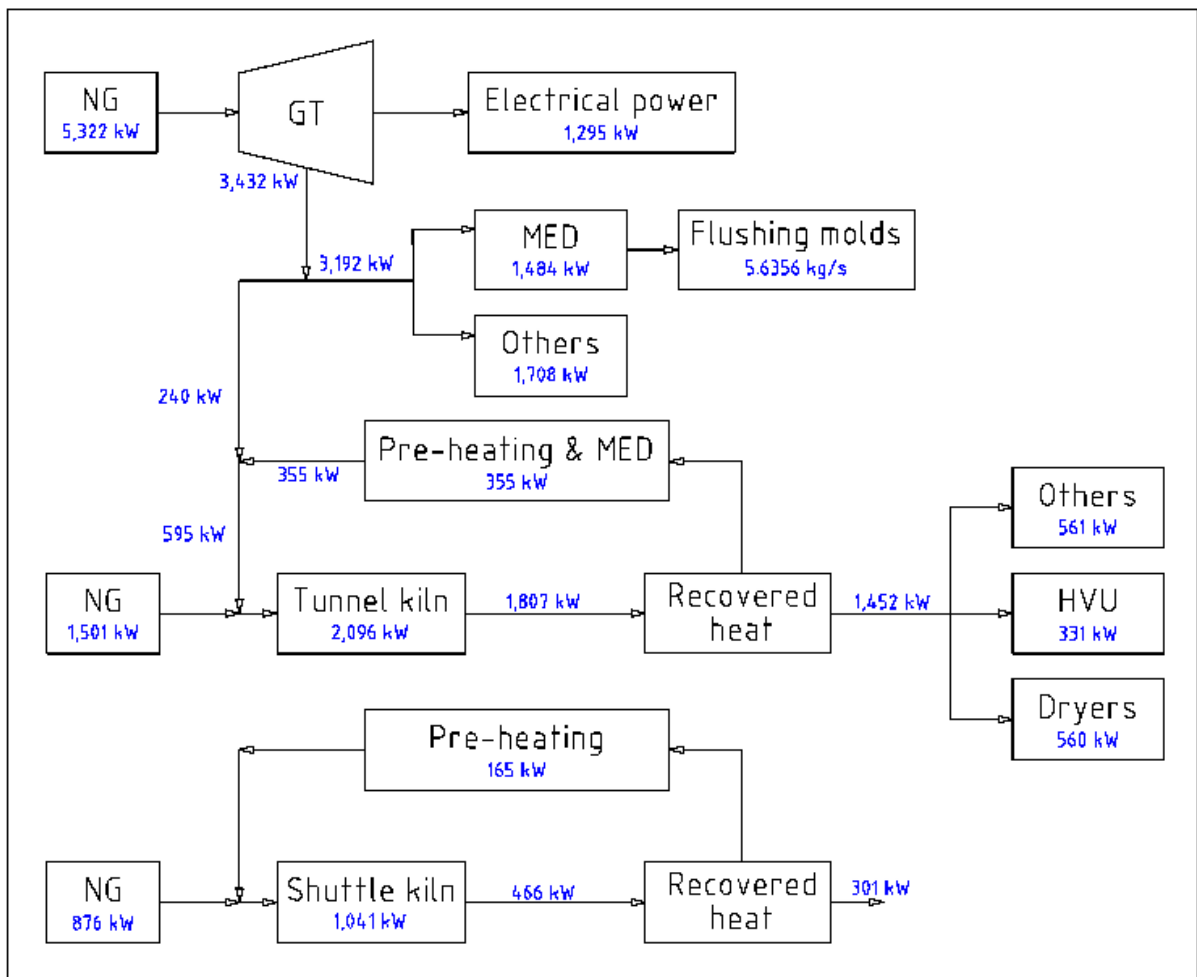


FIGURE 3. Thermal, electrical power, and water requirement of an OF.

Both factory conceptions are compared by advanced exergy analysis in order to identify and quantify the exergoeconomic reduction when the CF is optimized into an optimized factory (OF). Energy and exergy analysis of equipment has been carried out individually in order to characterize every one of them from the thermodynamic point of view establishing the complete map of flows among them for the two configurations. The exergetic analysis has been computed for standard conditions of efficiency so as for the best possible conditions in order to establish the unavoidable destroyed exergy regarding both factory configurations. After this, exergoeconomic analysis has been achieved to demonstrate that both, primary energy and water consumption can be cut down at once deriving an important environmental and economic improvement which implies a fundamental impact of sustainability for this industrial sector.

With regard to this study, the system is explained as follows [9]:

- A barbotine composed of water and ceramic raw materials is cast into the resin molds where part of the water is eliminated by filtration through the porous resin. This mold has to be flushed with warm and salts free water to get it cleaned. This water is provided after a reverse osmosis treatment to the boilers where it is warm up.
- Raw molded piece is taken out and left within the casting hall to set the remaining humidity before it can be taken to the dryer. The hydrothermal environment has to be kept within stated range by means of heating ventilation units (HVU's).
- After that, the ware is dried in the dryers where hydrothermal environment is again kept within stated range. Dryers have to take off the humidity of the ware before it is taken into the kiln.
- Finally, ware is put into the kiln to be fired. The purpose of the kiln is to rise the temperature of ware up to 1,523 K in order to produce the sintering of the ceramics and vitrification of the glaze. Later on, the ware

has to be cooled in a controlled manner to allow for the chemical processes within the ceramics. Ware firing uses to be an exothermic process so it is not clearly defined what can be set as product from the exergetic point of view unless recovered heat is profited. In this study, the firing process has been split into two semi-processes; heating and cooling. During heating process, NG plus recovered heats are set as fuel as shown in fig 4.

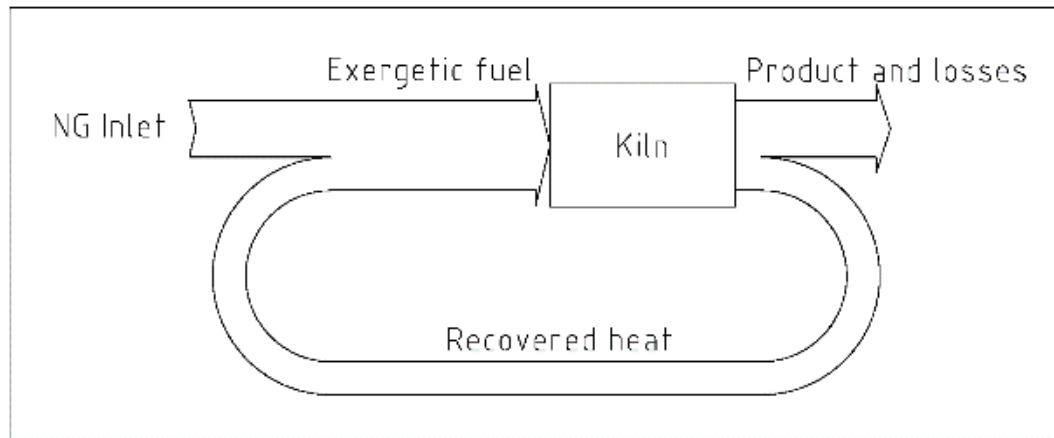


FIGURE 4. Scheme of fuel concept.

On the other hand, the exergy of the heated ware (and recovered heated air when appropriate) are set as product. During cooling process, the exergy within the ware is considered as fuel and heated air as product when recovered. Otherwise, there is not any exergetic product, so the efficiency of this semi-process is considered zero since there is nothing to be obtained from ware cooling but cooled ware which has no exergy increase itself [10] and [11].

CALCULATION

Modeling of the system has been approached from a thermal point of view for every sub-process within the overall process. It is based on mass, energy and exergy balances in every component of the system. The systems have been calculated as per the conventional concept of thermodynamic systems of combustion, heat exchange, heat transfer, etc. The efficiencies and losses are as well considered as usual in thermodynamic literature. The different components of the system and considered streams have been defined as follows:

- Power plant (PP):
Inlets: NG and air for combustion
Outlets: Exhausting, thermal losses and electrical power
- Boiler (BO):
Inlets: NG and air for combustion and water to be warmed up
Outlets: Exhausting, thermal losses and warm water
- Ware-dryer (WD):
Inlets: NG and air for combustion, drying air, atmospheric moisture, water from ware, sprayed water, ceramic ware, holding carts.
Outlets: Exhausting, thermal losses, water vapor, ceramic ware, holding carts
- Heating and ventilation unit (HVU):
Inlets: NG and air for combustion, drying air, water from ware.
Outlets: Exhausting, thermal losses, water vapor.
- Tunnel kiln. Heating section (TK-heating):
Inlets: NG and air for combustion, diffusion and excess air, ware supports, ceramic ware, holding carts
Outlets: Exhausting, thermal losses, ware supports, ceramic ware, holding carts.
- Tunnel kiln. Cooling section (TK-cooling):
Inlets: Rapid and slow cooling airs and contra-vec air, ware supports, ceramic ware, holding carts
Outlets: rapid and slow cooling airs, thermal losses, ware supports, ceramic ware, holding carts.
- Shuttle kiln. Heating section (SK-heating):

Inlets: NG and air for combustion, diffusion and injection air, ware supports, ceramic ware, holding carts
 Outlets: Exhausting, thermal losses, ware supports, ceramic ware, holding carts.

- Shuttle kiln. Cooling section (SK-cooling):
 Inlets: Diffusion, injection and cooling airs, ware supports, ceramic ware, holding carts.
 Outlets: rapid and slow cooling airs, thermal losses, ware supports, ceramic ware, holding carts.
- Gas turbine (GT):
 Inlets: NG and air for combustion.
 Outlets: Exhausting, thermal losses and electrical power.
- Multi-effect distiller (MED):
 Inlets: recovered heat gas and water.
 Outlets: Exhausting, thermal losses distillate and brine.
- Flushing water (FL):
 Inlets: Distillated water.
 Outlets: Flushing water and thermal losses.

According to the previous models, every component of the system has been individually analyzed in order to state and calculate their energy and exergy flows by identifying every thermodynamic variable as stated in fig. 5 and fig. 6. These figures represent the thermal map of both configurations by means of the thermodynamic flows through the overall thermal process.

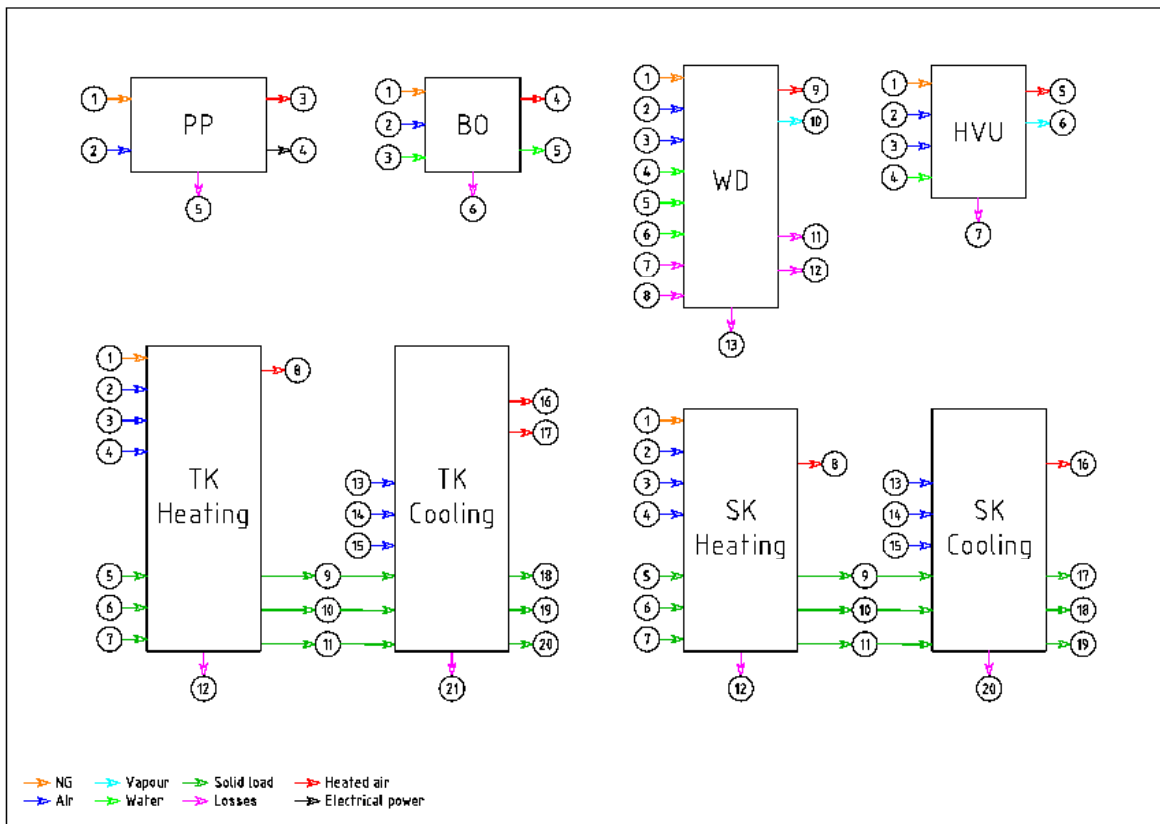


FIGURE 5. Flowchart in a CF

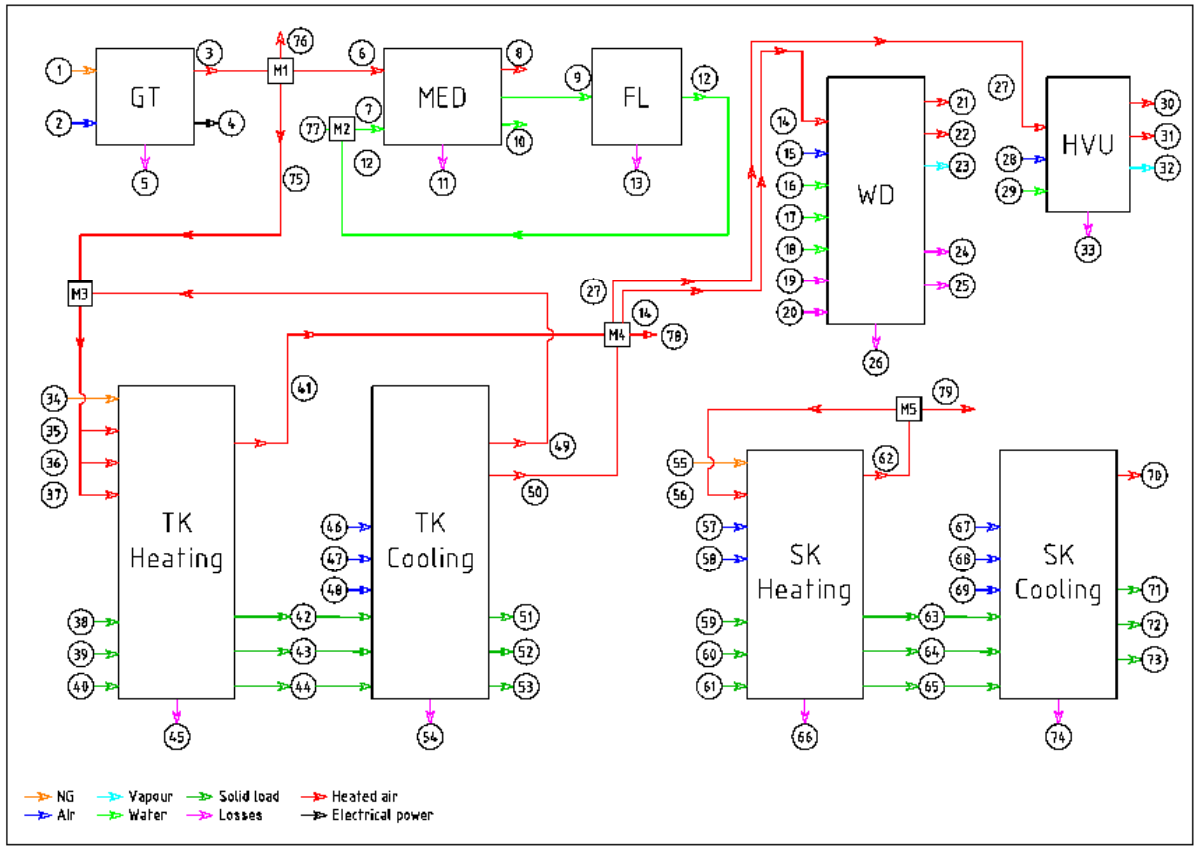


FIGURE 6. Flowchart in a OF

The set of mathematical formulae has been taken from [12]. This is a very suitable source since it regards a single ceramic process within the tile production. This procedure is applied in the scope of this research furthering the limits of the process involving the whole factory and transferring it to the ceramic sanitary-ware industry

Mass balance

$$\sum_{in} \dot{m}_{in} = \sum_{out} \dot{m}_{out} \quad (1)$$

Energy Balance

$$Q_{in} + \sum_{in} \dot{m}_{in} \cdot h_{in} = W_{out} + \sum_{out} \dot{m}_{out} \cdot h_{out} \quad (2)$$

Exergy balance

$$Ex_f + \sum_{in} Ex_{in} = Ex_p + \sum_{out} Ex_{out} + Ex_l + Ex_d \quad (3)$$

$$Ex_{gas} = \dot{m} \left\{ \left[q_p(T - T_0) - T_0 \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right] + RT_0 \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) \right\} \quad (4)$$

$$Ex_{liquid,solid} = \dot{m} \left\{ \left[q_p(T - T_0) - T_0 \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right] - v_m(P - P_0) \right\} \quad (5)$$

$$Ex_{NG}^{ch} = LHV_{NG} \cdot \left[1.033 + 0.0169 \frac{n_H}{n_C} - \frac{0.0698}{n_C} \right] \quad (6)$$

Efficiencies

$$\eta_{en} = \frac{\sum_{useful,output} E_i}{\sum_{input} E_i} \quad (7)$$

$$\eta_{ex} = \frac{\sum_{useful,output} Ex_i}{\sum_{input} Ex_i} \quad (8)$$

Exergoeconomic balance

$$C_{in} = C_{out} \quad (9)$$

$$C_{in} = \sum_{in} c_{in} \cdot Ex_{in} \quad (10)$$

$$C_{out} = \sum_{out} c_{out} \cdot Ex_{out} \quad (11)$$

$$y_d = \frac{Ex_d}{Ex_{ft}} \quad (12)$$

$$r = \frac{c_p - c_f}{c_f} \quad (13)$$

This set of formulae is applied to every component of both configurations, CF and OF to find out what are the balances of energy and exergy. In order to produce an advanced exergetic analysis, it is required to identify the “avoidable” and “unavoidable” exergies. They allow quantifying how far a system can be optimized [1] by improving the construction design. Table 1 shows the considerations taken into account in the scope of this research for optimal equipment versus standard or real one.

TABLE 1. Unavoidable conditions from efficiency differences

Equipment			Real conditions	Optimal conditions
PP	Electrical efficiency	h_{el}	0.37	0.40
BO	Thermal efficiency	h_{th}	0.90	0.95
	Perfect Combustion	air excess	0.10	0.00
TK	Better thermal insulation	thermal conductivity	100.00%	50.00%
	Better cooling efficiency	air flow	100.00%	75.00%
WD	Better thermal insulation	thermal conductivity	100.00%	50.00%
HVU	Better thermal insulation	thermal conductivity	100.00%	50.00%
	Perfect Combustion	air excess	0.10	0.00
SK	Better thermal insulation	thermal conductivity	100.00%	50.00%
	Better cooling efficiency	air flow	100.00%	75.00%

Comparing configurations, each other, they can be calculated savings when CF is transformed into OF. On the other hand, it can be seen as well, how the destroyed exergy can be decreased under best available conditions. This difference represents the “avoidable” destroyed exergy since it can be eliminated by changing technology. The residual exergy under best available conditions represents the “unavoidable” destroyed exergy which cannot be avoided within the state of the art at current.

RESULTS

Results of calculations are so extensive that have been included as appendix A. It includes four tables described as follows:

Table A.1 shows the results for every thermodynamic variable of the flows within the system for the CF from conventional exergy analysis. It states the mass and temperature of the flow, inlet and outlet flows of energy and

exergy and destroyed exergy so as the water required to be heated in the boilers to flush the molds. The inlet exergy for the CF is 8,240 kW and the outlet is 3,659 kW, hence the total destroyed exergy equals 4,581 kW. The exergy of NG is 8,179 kW and the water flushing flow is $5.64 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.

Table A.2 is analogous to A.1 for the OF. In this case, inlet exergy results 7,998 kW and the outlet 3,688 kW. The destroyed exergy is 4,310 kW. The exergy of NG is 7,936 kW. The flushing water appears as well in this table, but at this time, it results already heated after the distillation process.

Table A.3 shows the results of exergetic analysis for both, CF and OF but, in this case, under best technical conditions to state the “avoidable” and “unavoidable” exergies. This table confronted with A.1 and A.2 allows determining the achievable level of optimization for CF or OF when best available technology is applied to design them and to obtain the advanced exergetic analysis. In this case, the destroyed exergy for the CF results 470 kW and for the OF 275 kW.

Table A.4 shows the exergoeconomic analysis for both CF and OF. The complete set of exergoeconomic variables for both factories is presented in this table; energies, exergies, efficiencies and cost of exergies for every component. The cost per unit of energy flow is set to be 1 m.u./kW for the NG, so all costs within table A.4 are referred to the real cost of the NG.

DISCUSSION

For clarity, Grassmann diagrams of both configurations have been included to discuss the results in figs. 7 and 8.

Figure 2 summarizes the thermal and water consumption of a CF of sanitary-ware, so as fig. 3 shows them for a OF. The main differences lay on the heat recovery from kilns exhausting and the water to flush molds which is not recovered in a CF. The water saving proposed in this research lays on re-use it through a distillation process. There are similar approaches within industrial field. In [13] the way to reduce the water consumption is based on recycling the wasted brine of the reverse osmosis (R.O.) process. Gas consumption is raised up due to the GT. On the other hand, it is cut down due to heat recovery from kilns. Balance is positive from the reduction point of view. Besides, the electrical power is not supplied at public price which derives an important economic saving, so as the water reduction that involves an environmental improvement as well.

Advance exergy analysis has been used to optimize the CF finding the flows of exergy through the different elements in order to re-conduct them taking advantage of residual exergy at the kilns exhausting. From fig. 7 it can be concluded that 810 kW of exergy from exhausting of the kilns could be profited to supply ware-dryer and HVU that need 717 kW of exergy inlet. Besides, the power plant produces 834 kW through the exhausting whilst boilers need 537 kW. Half of the exergy results destroyed through the global process. From table A.1 and A.3, it is deduced that 470 kW of exergy are avoidable in a CF by difference between the destroyed exergies in a real or unavoidable conditions. Regarding efficiency, it can be seen how equipment behavior is improved when fed from recovered heat, so as the global process efficiency gets higher. The analysis is repeated for the OF. As a consequence of this fact, the rate of destroyed exergy and the exergetic cost of product are lowered.

Compared overall factory results for both configurations are shown in table 2.

From table 2, it can be deduced that NG consumption has been decreased almost 3%. The exergetic efficiency rises from 0.17 up to 0.3. The destroyed exergy decreases 6.26% for standard conditions between CF and OP. The “avoidable” exergy decreases 41%. The cost per unit of exergy flow decreases 42%. On the other hand, 100% of flushing water is reused.

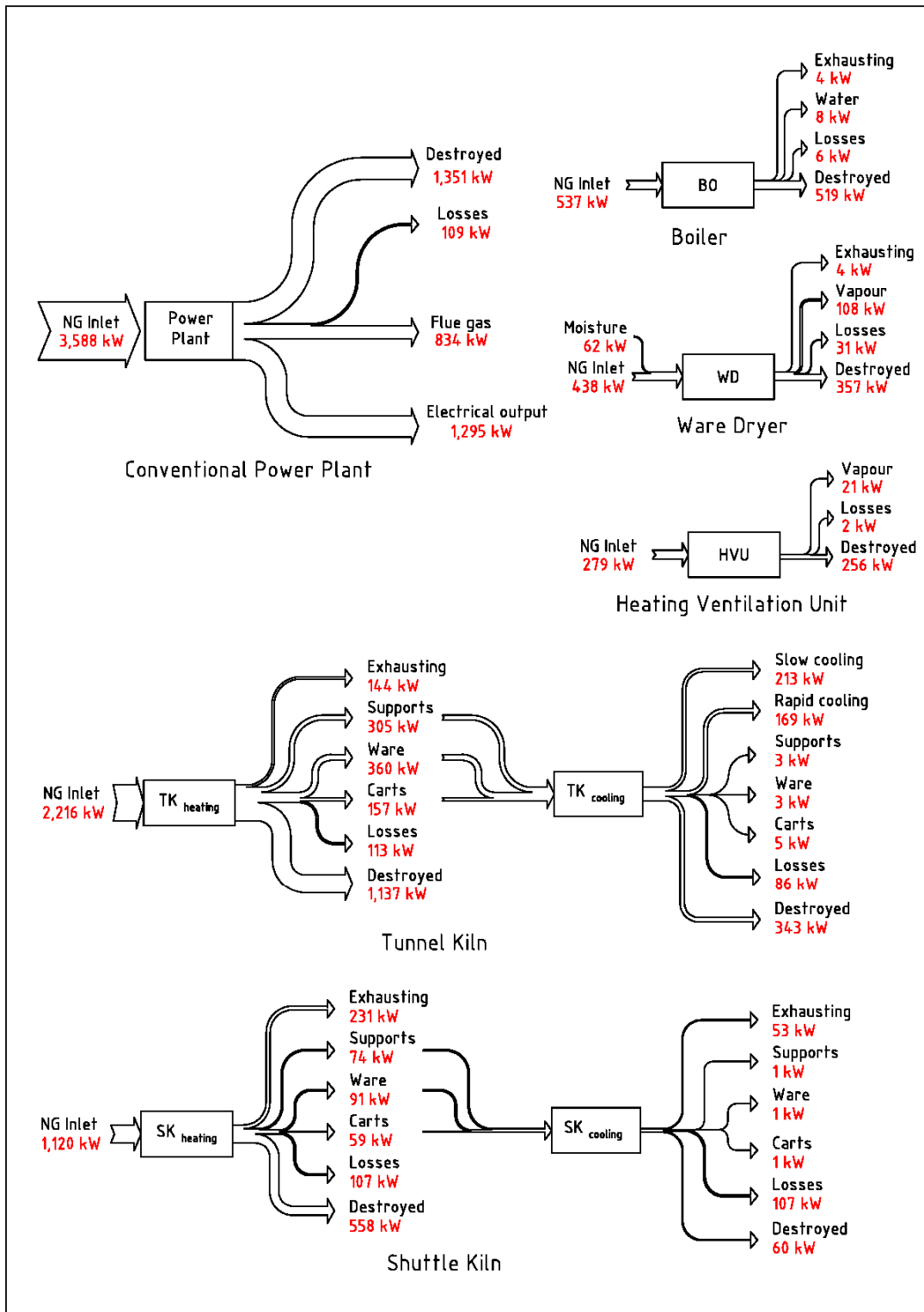


FIGURE 7. Grassmann diagram of a CF

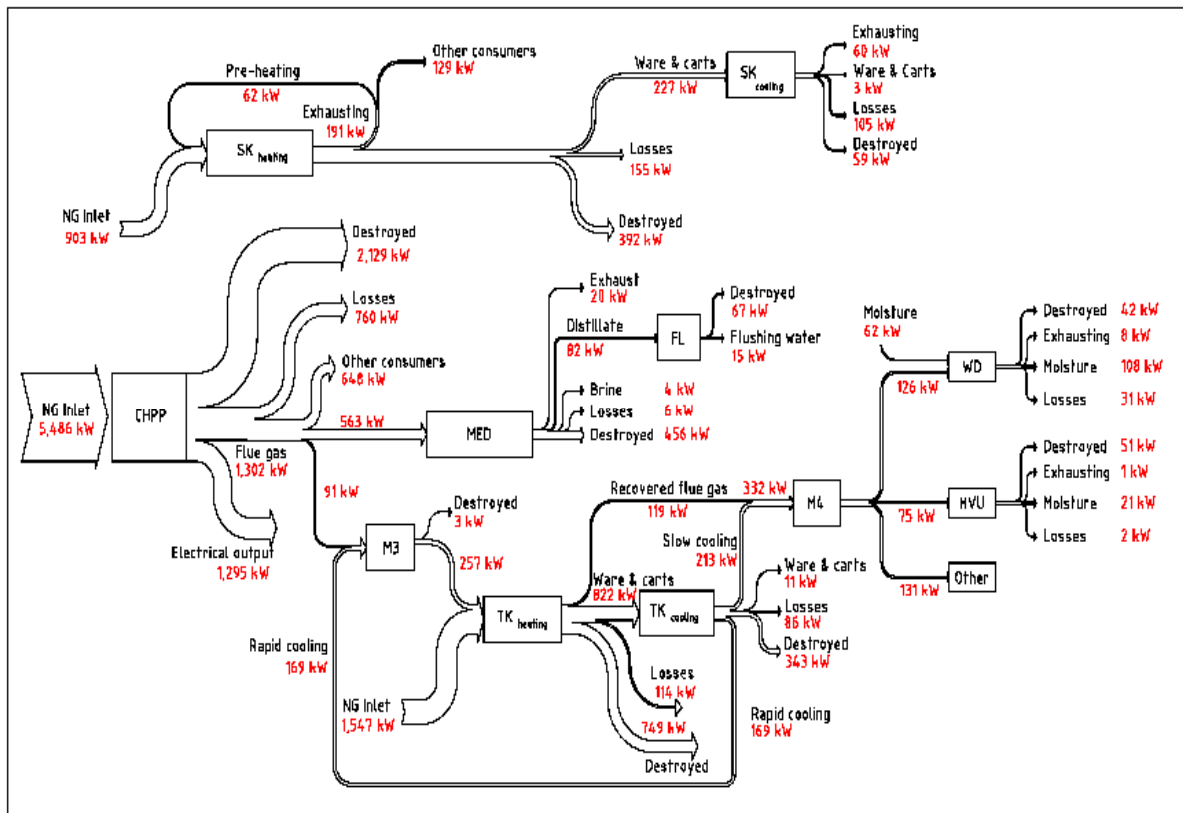


FIGURE 8. Grassmann diagram of an OF

TABLE 2. Exergoeconomic comparison CF vs. OF

EXERGOECONOMY			
Overall factory		CF	OF
ENG	kW	7,934	7,699
E _f	kW	10,529	9,641
E _p	kW	3,114	4,879
E _{eff}	p.u.	0.2957	0.5060
EX _{NG}	kW	8,179	7,936
EX _{in}	kW	8,240	7,998
EX _{out}	kW	3,659	3,688
EX _f	kW	8,240	7,998
EX _p	kW	1,433	2,387
EX _d	kW	4,581	4,309
EX _{eff}	p.u.	0.1739	0.2985
y _d	p.u.	0.5560	0.5388
EX _{d_av}	kW	470	275
C _f	kW	8,179	7,936
C _p	kW	8,179	7,936
C _{ng}	m.u./kW	1.0000	1.0000
c _p	m.u./kW	5.7089	3.3240
r	p.u.	4.7089	2.3240
Water	m ³ /s	5.64·10 ⁻³	0

CONCLUSIONS

This research has demonstrated how a CF for ceramic sanitary-ware can become more efficient by applying thermal engineering.

Primary energy gets reduced 3% from 7,934 kW to 7,699 kW and 112,000 m³ of water per year are saved. This reduction implies almost 1 Gg of emitted CO₂ less per year.

Regarding water saving, this research has dealt only with flushing residual water re-utilization. Nevertheless, there is a great chance to recover water from vapors through the exhausting stacks of the dryers and HVU's. This represents 20% of the total consumed water and it is worth to be recovered. This study might constitute a very interesting research for future approach within this subject.

Exergetic analysis has been carried out to better understand the potential of saving and to identify and quantify the equipment more likely to reduce energy. In this regard, this study has contributed to extend the work done in [2] and [5] by applying the advanced exergetic analysis to the modeled factories and quantifying their savings of primary energy and water.

REFERENCES

1. G. Vuckovic, M. Vukic, and M. Stojilkovic, "Avoidable and unavoidable exergy destruction and exergoeconomic evaluation of the thermal processes in a real industrial plant," *Thermal Science*, vol. 16, no. Suppl. 2, pp. S433–S446, Jan. 2012.
2. C. CuvIELLA-Suárez, A. Colmenar-Santos, D. Borge-Diez, and Á. López-Rey, "Heat recovery in sanitary-ware industry applied to water and energy saving by multi-effect distillation," *Journal of Cleaner Production*, vol. 213, pp. 1322–1336, Mar. 2019.
3. "Reference Document on Best Available Techniques in the Ceramic Manufacturing Industry," Aug-2007. [Online]. Available: http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/cer_bref_0807.pdf. [Accessed: 02-Dec-2016].
4. B. Tonn, P. D. Frymier, D. Stiefel, L. S. Skinner, N. Suraweera, and R. Tuck, "Toward an infinitely reusable, recyclable, and renewable industrial ecosystem," *Journal of Cleaner Production*, vol. 66, pp. 392–406, Mar. 2014.
5. C. CuvIELLA-Suárez, A. Colmenar-Santos, D. Borge-Diez, and Á. López-Rey, "Management tool to optimize energy and water consumption in the sanitary-ware industry," *Journal of Cleaner Production*, vol. 197, Part 1, pp. 280–296, Oct. 2018.
6. Z. Utlu and A. Hepbaşlı, "Exergoeconomic analysis of energy utilization of drying process in a ceramic production," *Applied Thermal Engineering*, vol. 70, no. 1, pp. 748–762, Sep. 2014.
7. Z. Ge, C. Yang, Y. Liu, X. Du, L. Yang, and Y. Yang, "Analysis of plate multi-effect distillation system coupled with thermal power generating unit," *Applied Thermal Engineering*, vol. 67, no. 1, pp. 35–42, Jun. 2014.
8. S. H. Amini, J. A. M. Remmerswaal, M. B. Castro, and M. A. Reuter, "Quantifying the quality loss and resource efficiency of recycling by means of exergy analysis," *Journal of Cleaner Production*, vol. 15, no. 10, pp. 907–913, Jan. 2007.
9. King, Alan G., *Ceramic Technology and Processing - 1st Edition*, 1st ed. Andrew, William. Elsevier, 2001.
10. S. Ferrer, A. Mezquita, V. M. Aguilera, and E. Monfort, "Beyond the energy balance: Exergy analysis of an industrial roller kiln firing porcelain tiles," *Applied Thermal Engineering*, vol. 150, pp. 1002–1015, Mar. 2019.
11. M. Gürtürk and H. F. Oztop, "Energy and exergy analysis of a rotary kiln used for plaster production," *Applied Thermal Engineering*, vol. 67, no. 1, pp. 554–565, Jun. 2014.
12. H. Caglayan and H. Caliskan, "Energy, exergy and sustainability assessments of a cogeneration system for ceramic industry," *Applied Thermal Engineering*, vol. 136, pp. 504–515, May 2018.
13. M. Ahmadi, E. Baniyasi, and H. Ahmadikia, "Process modeling and performance analysis of a productive water recovery system," *Applied Thermal Engineering*, vol. 112, pp. 100–110, Feb. 2017.

APPENDIX A
TABLE A.1. FLOW RATES FOR A CF

Equipment	Stream	i/o	flow	m kg/s	T K	h kJ/kg	s kJ/kg/K	E kW	Ex kW	E_in kW	E_out kW	Ex_in kW	Ex_out kW	Ex_dest kW	
PP	1	I	NG	0.0725	303	-4,639.01	11.65	3,481	3,588	3,481	0	3,588	0		
	2	I	Air	3.7508	303	0.69	6.88	113	0	113	0	0	0		
	3	O	Exhausting	3.8233	806	526.20	7.90	2,124	834	0	2,124	0	834		
	4	O	Power	-	-	-	-	1,295	1,295	0	1,295	0	1,295		
	5	O	Losses	-	-	-	-	175	109	0	175	0	109		
											3,594	3,594	3,588	2,238	1,351
BO	1	I	NG	0.0109	303	-4,639.01	11.65	521	537	521	0	537	0		
	2	I	Air	0.1865	303	0.69	6.88	6	0	6	0	0	0		
	3	I	Water	5.6356	303	-15,845.06	3.95	709	0	709	0	0	0		
	4	O	Exhaust	0.1973	423	121.87	7.22	30	4	0	30	0	4		
	5	O	Water	5.6356	318	-15,782.23	4.15	1,063	8	0	1,063	0	8		
	6	O	Losses	-	-	-	-	143	6	0	143	0	6		
											1,236	1,236	537	19	519
TK-Heating	1	I	NG	0.0448	303	-4,639.01	11.65	2,150	2,216	2,150	0	2,216	0		
	2	I	Air	0.3120	303	0.69	6.88	9	0	9	0	0	0		
	3	I	Air	0.7688	303	0.69	6.88	23	0	23	0	0	0		
	4	I	Air	0.0769	303	0.69	6.88	2	0	2	0	0	0		
	5	I	Supports	0.2860	303	62.01	0.00	127	0	127	0	0	0		
	6	I	Ware	0.4644	303	8.82	0.00	159	0	159	0	0	0		
	7	I	Carts	2.9767	303	55.77	0.00	636	0	636	0	0	0		
	8	O	Flue gas	1.5498	600	304.62	7.58	518	144	0	518	0	144		
	9	O	Supports	0.2860	1,523	311.58	149.46	636	305	0	636	0	305		
	10	O	Ware	0.4366	1,523	44.34	21.27	751	360	0	751	0	360		
	11	O	Carts	2.9767	464	280.20	134.41	1,034	157	0	1,034	0	157		
	12	O	Losses	-	-	-	-	166	113	0	166	0	113		
											3,106	3,106	2,216	1,080	1,136
TK-Cooling	13	I	Air	0.4450	303	0.69	6.88	13	0	13	0	0	0		
	14	I	Air	2.3025	303	0.69	6.88	69	0	69	0	0	0		
	15	I	Air	1.9699	303	0.69	6.88	59	0	59	0	0	0		
	9	I	Supports	0.2860	1,523	311.58	149.46	636	305	636	0	305	0		
	10	I	Ware	0.4366	1,523	44.34	21.27	751	360	751	0	360	0		
	11	I	Carts	2.9767	464	280.20	134.41	1,034	157	1,034	0	157	0		
	16	O	Rapid cooling	0.4450	1,022	768.29	8.16	355	169	0	355	0	169		
	17	O	Slow cooling	4.2724	510	210.30	7.41	1,024	213	0	1,024	0	213		
	18	O	Supports	0.2860	373	76.33	1.44	156	3	0	156	0	3		
	19	O	Ware	0.4366	373	10.86	0.20	184	3	0	184	0	3		
	20	O	Carts	2.9767	342	68.64	1.29	719	5	0	719	0	5		
21	O	Losses	-	-	-	-	126	86	0	126	0	86			
											2,564	2,564	823	480	343
WD	1	I	NG	0.0088	303	-4,639.01	11.65	425	438	425	0	438	0		
	2	I	Air	0.1519	303	0.69	6.88	5	0	5	0	0	0		
	3	I	Air	3.9116	303	0.69	6.88	118	0	118	0	0	0		
	4	I	Steam	0.1398	303	-13,414.06	10.51	357	62	357	0	62	0		
	5	I	Water	0.0008	303	-15,845.06	3.95	0	0	0	0	0	0		
	6	I	Water	0.1039	303	-15,845.06	3.95	13	0	13	0	0	0		
	7	I	Ware	0.6926	303	23.48	0.00	23	0	23	0	0	0		
	8	I	Carts	0.3232	303	4.46	0.00	4	0	4	0	0	0		
	9	O	Exhaust	4.0724	327	24.43	6.96	219	4	0	219	0	4		
	10	O	Steam	0.2444	327	-13,369.93	10.65	636	108	0	636	0	108		
	11	O	Ware	0.6926	303	23.48	0.00	23	0	0	23	0	0		
	12	O	Carts	0.3232	303	4.46	0.00	4	0	0	4	0	0		
	13	O	Losses	-	-	-	-	63	31	0	63	0	31		
											946	946	500	143	357
HVU	1	I	NG	0.0056	303	-4,639.01	11.65	271	279	271	0	279	0		
	2	I	Air	0.0969	303	0.69	6.88	3	0	3	0	0	0		
	3	I	Air	2.4081	303	0.69	6.88	73	0	73	0	0	0		
	4	I	Water	0.0467	303	-15,845.06	3.95	6	0	6	0	0	0		
	5	O	Exhaust	2.5106	310	7.31	6.90	92	0	0	92	0	0		
	6	O	Steam	0.0467	310	-13,401.77	10.55	120	21	0	120	0	21		
	7	O	Losses	-	-	-	-	140	2	0	140	0	2		
											352	352	279	23	257
SK-Heating	1	I	NG	0.0226	303	-4,639.01	11.65	1,086	1,120	1,086	0	1,120	0		
	2	I	Air	0.3501	303	0.69	6.88	11	0	11	0	0	0		
	3	I	Air	0.3622	303	0.69	6.88	11	0	11	0	0	0		
	4	I	Air	0.1483	303	0.69	6.88	4	0	4	0	0	0		
	5	I	Supports	0.0731	303	1.38	0.00	3	0	3	0	0	0		
	6	I	Ware	0.1156	303	0.24	0.00	4	0	4	0	0	0		
	7	I	Cart	0.5269	303	1.58	0.00	9	0	9	0	0	0		
	8	O	Exhaust	0.8833	867	593.86	7.98	551	231	0	551	0	231		
	9	O	Supports	0.0731	1,479	55.58	32.06	129	74	0	129	0	74		
	10	O	Ware	0.1156	1,479	9.67	5.58	158	91	0	158	0	91		
	11	O	Cart	0.5269	643	63.53	36.64	127	59	0	127	0	59		
	12	O	Losses	-	-	-	-	164	107	0	164	0	107		
											1,128	1,128	1,120	562	558
SK-Cooling	13	I	Air	0.3622	303	0.69	6.88	11	0	11	0	0	0		
	14	I	Air	0.1483	303	0.69	6.88	4	0	4	0	0	0		
	15	I	Air	0.3306	303	0.69	6.88	10	0	10	0	0	0		
	9	I	Supports	0.0731	1,479	55.58	32.06	129	74	129	0	74	0		
	10	I	Ware	0.1156	1,479	9.67	5.58	158	91	158	0	91	0		
	11	I	Cart	0.5269	643	63.53	36.64	127	59	127	0	59	0		
	16	O	Exhaust	0.841106	541	242.42	7.47	229	53	0	229	0	53		
	17	O	Supports	0.07	393	5.53	0.52	13	1	0	13	0	1		
	18	O	Ware	0.12	393	0.96	0.09	16	1	0	16	0	1		
	19	O	Cart	0.53	329	6.32	0.59	17	1	0	17	0	1		
20	O	Losses	-	-	-	-	164	107	0	164	0	107			
											439	439	224	164	60

TABLE A.2. Flow rates for an OF

Equipment	Stream	i/o	flow	m kg/s	T K	E kW	Ex kW	E in kW	E out kW	Ex in kW	Ex out kW	Ex dest kW
GT	1	I	NG LHV=	0.1109	303	5,322	5,486	5,322		5,486		
	2	I	Air inlet	6.4280	303	194	0	194		0		
	3	O	Flue gas from combustion(505°C)	6.5389	778	3,432	1,302		3,432		1,302	
	4	O	Electrical output			1,295	1,295			1,295		1,295
	5	O	Losses			788	760			788		760
								5,516	5,516	5,486	3,357	2,129
MED	6	I	Exhaust gas inlet	2.8272	778	1,484	563	1,484		563		
	7	I	Recovered water	5.9065	303	743	0	743		0		
	8	O	Exhaust gas outlet	2.8272	373	285	20		285		20	
	9	O	Distillate	5.6356	351	1,848	82		1,848		82	
	10	O	Rejected brine	0.2709	351	89	4		89		4	
	11	O	Losses			5	1		5		1	
								2,227	2,227	563	107	456
FL	9	I	Distillate	5.6356	351	1,848	82	1,848		82		
	12	O	Flushing water	5.6356	323	1,181	15		1,181		15	
	13	O	Losses & heat			667	0		667		0	
								1,848	1,848	82	15	67
WD	14	I	Recovered in	2.1427	531	560	126	560		126		
	15	I	Drying or cooling air	3.9116	303	118	0	118		0		
	16	I	Moisture in ambient air	0.1398	303	357	62	357		62		
	17	I	Extra Moisture vaporized	0.0008	303	0	0	0		0		
	18	I	Moisture from ware	0.1039	303	13	0	13		0		
	19	I	Subtotal ware=	0.6926	303	23	0	23		0		
	20	I	Subtotal carts=	0.3232	303	4	0	4		0		
	21	O	Recovered out	2.1427	337	138	4		138		4	
	22	O	Exhausting air	3.9116	327	212	4		212		4	
	23	O	Exhausting Moisture	0.2444	327	636	108		636		108	
	24	O	Subtotal ware=	0.6926	303	23	0		23		0	
	25	O	Subtotal carts=	0.3232	303	4	0		4		0	
26	O	Subtotal losses=	0.0000	0	63	31		63		31		
								1,077	1,077	188	146	42
HVU	27	I	Recovered In	1.2649	531	331	75	331		75		
	28	I	Heating air	2.4081	303	73	0	73		0		
	29	I	Water from ware	0.0467	303	6	0	6		0		
	30	O	Recovered out	1.2649	320	60	1		60		1	
	31	O	Air exhausting	2.4081	310	89	0		89		0	
	32	O	Moisture exhausting	0.0467	310	120	21		120		21	
	33	O	Subtotal losses=	0.0000	0	140	2		140		2	
								409	409	75	23	51
TK-Heating	34	I	NG LHV=	0.0313	303	1,501	1,547	1,501		1,547		
	35	I	Roof air	0.3120	900	206	89	206		89		
	36	I	Combustion air	0.5367	900	354	153	354		153		
	37	I	Excess combustion air	0.0537	900	35	15	35		15		
	38	I	Subtotal structure=	0.2860	303	127	0	127		0		
	39	I	Subtotal ware=	0.4644	303	159	0	159		0		
	40	I	Subtotal carts=	2.9767	303	636	0	636		0		
	41	O	Flue gas from combustion(327°C)	1.2816	600	428	119		428		119	
	42	O	Subtotal structure=	0.2860	1,523	636	305		636		305	
	43	O	Subtotal ware=	0.4366	1,523	751	360		751		360	
	44	O	Subtotal carts=	2.9767	464	1,034	157		1,034		157	
45	O	Subtotal losses=	0.0000	0	167	114		167		114		
								3,017	3,017	1,804	1,055	749
TK-Cooling	46	I	Rapid cooling	0.4450	303	13	0	13		0		
	47	I	Slow cooling	2.3025	303	69	0	69		0		
	48	I	Contravec	1.9699	303	59	0	59		0		
	42	I	Subtotal structure=	0.2860	1,523	636	305	636		305		
	43	I	Subtotal ware=	0.4366	1,523	751	360	751		360		
	44	I	Subtotal carts=	2.9767	464	1,034	157	1,034		157		
	49	O	Rapid cooling (868°C) for pre-heating	0.4450	1,022	355	169		355		169	
	50	O	Slow cooling (296°C)	4.2724	510	1,024	213		1,024		213	
	51	O	Subtotal structure=	0.2860	373	156	3		156		3	
	52	O	Subtotal ware=	0.4366	373	184	3		184		3	
53	O	Subtotal carts=	2.9767	342	719	5		719		5		
54	O	Subtotal losses=			126	86		126		86		
								2,564	2,564	823	480	343
SK-Heating	55	I	NG LHV=	0.0182	303	876	903	876		903		
	56	I	Combustion air	0.2520	844	150	62	150		62		
	57	I	Difussion air	0.3622	303	11	0	11		0		
	58	I	Injection air	0.1483	303	4	0	4		0		
	59	I	Subtotal structure=	0.0731	303	3	0	3		0		
	60	I	Subtotal ware=	0.1156	303	4	0	4		0		
	61	I	Subtotal carts=	0.5269	303	9	0	9		0		
	62	O	Exhausting	0.7808	844	466	191		466		191	
	63	O	Subtotal structure=	0.0731	1,479	129	74		129		74	
	64	O	Subtotal ware=	0.1156	1,479	158	91		158		91	
	65	O	Subtotal carts=	0.5269	698	141	62		141		62	
66	O	Subtotal losses=	0.0000	0	164	155		164		155		
								1,057	1,057	964	574	391
SK-Cooling	67	I	Difussion air	0.3622	303	11	0	11		0		
	68	I	Injection air	0.1483	303	4	0	4		0		
	69	I	Cooling air	0.3306	303	10	0	10		0		
	63	I	Subtotal structure=	0.0731	1,479	129	74	129		74		
	64	I	Subtotal ware=	0.1156	1,479	158	91	158		91		
	65	I	Subtotal carts=	0.5269	698	141	62	141		62		
70	O	Exhausting	0.8411	556	242	60		242		60		

"continued"



	71	O	Subtotal structure=	0.0731	393	13	1	13	1		
	72	O	Subtotal ware=	0.1156	393	16	1	16	1		
	73	O	Subtotal carts=	0.5269	329	17	1	17	1		
	74	O	Subtotal losses=	0.0000	0	164	105	164	105		
								453	453	228	168
	3	I	flow 3 from GT	6.5389	778	3,432	1,302	3,432	1,302		
M1	6	O	flow 6 to MED	2.8272	778	1,484	563	0	1,484	0	563
	75	O	flow 73 to TK	0.4573	778	240	91	0	240	0	91
	76	O	flow 74 to other consumers	3.2544	778	1,708	648	0	1,708	0	648
								3,432	3,432	1,302	1,302
											0
M2	77	I	Fresh water	0.2709	303	34	0	34	0		
	12	I	Flushing water	5.6356	303	709	0	709	0		
	7	O	Recovered water	5.9065	303	743	0		743	0	0
								743	743	0	0
											0
M3	75	I	flow 73 from GT	0.4573	778	240	91	240	91		
	49	I	flow 47 from rapid cooling	0.4450	1,022	355	169	355	169		
	35	O	flow 33 to roof air	0.3120	900	206	89		206		89
	36	O	flow 34 to combustion air of TK	0.5367	900	354	153		354		153
	37	O	flow 35 to Excess combustion air of TK	0.0537	900	35	15		35		15
								595	595	260	257
											3
M4	41	I	flow 39 from TK exhausting flue	1.2816	600	428	119	428	119		
	50	I	flow 48 from slow cooling cooling	4.2724	510	1,024	213	1,024	213		
	14	O	flow 12 to Ware dryer	2.1427	531	560	126		560		126
	27	O	flow 25 to HVU	1.2649	531	331	75		331		75
	78	O	flow 75 to other consumers	2.1464	531	561	127		561		127
								1,452	1,452	332	328
											4
M5	62	I	flow 60 from SK Exhausting	0.7808	844	466	191	466	191		
	56	O	flow 54 to SK Combustion air	0.2520	844	150	62		150	0	62
	79	O	flow 76 to Other consumers	0.5288	844	316	129		316	0	129
								466	466	191	191
											0

TABLE A.3. Unavoidable conditions (ideal).

Equipment	ENERGY				EXERGY						
	ENG kW	E _f kW	E _p kW	E _{eff} p.u.	EX _{NG} kW	EX _{in} kW	EX _{out} kW	EX _f kW	EX _p kW	EX _d kW	EX _{eff} p.u.
<i>CONVENTIONAL FACTORY</i>											
PP	3,238	3,238	1,295	0.4000	3,337	3,337	2,086	3,337	1,295	1,251	0.3880
BO	494	1,208	1,063	0.8799	509	509	18	509	8	491	0.0167
TK-Heating	1,910	2,863	2,780	0.9709	1,969	1,969	979	1,969	922	991	0.4682
TK-Cooling	0	2,551	1,535	0.6019	0	823	533	823	488	290	0.5929
WD	393	886	636	0.7172	406	467	127	467	108	340	0.2321
HVU	201	281	120	0.4268	207	207	22	207	21	185	0.0999
SK-Heating	993	1,031	883	0.8567	1,024	1,024	517	1,024	421	507	0.4112
SK-Cooling	0	435	241	0.5547	0	224	167	224	67	57	0.3012
<i>OPTIMIZED FACTORY</i>											
GT	4,911	5,104	4,723	0.9253	5,062	5,062	2,965	5,062	2,595	2,097	0.5127
MED	0	2,092	1,890	0.9037	0	512	99	512	88	413	0.1719
FL	0	1,848	1,181	0.6389	0	82	15	82	15	67	0.1819
TK-Heating	1,372	2,899	2,815	0.9712	1,414	1,687	989	1,687	932	699	0.5523
TK-Cooling	0	2,551	1,535	0.6019	0	823	533	823	488	290	0.5929
WD	0	1,035	623	0.6017	0	179	152	179	46	27	0.2589
HVU	0	349	120	0.3438	0	61	24	61	21	37	0.3382
SK-Heating	675	888	806	0.9077	696	784	426	784	348	357	0.4438
SK-Cooling	0	432	304	0.7039	0	224	170	224	110	54	0.4888

TABLE A.4. Exergoeconomic analysis.

Equipment	ENERGY				EXERGY							EXERGOECONOMY						
	ENG kW	E _f kW	E _p kW	E _{eff} p.u.	EX _{NG} kW	EX _{in} kW	EX _{out} kW	EX _f kW	EX _p kW	EX _d kW	EX _{eff} p.u.	y _d p.u.	EX _{d,av} kW	C _f kW	C _p kW	c _f m.u./kW	c _p m.u./kW	r p.u.
<i>CONVENTIONAL FACTORY</i>																		
PP	3,481	3,594	1,295	0.3603	3,588	3,588	2,238	3,588	1,295	1,351	0.3609	0.1454	100	3,588	3,588	1.00	2.77	1.7710
BO	521	1,236	1,063	0.8601	537	537	19	537	8	519	0.0158	0.0559	28	537	537	1.00	63.34	62.3382
TK-Heating	2,150	3,106	2,939	0.9464	2,216	2,216	1,080	2,216	966	1,136	0.4361	0.1223	146	2,216	2,216	1.00	2.29	1.2930
TK-Cooling	0	2,564	1,379	0.5380	0	823	480	823	382	343	0.4644	0.0370	53	1,887	1,887	2.29	4.94	1.1532
WD	425	918	636	0.6927	438	500	143	500	108	357	0.2171	0.0384	17	500	500	1.00	4.61	3.6070
HVU	271	352	120	0.3408	279	279	23	279	21	257	0.0740	0.0276	71	279	279	1.00	13.51	12.5107
SK-Heating	1,086	1,128	964	0.8545	1,120	1,120	562	1,120	455	558	0.4061	0.0601	52	1,120	1,120	1.00	2.46	1.4625
SK-Cooling	0	439	229	0.5212	0	224	164	224	53	60	0.2383	0.0065	3	552	552	2.46	10.33	3.1963
<i>OPTIMIZED FACTORY</i>																		
GT	5,322	5,516	4,727	0.8571	5,486	5,516	3,357	5,486	2,597	2,158	0.4734	0.2699	61	5,486	5,486	1.00	2.11	1.1125
MED	0	2,227	1,848	0.8301	0	563	107	563	82	456	0.1458	0.0571	44	1,189	1,189	2.11	14.49	5.8569
FL	0	1,848	1,181	0.6389	0	82	15	82	15	67	0.1819	0.0084	0	173	173	2.11	11.61	4.4981
TK-Heating	1,501	3,017	2,850	0.9446	1,547	1,804	1,055	1,804	941	749	0.5219	0.0936	50	2,834	2,834	1.57	3.01	0.9192
TK-Cooling	0	2,564	1,379	0.5380	0	823	480	823	382	343	0.4644	0.0429	53	2,477	2,477	3.01	6.48	1.1532
WD	0	1,077	636	0.5907	0	188	146	188	47	42	0.2481	0.0052	15	469	469	2.50	10.06	3.0309
HVU	0	409	120	0.2934	0	75	23	75	21	51	0.2770	0.0064	14	186	186	2.50	9.01	2.6103
SK-Heating	876	1,057	893	0.8448	903	964	574	964	418	391	0.4337	0.0489	33	1,333	1,333	1.38	6.99	4.0567
SK-Cooling	0	453	242	0.5358	0	228	168	228	60	59	0.2617	0.0074	5	1,591	1,591	6.99	26.71	2.8206

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 220 de 231

ANEXO XV: “Exergoeconomics in the sanitary-ware industry to reduce energy and water consumptions”. CERTIFICADO DE PUBLICACIÓN



European Academy for
Sustainable Development
EURACA



Certificate of Participation

This is to certify that the below mentioned authors have successfully participated in The International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability.

The presented Paper was published in a Journal Special Issue for TMREES Conference Series

Author/s: Carlos Cuviella Suarez, Antonio Colmenar Santos, David Borge Diez and Jorge Blanes Peiro

Title of Contributed Paper: Water-Energy nexus in the Sanitary-Ware Industry. Reduction and sustainability by exergoeconomic analyses



Speaker: Carlos Cuviella Suarez

TMREES19-Greece Int'l Conf. Athens - Greece
September 04 to 06, 2019.

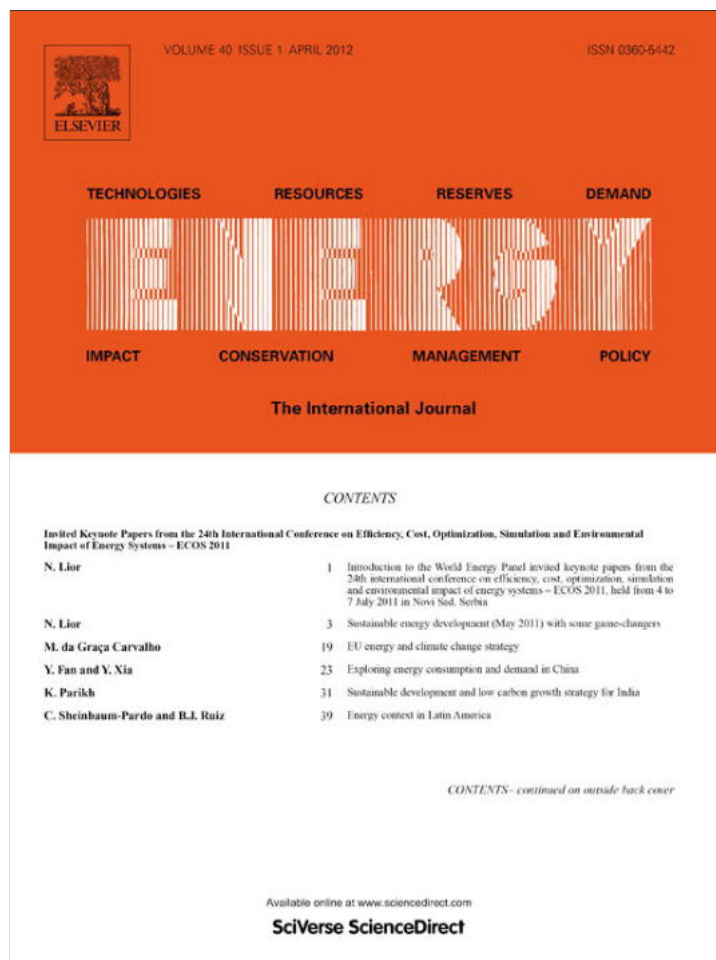


EURACA

Chafic-Touma Salame

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 221 de 231

ANEXO XVI: “Tri-generation system to couple production to demand in a combined cycle” COPIA
DE LA PUBLICACIÓN



This article appeared in a journal published by Elsevier. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

<http://www.elsevier.com/copyright>



Tri-generation system to couple production to demand in a combined cycle

Carlos Cuviella-Suárez, Antonio Colmenar-Santos*, Manuel Castro-Gil

Industrial Engineering Higher Technical School, Spanish University for Distance Education, Juan del Rosal St., 12, 28040 Madrid, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 July 2011

Received in revised form

7 December 2011

Accepted 29 January 2012

Available online 7 March 2012

Keywords:

Desalination

Fossil fuel

Combined cycle

Renewable energy

ABSTRACT

In the need to find efficient manageable and available energy, economically and environmentally, there is a clear shift to renewable energy sources, but currently it does not seem to provide the final solution. Cogeneration, in all its variations, has to be a part of the solution to this approach through the strategy of optimizing the management of excess thermal energy for the production of electrical energy. Consumption of other fuels for various uses which cover heating, cooling, water desalination, many industrial processes, etc. may be avoided. By means of this policy, with all the associated complexity, the total fuel consumption can be reduced to about 60% from the recovered energy through the condensers of the electrical plants. This work aims to apply a statistical methodology in order to distribute the consumption during the production cycle so that it is affected as less as possible. The inclusion of water distillation allows the system to manage the residual thermal energy in order to transfer energy from peak to off-peak periods, flattening global demand curve and giving solution to the stationary quality.

© 2012 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

It is a fact that electricity generation globally is an inefficient process for various reasons; including thermodynamic, social, environmental, weather, etc. Likewise, the traditional thermal power plants (Fig. 1), waste an important amount of energy heating rivers, seas and atmosphere [1]. Also, fossil fuels reserves are estimated to run out in less than 100 years.

The horizon regarding substitutive energies to fossil fuels is not clear. Thus, technological and scientific communities are searching for alternatives that minimize energy consumption and environmental impact in all aspects [2]. Within this perspective of energy saving and energy efficiency, the obvious solution should be “not to consume non-needed energy”. This trivial statement encloses a great technical and economical complexity. Existing plants are located where refrigeration for condensation is cheap or easy to obtain. Yet, there have been precedents of “district heating” for years, this has not been a common practice, at least in western world. Because of this fact, it is neither cheap nor easy to take advantage of plant heat in a useful purpose. This statement is valid for an existing plant. But for a new plant to be built, the goal should be to optimize the electrical generation as well as the use and the distribution of thermal energy.

As per the International Energy Agency [3], fuel consumption for electrical energy production in 2002 was 1341.7 MTPE to

produce 5998.6 TWh (516 MTPE), that yields a global efficiency of 38%. This means that, in general, the potential thermal energy to be recovered is about 60% (805 MTPE). In addition, fuel final consumption is 2,795.3 MTPE. With these figures, the potential for fuel saving is about 28.8% (805/2795). Two direct conclusions can be derived from this statement; 1) fuel reserves would decrease at a slower pace and CO₂ emissions would be cut proportionally. 2) It is not simple to modify all the existing plants, but this should be at least the main parameter to design new facilities and future projects.

From this point, this work intends to be a model for how to use fossil energy in an efficient manner, minimizing dumped energy to the environment. The approach is made by sizing a great resort with different kind of facilities; residential, leisure, sport, etc. [4]. This resort is partially an existing case study. The final view of the Project is a town for 200,000 inhabitants with resort activities. It is obvious that the results obtained from this Project are transferable to another similar place at any scale proportion. Moreover, its scalability allows to adequate the study for different degrees of activity. The equipment selection might change depending on the actual size of installations but conceptually it would be the same system. It is basically an application of tri-generation where distillation is an added value, so the concept could be called tetra-generation (Fig. 2). Though it is not a real water generation, it can be considered that a product (fresh water) is obtained from a raw material (sea water) by means of residual energy. This is one of the innovative contributions of this work since it adds fresh water distillation to absorb energy during the off-peak periods and store it for peak periods when less electricity is available [5].

* Corresponding author. Tel.: +34 913987788; fax: +34 913986028.
E-mail address: acolmenar@ieec.uned.es (A. Colmenar-Santos).

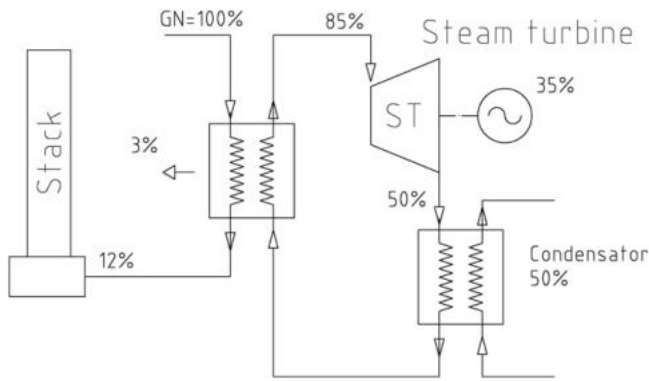


Fig. 1. Conventional power plant scheme.

The main difficulty of this project rises from the fact of considering an isolated system without a connection to the network. Therefore the target is to couple generation with regarding to the demand in such a manner that gas turbines work under full load parameters. Essentially, there are two reasons:

- Efficiency of gas turbines goes down drastically when the operation is out of the design parameters.
- When running the system in an isolated mode, there is no chance to sell over production of electricity.

As sizing the system aims leads to electrical coverage without deficit [6], generation characteristic has to be set as per demand characteristic. Since the thermal demand is low, it is accomplished by residual thermal energy from gas or steam turbines. When the thermal demand rises, electrical generation cannot be risen proportionally, since it cannot be dumped to the network. In such case, some thermal facilities have to be supplied by electrical devices. In Fig. 3, an electrical characteristic is shown, in which, peaks and off-peaks can be used in order to couple generation and demand and to arrange the thermal production.

It is because of that fact, RO (reverse osmosis) and compression refrigeration systems are included within the system in order to supply thermal facilities needed during electrical the peak periods, this is in order to act as emergency systems when thermal ones fail.

Though the electrical operation is an isolated system, primary fuel has to be supplied in a regular basis as connected to the gas network or by means of fuel tanks storage (NG (Natural gas), LPG

(Liquified Petroleum Gas), etc.). In this work, natural gas is considered due to the facility available within the location. While in other locations without gas facility, tanks have to be provided.

It can be concluded that both, sizing and operation system are closely linked to the adjustment between the production and the electrical and thermal demand curves. The most powerful tool to design the installation is the possibility to foresee as much exactly as possible the demanded energies in order to arrange the production. We consider this as the strongest point in this work. Collecting historic statistical real data, the actual demand in short periods can be foreseen with a reasonable degree of approximation to consider the characteristic as continuous with low discretization degree. In brief, real historical data are used to be mathematically managed to achieve the final target, which is, minimizing both primary energy and environmental impact.

This work intends to incite reflection about energy rationalization. Recently, the concept of “energy saving” is commonly accepted. Even if this is not a conceptual mistake, misusing this term to define the processes that do not imply a real energy saving is a common mistake. Saving term refers to something that is postponed for a later time when it is more useful. An energy saving implies the storage of energy when it is produced but it is not needed to be used later on. This is not the common practice. What is pursued nowadays is not to save energy, but to get it with lower cost [7]. At this point, it comes up the economical factor that defines the limit between natural and financial resources. Even both factors are linked, it is not a matter of reducing energy consumption but it is a matter of obtaining a “zero” waste of energy. This is the point where saving energy is misused. It is a matter of fact to destine the total amount of primary energy towards useful purposes avoiding any dissipated waste. The final target is the “rationalization” of the use of energy in order to manage every bit of it into a useful aim. The achievement of this purpose implies, inherently, less energy consumption and subsequently, an indirect saving, and this must be the goal.

2. Installation description

The initial approach of the installation is to develop a cogeneration system able to supply electricity and heat to a resort town from a unique primary energy [8]. This community is selected as a representative type of the mediterranean resort. The project is a symbolic representation of a small town where all concerned facilities are concentrated, such as; residential areas, hotels, sport centers, leisure areas and parks, etc. It has been selected with particular dimension and characteristics that define it as a reference for future leisure resort villages. By this way, the results that are properly scaled, could be applied in the correspondent magnitude.

The overall Project consists of two phases. The first is the existing area in Oropesa that is defined by the parameters extracted from its website: www.marinador.com:

- Almost 10,000 apartments in 54 buildings
- 5 Hotels totalizing 1168 rooms
- 1 Golf field
- 1 Salty water spa (2000 persons/day)
- Green zones for about 0.8 km²

For the second phase, videos and models are shown in the referenced website with the additional available data, the parameters are as follows:

- Total extension of 18.8 km².
- 9 km² of green zones, whit 1 km² of gardens.

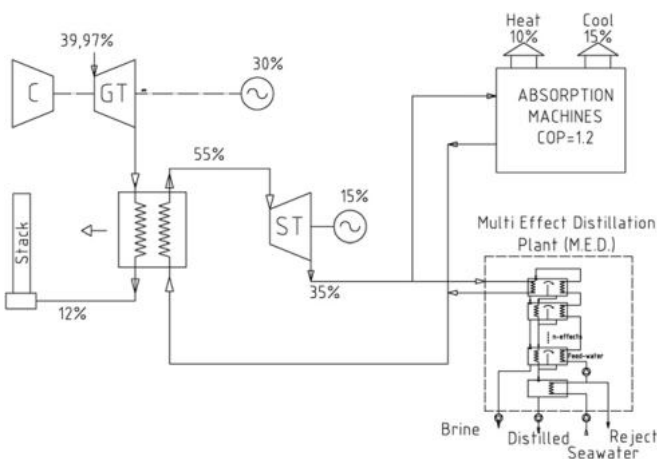


Fig. 2. Tri-generation scheme with desalination.

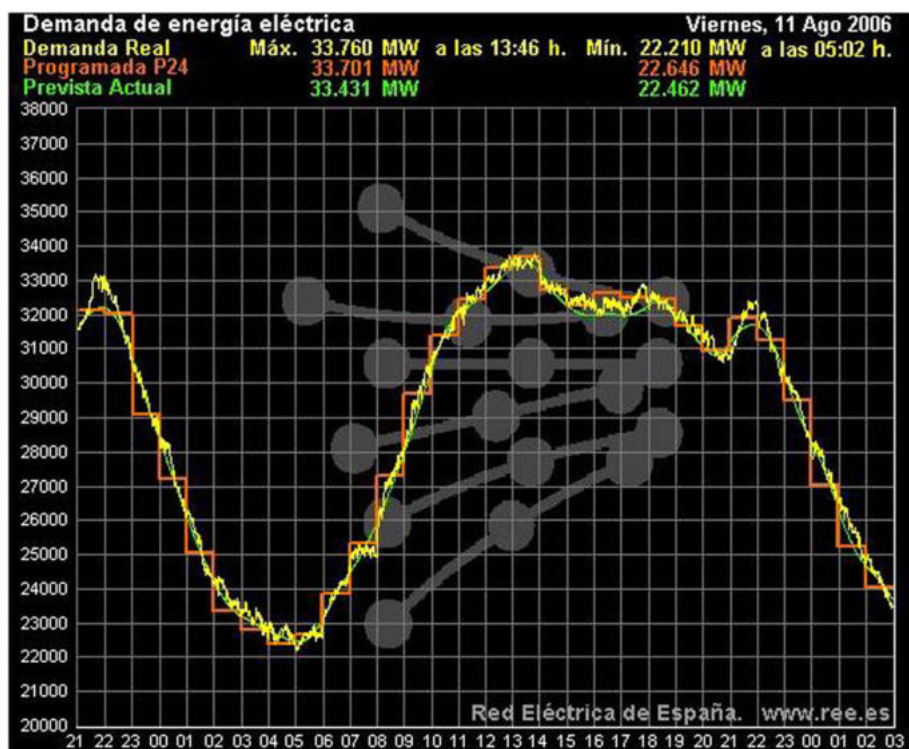


Fig. 3. Electrical type characteristic.

- 3 golf fields
- 6 hotels including 7500 beds
 - HOTEL CARIBE: 30,000 m². With an artificial lake.
 - HOTEL ACUARIO ARRECIFE: 25,000 m², with an artificial reef at 26 °C.
 - HOTEL VENECIA: 43,000 m², with navigable channels.
 - HOTEL BALNEARIO: 65,000 m², with a salty water Spa for 7000 persons/day, and indoor and outdoor facilities totalizing 12 thematic swimming pools and over 100 Jacuzzi.
 - HOTEL ALPES: 103,000 m², with an ice track 1 km long
 - HOTEL PARIS: 50,000 m².
- 1 Leisure park (World Illusion) (800,000 m²)
- 1 artificial lake (30,000 m²)
- 1 Thematic park NATURA D'OR, with the zones:
 - 1 Park (Pobladores)
 - 1 Park Aventura D'or
 - 1 Saline aquatic park
- 40,000 new housing apartments
- Offices and working areas.
- Medical centers.
- Technical facilities:
 - Fire fighting
 - Water supply
 - Centralized hot water supply
 - Electrical supply
 - Waste treatment plant
 - Centralized air conditioning system
 - Fresh water distillation from seawater
 - Lighting
 - Compressed air
 - Gas supply.

With the same disposition of facilities to the existing phase, the following distribution is obtained:

- 272 housing buildings
- 160,000 new inhabitants

With these premises, it is to be considered that community is equipped with all needed facilities for such a village, in which, the following are essential:

- Housing
- Shopping areas
- Leisure centers
- Social centers
- Sport centers

Regardless of the consideration of this urbanization within the standards of sustainable growth, rational planning, etc.; the project focuses on a purely technical study to be used as a reference for other possible communities, centers or buildings, where an adequate scalability allows the extrapolation of the results here towards rational studies from the energetic point of view, exclusively. Therefore, any social or urban analysis beyond the merely energetic and environmental point of view in terms of generation is not considered.

3. Targets of the facility

The main target of the installation is optimizing the saving of primary energy consumed within the normal activity in a community as described previously. The starting point is a cogeneration system, whose basic aims are to take the total available energy from the fuel (natural gas in this study [9]). There are two main logical and necessary aims to minimize both, economic and environmental costs. The first one is pursued to reduce fuel expenses and the second one is to reduce combustion emissions, particularly the CO₂.

Within the normal activities of a leisure village, usage of energy is aimed to residential, commercial, services and facilities (leisure, maintenance, sanitary care, etc.). The “resort” is basically based on summer time with outdoor activities that use a considerable amount of fresh and salty water. Thus, treatment and usage of fresh and salty water are a priority. Since water can be considered as a scarce and expensive good, the system is designed with the principle of getting the total amount of residual thermal energy to distillate fresh water from sea water. With this approach, natural gas is used as the only fuel for all the energetic purposes of the community in order to distillate fresh water [10]. This system is very extended around the Arabian Emirates, where different projects are being developed, such as the one described in this document [11]. Where water is scarce and sea is close, optimal conditions are present to develop these kind of installations as it happens in Almería and the Canary Islands, the most important precedents for these type of projects in Spain [12,13].

Fresh water for green zones and gardens in a mediterranean country with low hydraulic resources is a quite expensive luxury. But when an overproduction of heat is available to distillate, it can be considered that fresh water from sea water is free. However, it is not absolutely true that it is free because there is an energy consumption associated, but assuming that this energy is residual from electrical generation to feed the village, it becomes a free source of energy as its residual is used for heating or conditioning.

Other added value to the geographic location of the project is the climate and particularly, the solar irradiation. In a mediterranean climate with a high number of insolation hours and high energy of irradiance, it is logic to take the advantage of this energy as much as technically possible by means of solar panels overall roof surfaces, either the thermal or the photovoltaic ones [14,15]. With these installation systems, fossil energy is remarkably reduced.

Designing in a cogeneration background, it has to be taken into account air conditioning by absorption machines. For this project, high power and COP (coefficient of performance) have been selected in order to reach better efficiency and power peaks [16].

For heating purposes, heat is taken directly from steam by means of plate heat exchangers at an appropriate level of temperature that is 90 °C for heating, 60 °C for hot water preparation and 45 °C for hot water distribution.

The highest pressure for steam extraction is fixed by absorption machines at 8 bar inlet whose outlet is common for heating and conditioning.

4. Description of the methodology

Synthesis is the chosen method to develop the study. Every electrical and thermal power required by the consumers is calculated and sizing of equipment is achieved by the application of simultaneity coefficients, irradiation, climatology, seasonality, etc. [17]. The main elements that have to be considered in the system are:

- Gas turbines
- Steam generators
- Steam turbine
- Distillation units
- Absorption machines
- Heat exchangers.

Firstly, the quality of the supplies has to be analyzed before the quantity, it is the way in which they vary daily and yearly. Electrical and thermal demands are strong variables along the day and present important seasonal differences. On the other hand, the

fresh water production, although it is subject to the same factors, has the advantage to be storable. This characteristic is useful to transfer energy from off-peak periods to peaks and consequently, minimize the load variation in generators as much as possible. To size the equipment, it is needed to know the foreseen power peaks, which is not very useful since they are running out of the design point most of the time. Therefore, the combined characteristic demand curves are to be modified in order to flatten them as much as possible to ensure that design point is present as long as possible. The design approach is to use combined cycle to generate combined electricity and heat that can be taken either, directly for heating or hot water, or indirectly to generate live steam for distillation or conditioning absorption cycles [18].

A conventional combined cycle is based on gas combustion inside a gas turbine with a usual efficiency of about 35%. From 65% left energy present in exhausting gases, up to 25% is recovered in a steam turbine as electrical energy. 40% left has to be processed by a cogeneration system based on condensation heat of steam extracted from turbine.

In an approach of continuous generation, same for energy as for distilled water, it can be concluded that thermal demand is superior to the residual one in a combined cycle aimed to electrical generation completely. Therefore, more heat than residual is needed. But this situation varies in time and with seasons, so steam turbine operation is subjected to thermal needs. When electrical peaks are present, steam turbine is fully dedicated to electrical generation and the lack of thermal energy is supplied with RO (reverse osmosis) whose primary energy is electricity or, alternatively, water has to be stored during off-peak periods. Compression conditioning cycles are considered as well for these electrical peak periods. When electrical production goes down, steam turbine is disconnected totally or partially, alternatively, in order to send the steam heat to thermal uses; heating, hot water, absorption, or distillation. During these periods, RO and compression conditioning are decoupled optimizing primary energy consumption.

In brief, it is a matter of alternating electrical or thermal production from primary energy to supply final demands. This approach implies a value in the capital costs; duplication of desalination (RO and MED (Multieffect distillation)) and conditioning (compression and absorption) systems and greater complexity of the steam generator since the pressure level is different depending on the final use. In either case, as the system is global for the community, the synergic effects will affect with a greater impact on the pay-back that justifies the extra investment to create greater energy savings. On the other hand, it is a technical issue to be taken into account. The system can be foreseen either as an isolated system or a linked system to the public network. As an isolated system, excess of electrical generation is not admissible. The only chance to spend this excess is to generate some storable product. This will be desalinated water by RO that reinforces the distillation during thermal demand peaks. When system is linked to the network, excess of electricity can be sold to the power company. It is a common practice on networks that is able to admit two ways electrical flow with purchase agreements. The isolated system, as it is more complicated, will be considered in this project in order to study the greater complexity to couple the different subsystems with neither excesses nor instantaneous lack of energies.

The designed configuration for the system is based on three gas turbines and one steam turbine plus a heat recovery steam generator. The steam generator has to be able to generate it at two different levels. When electrical demand rises, steam turbine has to be coupled and steam pressure has to be over 10 bar. HRSG (heat recovery steam generator), usually runs in pressure ranges of 10–60 bar depending on the pressure steps. In case that ST (Steam turbine) has to be decoupled, the new pressure level has to be

adjusted to, either 8 bar for absorption machines or atmospheric levels for exchanging purposes. As thermal energy from gases is the same at any pressure outlet level, steam flow is greater in case of atmospheric level so there is an availability for heating and distillation. When conditioning is needed the pressure level has to be adjusted to 8 bar, either from the HRSG or from the turbine extraction, depending on the electrical demand. When electrical demand rises, the second step of the HRSG is to be connected in order to increase the steam pressure up to steam turbine level.

In any case of pressure levels share, the total amount of steam coming out the steam turbine is to be condensed in any of the heating devices (exchangers or distillation), optimizing the total energy consumption by this way.

The main difficulty that arises in such installations is the coupling of different subsystems since the consumptions are variable and do not match with the instantaneous generations of the different products. When a product is highly demanded, fuel injection has to be increased, so that, the rest of productions is increased. One way to avoid this problem would be to store the not-needed energy in that moment, but it is neither profitable to store electricity nor heat. For both of them, there exist very interesting technical solutions but not so much from an economical point of view.

To store electricity, chemical batteries, flywheels, hydraulic water pumping elevation, etc., can be used.

To store heat, various tanked thermal fluids could be used.

In either case, when energy is stored there are always associated losses to both, the energy conversion and the storage itself, for instance, wall conduction losses, residual losses, etc.

The advantage of this system is the ability to select which product is produced at any particular time depending on which is the priority, in order to adjust demand and production. GT (gas turbines) are designed to run at the design point due to the rapid decrease of efficiency with load drop (Fig. 4). Because of this, 3 smaller GT's are chosen instead 2 bigger ones in order to get more power steps shorter at full load regime. The fine regulation is obtained from ST with variable steam extraction. So, as much steam as required can be taken for heating purposes from the ST turbine

leaving to it the exact quantity required to turbinate the demanded electricity.

With this configuration, great flexibility is obtained to operate the various subsystems coupled as per their optimal point of running and yet, in worse case, where there is an over generation, all the excess of energy can be used as residual product. This condition of residual is not regarding the quality of the water but it regards the conceptual use of energy for the most storable product, which is water. For this reason of storability, water is produced with residual energy, during off-peak periods. During the peak periods, distillation is reduced. In this sense, the quality of the different products is seen from a mobility point of view where the residue of energy is used to provide it, differing the generation off the demand as its storability allows.

Generation is approached by the electrical demand, therefore it is obtained from GT's and ST adjusted upward. So, a great amount of heat is generated as well, that can be greater or less than the one demanded by the consumer. As different types of thermal receptor are available, it is possible to share the heat among them and take the leftover for MED distillation.

Electrical generation has been defined upward to be produced in the less excess as per GT's steps of production. That is, when electrical demand overcomes the ST fully dedicated it is needed to start up a new GT and there will be an excess of electricity produced. Running this configuration, there will never be a lack of electrical power. The possible excess of electricity can be used to charge batteries or to produce fresh water by RO. When the system is connected to the network it is simply sold to the power company.

Once determined the electrical power to be got from the system, it is fixed the number of GT's to be on. Then, heat is determined by combined cycle parameters so, it can be calculated the amount of steam to be generated to produce the electrical power left in order to satisfy the demand. However, there is still a leftover of heat in the steam. The steam that is by-passing the turbine contains both, live and latent specific heat, while the one passing through the turbine just contains latent heat able to produce thermal energy by condensation.

The problem at this stage is that thermal steam levels are different for the different purposes; absorption machines, heat exchangers and MED distillation. Because of that, it is required an automatic regulation system where the state of the various parameters (temperatures, pressures, etc.) is the feeding inlet and the actuation of different control devices is the outlet (valve opening, fuel injectors, etc.).

MED distillation requires saturated steam at 70 °C (0.31 bar), while the absorption machines that run with steam at 174 °C and 7.93 bar requires steam almost saturated.

In order to carry out this discrimination in optimal conditions, ST is disposed with outlet steam as per the minimal pressure requirements that are corresponding to MED distillation. On the other hand, an extraction has to be disposed at the 8 bar stage of the ST.

Heat exchangers for heating and hot water can be designed for the highest pressure and later be operated in any available steam pressure level, depending on the electrical requirements which state the amount of steam to be passed by the turbine.

It might happen to have thermal surplus where no electricity is required from ST. In such case, it is needed to reduce the pressure level through an isentropic expansion valve to feed the MED equipment.

Hot water demand curves are more predictable than heating or conditioning, since they do not depend on weather conditions and can be estimated from historic statistical records as in Fig. 5.

These curves define the percentage of the consume probability for every moment of the day.

Proceedings of the American Power Conference

Efficiency, Exhaust Temperature and Flow Correction for Part Load Operation. (For 100% use 1.0)

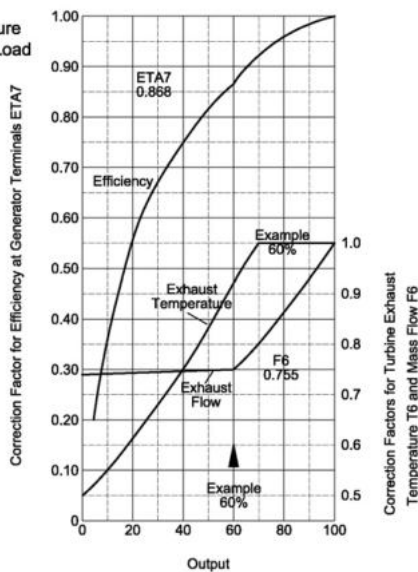


Fig. 4. GT efficiency at partial load.

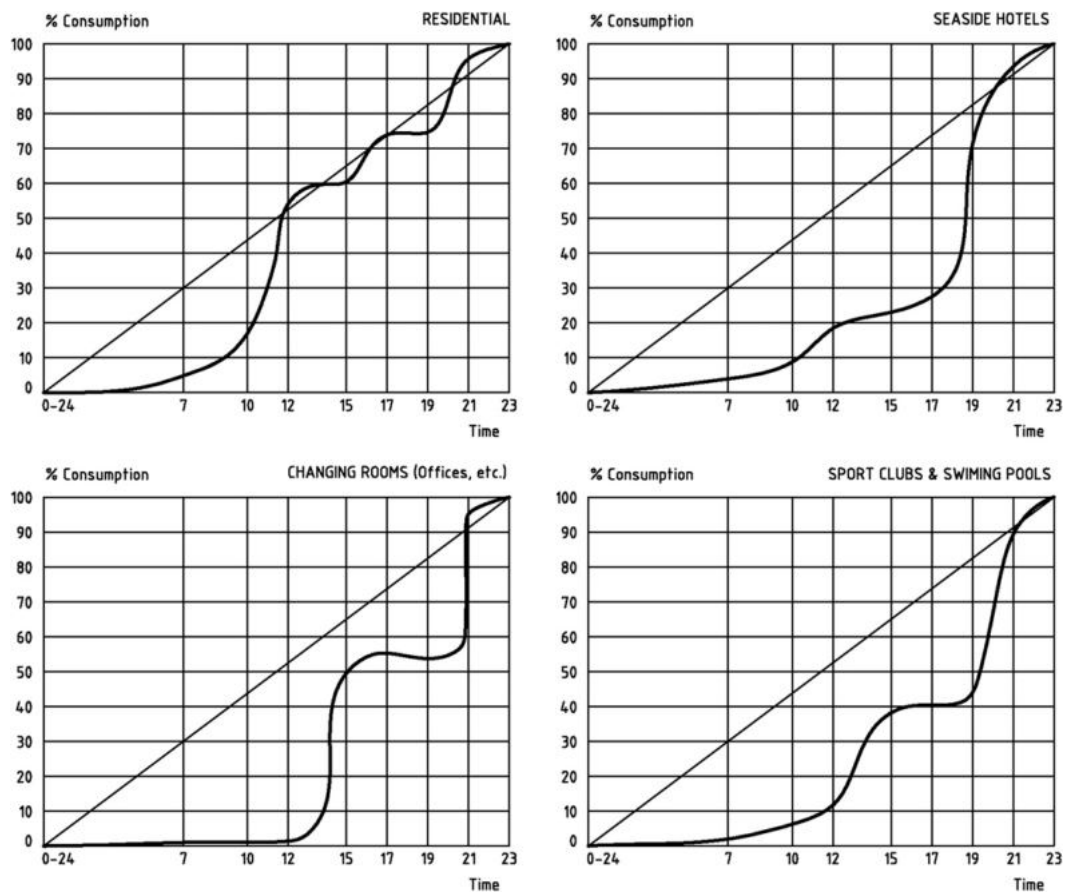


Fig. 5. Hot water consumption daily distribution.

To determine thermal demand; heating and conditioning, the shape of climate variations is needed with regard to both, temperature and solar irradiances. The most suitable procedure to approach the climatologic behavior is the statistical analysis of these parameters (temperatures and irradiances) for, at least, one year. These data are obtained from a meteorological observatory and are computed by a database in which averages per month, per year or time ranges in any season or time of the year. Database computing format is selected for being more flexible than calculation sheets in working with statistical tables and filtered reports. Appendix 1 shows models of meteorological data and averages calculated by month and time ranges.

5. Detailed description of the system

5.1. Load calculation

5.1.1. Electrical demand

One of the most important factors to design a cogeneration system is the electrical demand, from two points of view; magnitude and distribution.

The demand magnitude is the most representative parameter to select the generation equipment, it means power. Generator group has to be able to satisfy demand during peaks of power. On the other hand, has to be flexible to be adjusted to the power variation along the periods of operation. For this purpose, it is necessary to know as much approximately as possible, the demand curve on every studying period [19]. Electrical demand repeats daily in a very similar distribution differentiating working days and

weekend. The daily demand-generation curves can be taken from the Electrical National Operator. As an example, in Fig. 6, four curves are shown. It can be seen that shapes and magnitudes are slightly different when comparing weekend and working days. Because of this, the two types of days are differentiated within the study.

The maximal demand power and its distribution characteristic must be obtained, for the weekend as for the working days, to size the generation system.

Firstly, demand curves are to be calculated for both, weekend and working days as follows:

- It is considered that studied population of 200,000 inhabitants has got a distribution curve similar to the national one.
- From the web of National Electrical Operator (www.ree.es), the model and the shape of electrical distribution load are obtained for any day of the year in the Electrical Spanish.
- Two reference curves are taken. One for weekend and one for working days.
- Instantaneous power is taken every 30 min. This time period is selected to match the available meteorological periods.
- In Appendix 2, it can be seen a table with 24 columns reporting powers for both working and weekend days every 30 min.
- With obtained values of demanded power, it is obtained for every period a load coefficient dividing the power by the maximum power on that date. This coefficient allows the curve to become dimensionless.
- With the maximum power at every day, it is obtained the ratio weekend power/working day power.

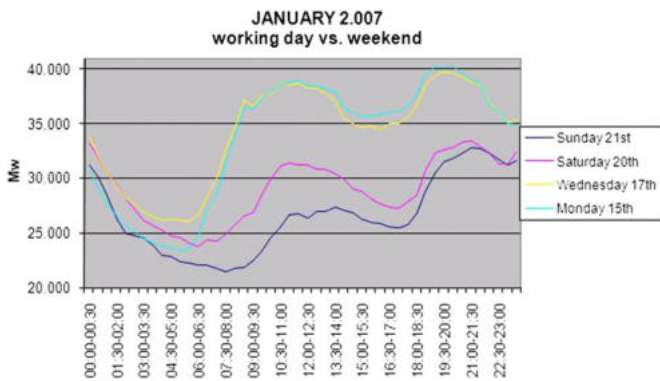


Fig. 6. Weekend vs. working days electrical demand.

- Applying the coefficients to the project calculated peak power, the demanded power for any time period of 30 min is obtained.

Project peak power is calculated analytically from receptor size powers by applying a simultaneity coefficient and adding all of them. The total electrical size power is shown in Table 1.

With this total peak power, the power of the generator system can be sized. Total value results to be 250.13 MW. There are several options to configure it from the different GT's ranges. In Section 5.3 "System configuration", the number and disposition of GT's and ST's to optimize the generation and consumption will be analyzed.

By means of the power coefficient applied to this total peak power, the electrical demand distribution can be plotted as follows in Fig. 7.

5.1.2. Transmission thermal load

In order to size conditioning equipment, it is necessary to know thermal gain/losses by conduction through walls and holes (windows and doors) due to temperature gradients.

The basic formula to calculate them is:

$$Q_{\text{tran}} = S \cdot U_i \cdot \Delta T_i \quad (1)$$

where: Q_{trans} = Transmission thermal power, S = Surface through the heat is transmitted, U_i = Thermal transmission coefficient for every material, ΔT_i = Temperature gradient through the surface.

Heat flow can be, mathematically, either positive or negative depending on the direction of transmission.

Table 1
Electrical power distribution.

Electrical power	P (MW)
Residential	143.75
Garage	13.92
Shopping areas	50.18
Offices	2.71
Public lighting	0.80
Hotels	16.00
Water supply	0.74
Air conditioning	2.00
Heating	2.00
Spas	2.60
Golf	0.45
Artificial lake	0.20
Reef	0.20
Ice skate	1.00
Leisure parks	5.00
Resort parks	9.00
System peak power=	250.55

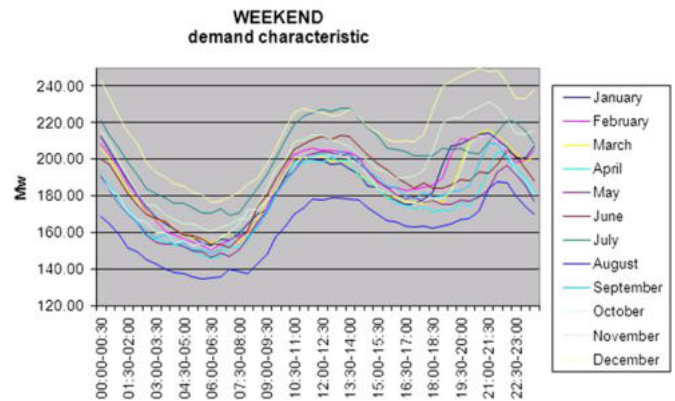
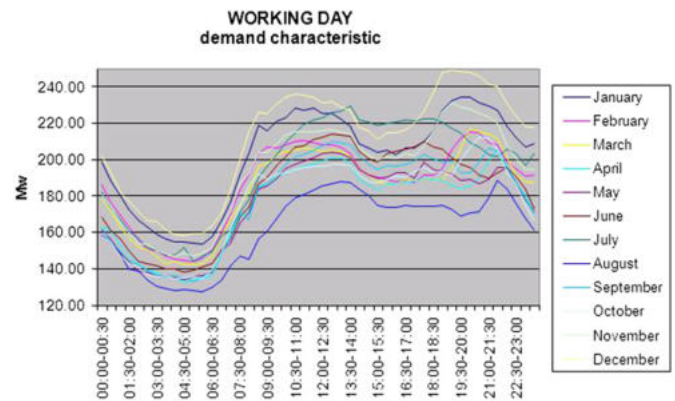


Fig. 7. Monthly demand electrical curves.

In Appendix 3, temperature values, temperature gradients referring interior and exterior of building, and both transmission and ventilation gain/losses can be found.

5.1.3. Ventilation thermal load

Ventilation thermal power can be seen in Appendix 3 for each 30 min period, the positive as well as the negative ones are taken as a function of temperature gradient. There can be thought in a heat exchanger to recover heat from exhausting ventilated air, but because of low temperature gradient between inlet and outlet airs, it is deduced that it is not profitable, comparing heat recovered and electrical ventilation power.

5.1.4. Irradiance

Oropesa's latitude is 40° 04' 30" corresponding to 0.6994 rad.

Solar declination along the year, so as solar high (zenith angle) along a day are variable. Thus, solar relative position is varying continuously. In consequence, incident irradiance magnitude varies as well. Absolute solar radiation emitted by sun can be considered as a constant in time. It is called Solar Constant and its value is assumed to be at the averaged earth distance 1367 W/m² according the World Radiation Reference Centre (WRRC), 1373 W/m² According la World Meteorological Organization (WMO), or de 1353 W/m² according National Aeronautics and Space Administration (NASA). The first value will be taken from equation (2):

$$I_{\text{sc}} = 4921 \frac{\text{KJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} = 1367 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (2)$$

Taking time periods as short as required and taking solar declination, distance correction coefficient, zenith angle and hour angle averaged for that period, it can be calculated the theoretical incident energy radiated onto a normal surface on the earth. It has

to be corrected with the incidence angle and the attenuation coefficient that is depending on atmosphere conditions, clouds, wind, smoke, etc.

The operational procedure is as follows:

Periods of 30 min are taken. Thus, there will be 48 in each day of the year, totalizing 17,520 records. Taking the different power and meteorological data from every period and averaging appropriately, it can be constructed a type day for every month of the year ranged in 30 min periods. Attenuation factor can be deduced comparing irradiation averaged values measured by meteorological observatory (www.meteocat.net) and analytically calculated the average irradiance per month from solar constant and geometrical parameters [17]. With the obtained values, a database (clima2007) is constructed containing the following data in 17,520 records:

- Month of the year
- Day of the month/year
- Hour of the day
- Temperature
- Relative humidity
- Rain fall
- Wind speed
- Wind direction
- Atmospheric pressure
- Solar radiation
- Julian day. Refers the ordinal location within the year. Used to calculate earth–sun distance coefficient and solar declination
- Solar declination (δ).
- Earth–sun distance coefficient.

On the other hand, two reports have been programmed to provide lists of values and averages:

- Meteorological data for every 30 min period formatted as 1 day per page (Appendix 1).
- Month average meteorological values and solar calculated parameters (Appendix 1).

5.1.5. Irradiance calculation

The following procedures are to calculate the irradiance solar power [20]:

- 1) From earth–sun distance, distance coefficient, daily angle, solar declination, dawn and dusk angles, length and latitude of the village it is calculated zenith angle.

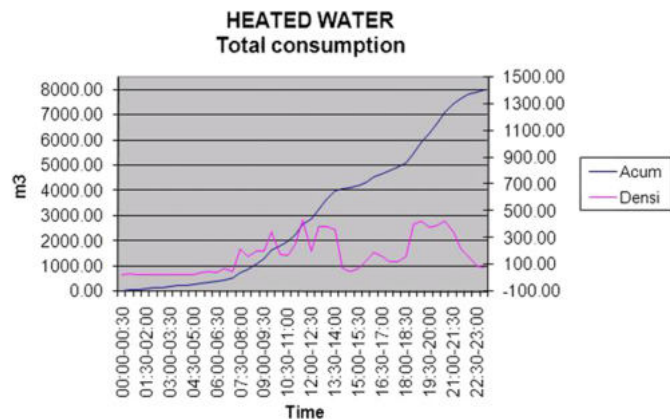


Fig. 8. Hot water consumption functions.

Table 2 Hot water demand.

	Calculation basis	Water flow, m ³ /day
Residential	30 l/day · person	8727
Hotels	30 l/day · bed	1431
Offices	3 l/day · person	44
Change rooms	20 l/day · service	87
Total		10,288

- 2) Attenuation coefficient is calculated as explained before comparing real measurements with the calculated ones [21].
- 3) Applying to solar constant the coefficients of attenuation, distance, angles, the real incident radiation is obtained.
- 4) By applying the corresponding efficiency to every panel type, the energy or thermal load transferred on each can be calculated:
 - a. Photovoltaic panels
 - b. Thermal panels
 - c. Building walls and holes

Collecting together the data and calculated results, a table is built in EXCEL format as per Appendix 4 where irradiances are shown for every 30 min period averaged by month from database parameters; I, ρ, δ

5.1.6. Hot water thermal demand

The thermal demand characteristic of the hot water is obtained analytically from every type of consumption present in the different buildings. Typified daily consumption percentage curves applied to the water total day consumption provide the water consumption distribution. Fig. 8 shows the density and accumulated functions.

Hot water curves obtained in calculation sheets (Appendix 5) are presented here as a graphic. These curves represent the statistical distribution along the day period depending on the consumption type. Needs of hot water are shown in Table 2.

Total day hot water flow equals 10,288 m³/day. Appendix 5 shows that peak-hour is about 11.30–12.00 when 5.36% of the total day water is consumed equalling 550 m³ during a half of an hour, that is a flow of 1100 m³/h.

5.2. Loads composition

Once demand curves are obtained, they are collected together in a calculation sheet overlapping demands and productions in order to assess the needs and the availabilities of energies, the generation plan is scheduled and the electrical and thermal residues are found out.

- First of all, the electrical power generation range of steps has to be defined as shown in Table 3.
- GT's are operated at full load conditions, thus, the value 1 or 0 is given to them depending on their status every period:

Table 3 Electrical generation power steps.

Power steps			
Up to	69.08	MW	Only TG1
Up to	96.14	MW	TG1 + TV up to 1/3
Up to	138.16	MW	TG1 + TG2
Up to	192.28	MW	TG1 + TG2 + TV up to 2/3
Up to	207.24	MW	TG1 + TG2 + TG3
Up to	288.41	MW	TG1 + TG2 + TG3 + TV up to 3/3

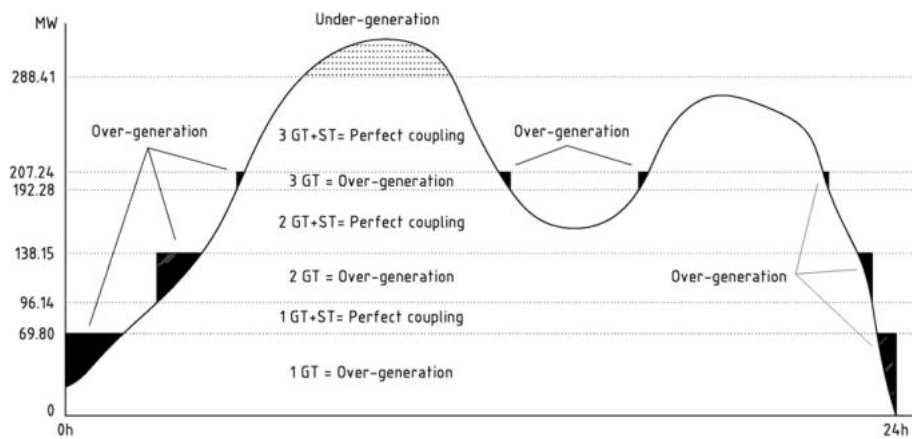


Fig. 9. Coupling electrical power steps.

- IF $E_{\text{central}} > 69.08$ THEN $TG1 = 1$
- IF $E_{\text{central}} > 96.14$ THEN $TG2 = 1$
- IF $E_{\text{central}} > 192.28$ THEN $TG3 = 1$

Electrical demanded power is calculated to establish how many of the GT's are to be run, and different coefficients are given the value 1 or 0 depending on the gap the system has to be.

- The ST has to generate the lack of energy to satisfy demand after generation from GT's plus photovoltaic electricity are calculated.

- IF $0 < E_{\text{plant}} < 69.80$ THEN $A = 1$
- IF $69.08 < E_{\text{plant}} < 96.14$ THEN $B = 1$
- IF $96.14 < E_{\text{plant}} < 138.16$ THEN $C = 1$
- IF $138.16 < E_{\text{plant}} < 192.28$ THEN $D = 1$
- IF $192.28 < E_{\text{plant}} < 207.24$ THEN $E = 1$
- IF $207.24 < E_{\text{plant}} < 288.41$ THEN $F = 1$

Once defined the step that GT's are running in, ST has to be regulated to supply exactly the energy lack as per the binary function:

$$\text{IF (A or C or E) THEN } TV = 0$$

$$\text{ELSE } TV = E_{\text{plant}} - W_{\text{GT}} \cdot (GT1 + GT2 + GT3) / W_{\text{ST}} \quad (3)$$

where W_{GT} and W_{ST} mean, respectively GT's and ST power.

Appendix 5 shows electrical demands and the corresponding regime of operation for each period. Fig. 9 shows graphically the way that power steps adjust generation curve to demand. It is seen how production exceeds need when ST does not reach the power and a new GT has to be turned on. As shown, another effect is present when the demand overcomes system peak power. This happens at 288.41 MW. This power is foreseen to be never reached, but in such case, less important receptors are to be switched off

Briefing, it can be said that the system generates electricity following the electrical demand after subtracting the photovoltaic

power while, in parallel, the thermal residual power from turbines, plus the solar thermal heat supply the different thermal needs:

- Heating and conditioning.
- Hot water.
- MED distillation that takes the whole heat residue to produce storable fresh water.

In Appendix 5 there can be seen the ranges of variation of these magnitudes in order to size system components that essentially are shown in Table 4.

With these values, the system rated power is picked from the supplier catalogues as shown in Table 5.

5.3. System configuration

The most proper system configuration based on 3 GT's \times 70 MW and 1 ST \times 80 MW according Fig. 10.

5.4. MED distillation heat

As seen in the previous section, residual heat from heating and conditioning is destined to distillate fresh water by means of a MultiEffect Distillation system based on low quality steam (saturated at 70 °C) to evaporate and condensate sea water in several stages or effects at low pressure allowing water to boil at 70 °C. Usual efficiency for these machines is about $9 \text{ m}^3/\text{Tm}_{\text{steam}}$. For this project, a model that reaches $10.14 \text{ m}^3/\text{Tm}_{\text{steam}}$ [22] is selected:

$$\eta_{\text{MED}} = \frac{10.14 \cdot \text{m}^3 \text{ water}}{\text{Tm}_{\text{steam}}} \quad (4)$$

The model is based on existing system in PSA (Solar Platform of Almería in Spain):

- m^3/h distilled water a 25 °C with salinity less than 50 ppm.

Table 4
Generation variable ranges.

	Minimum	Maximum
Electricity to generate, MW	127.57	249.34
Conditioning heating demand, MW	-151.56	81.48
Heat to warm up water, MW	3.5	61.41
Residual heat for distillation, MW	0	312.13

Table 5
Sizing values of generation.

	Power
Combined cycle, MW	290
Air conditioning equipment, MW	90
Heating equipment, MW	216
Water heating equipment, MW	90
Distillation equipment, MW	325

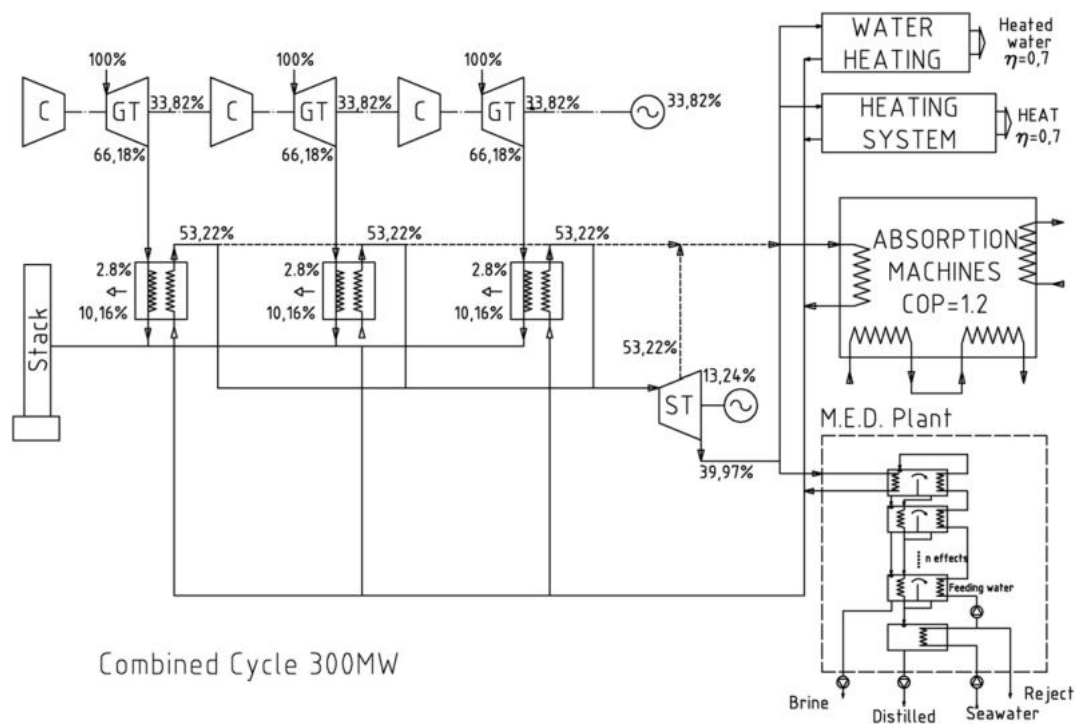


Fig. 10. Generation scheme of installation.

- 20 m³/h seawater pumped to condenser with 35,000 ppm salinity.
- 8 m³/h rejected seawater in condenser.
- 12 m³/h seawater pumped to MED system.
- m³/h brine outlet at 34.5 °C.
- Specific thermal consumption equaling 63 kWh/m³ and distilled water at 70 °C y 0.31 bar.

MED energy consumption equals $6.66 \cdot 10^6$ GJ/year. With this value, the amount of water obtained is:

$$\begin{aligned} \dot{M}_{\text{water}} &= 6.66 \cdot 10^6 \frac{\text{GJ}}{\text{year}} \cdot \frac{10^6}{\text{GJ}} \cdot \frac{1 \text{ Kg}_{\text{steam}}}{2300 \text{ KJ}} \cdot \frac{1 \text{ Tm}_{\text{steam}}}{10^3 \text{ Kg}} \cdot \frac{10.14 \text{ m}^3}{\text{Tm}_{\text{steam}}} \\ &= 29036 \cdot 10^6 \frac{\text{m}^3}{\text{year}} \end{aligned} \quad (5)$$

thus:

$$\frac{29.36 \cdot 10^6 \frac{\text{m}^3}{\text{year}}}{365 \frac{\text{days}}{\text{year}}} = 80.438 \frac{\text{m}^3}{\text{day}} \quad (6)$$

Table 6
Water consumption.

Service	m ³ /day
Residential	40,000
Hotels	3500
Restaurants	100
Golf fields	8250
Garden watering	2000
Green zones watering	8000
Sanitary centers	500

Assuming that, in developed societies, water consumption is about 200 l per person and day and the total population is 200,000 inhabitants, the daily amount of water demanded for residential purposes is:

$$200.000 \text{ per } \frac{200 \text{ l}}{\text{per-day}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{10^3 \text{ l}} = 40.000 \frac{\text{m}^3}{\text{day}} \quad (7)$$

Table 6 shows the rest of estimated consumptions.

There is a total foreseen water consumption of 62,350 m³/day, which yields a leftover of water for leisure resorts, swimming pools, etc.

Table 7
Energy.

Energy	PJ/year
Natural Gas Consumption	14.67
Electricity to generate to supply actual demand	5.62
Actual generated electricity from combined cycle	5.65
Photovoltaic generated electricity	0.23
Actual electricity demanded by clients	5.85
Excess of generated electricity (difference between generated and demanded electricity)	0.03
Generated heat from combined cycle	9.58
Solar irradiation heat onto building openings (Windows, doors, etc.)	0.49
Solar irradiation heat onto facade	0.33
Thermal losses/gain by transmission onto building openings	-0.44
Thermal losses/gain by ventilation onto building openings	-1.53
Total thermal losses/gain by irradiation, transmission and ventilation	-1.15
Heating and conditioning needed heat	2.50
Water heating needed energy	0.59
Solar energy	0.18
Residual thermal energy for distillation	6.66
Electrical power required for distillation purposes	0.20

Table 8
Fuel cost official price list.

Tarif	Term	Term	
		Fixed, €/client/month	Variable, c€/KWh
T.1	Consumption less or equal tan 5000 KWh/year	4.09	5.105351
T.2	Consumption over 5000 KWh/year and less than 50,000 KWh/year	8.33	4.498251
T.3	Consumption over 50,000 KWh/year and less than 100,000 KWh/year	53.51	3.950114
T.4	Consumption over 100,000 KWh/year	160.69	3.675814

Water distillation requires an averaged electrical power of about 2 kwh/m³ [23]. From the total annual water distilled, it can be deduced the auxiliary electrical energy to distillate the water,

$$29.36 \cdot 10^6 \frac{\text{m}^3}{\text{year}} \cdot 2 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{\text{h}} \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \cdot \frac{1 \text{ PJ}}{10^{12} \text{ kJ}} = 0.2 \frac{\text{PJ}}{\text{year}} \quad (8)$$

This electrical power cannot be computed at the beginning of the process since it is calculated from the residual thermal energy available for distillation purposes. To be taken into account as a demand input, an iterative process is needed to adjust this input with thermal and electrical demands and leftovers, in order to equal the estimated water to be distilled with the actual obtained from residual energies. This iterative calculation is not advisable to be obtained by means of EXCEL software, so it is beyond of the scope of this work to produce a more complex algorithm to evaluate it.

5.5. Economical study

Capital and operational costs are the most relevant factors to figure out the economic study. With these values and by means of any usual investment analysis we may calculate “pay-back”, NPV (Net Present Value), IRR (Internal Rate of Return), etc. [24].

To compute the operational cost, the following have to be considered:

- Fuel cost
- Operation and maintenance cost
- Environmental cost of CO₂ emissions
- Financial cost
- Other costs

Energy data to compute economic analysis are taken from Appendix 5, and shown in Table 7.

On the other hand, product prices are as follows:

■ ■	$P_{\text{kwh-elec}} = 0.09 \text{ €/kWh}$	Electricity price
■ ■	$P_{\text{kwh-GN}} = 0.0367 \text{ €/kWh}$	Gas natural price
■ ■	$P_{\text{O\&M}} = 0.01 \text{ €/kWh}$	Operation & maintenance cost
■ ■	$P_{\text{agua}} = 0.6 \text{ €/m}^3$	Network water price

Table 9
Different system costs.

Costs	Isolated cogeneration, M€/year	Network cogeneration, M€/year	Conventional, M€/year
Energy	149.81	148.95	241.90
O&M	40.76	40.66	0.00
Water network	0.00	0.00	13.65
Environmental (CO ₂)	11.27	11.20	20.82
Total	201.54	200.81	276.38
Primary energy (PJ)=	14.67	14.57	27.09

To take CO₂ into consideration, it is assessed from CO₂ emissions during gas combustion:

- Emission 34.85 Tm CO₂/h
- Production 735.41 GJ/h

Thus, the specific emission is:

$$\text{CO}_2 = \frac{34.85 \frac{\text{Tm}}{\text{h}}}{735.41 \frac{\text{GJ}}{\text{h}}} = 0.047 \frac{\text{Tm}}{\text{GJ}} \quad (9)$$

whose tax in CO₂ emissions market is **16.35 €/Tm**[25].

Fuel Price is taken from legal current rate [26], Table 8.

5.6. Efficiency

Once calculated the final year energies, the co-generated system (isolated or linked) can be compared with then on co-generated one with conventional efficiencies of 0.35 for electrical generation and 0.9 for thermal generation. Briefing the results in Table 9, it is shown that cogeneration system is an advantage in both, cost and primary energy (natural gas) [27]. O&M is a cost when combined cycle cogeneration but, on the other hand, there is a surplus that is free water from sea and less global fuel cost, same for isolated as for linked systems [28–31].

Investment cost might be considered in order to take into account that MED distillation plant construction is 1.15 or 1.25 times more expensive than a RO plant. Usual specific costs are as follows [23,32]:

	Construction, €/m ³ /day
MED	1000
RO	800

Under these circumstances, the difference of construction cost between the two systems is:

$$\Delta C_{\text{cons}} = (1000 - 800) \frac{\text{€}}{\text{m}^3} \cdot 80.438 \frac{\text{m}^3}{\text{day}} = 16.09 \text{ M€} \quad (10)$$

Considering that electrical consumption for RO desalination doubles the MED one, it yields:

$$\begin{aligned} \Delta C_{\text{el}} &= (4 - 2) \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \cdot 80.438 \frac{\text{m}^3}{\text{day}} \cdot 365 \frac{\text{day}}{\text{year}} \cdot 0.09 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \\ &= 5.28 \frac{\text{M€}}{\text{year}} \end{aligned} \quad (11)$$

The resultant pay-back for the extra-cost derived from constructing a MED plant instead of RO plant is:

$$r = \frac{16.09 \text{ M€}}{5.28 \frac{\text{M€}}{\text{year}}} = 3.05 \text{ year} \quad (12)$$

This is acceptable, as long as the common life for such kind of installations is greater than 15 years.

6. Conclusions

The most innovative contribution of this work is the intention to couple the generation characteristics with the demand ones. As a main innovation, a statistical methodology is developed based on electrical and meteorological real data which are adapted to a conception that despite of being discrete (30 min periods), it can simulate continuous demand curves. The second innovative contribution is to integrate water distillation to spend any residual energy not destined to electricity generation, heating nor conditioning. Such system could be called tetra-generation. With this strategy, primary energy consumption is optimized, minimizing environmental impact as well [33]. As a conclusion it is important to remark that the dimension of this project is not usual. But what is really valid is the way in which the analytic and synthetic methods obtain data and calculate results. This way can be used in any dimension project. The basic concept of the installation is to utilize the maximum amount of energy managed, returning to the environment the less achievable energetic level, thus to return the total energy spent along the processes. This derives into two positive effects. Firstly, total primary energy is minimized. Secondly, environmental impact is minimized as well, since there is no need to dissipate the heat coming from the turbine cycles, what makes less thermal impact to the environment surrounding the plant as it happens around conventional thermal power plants. Assuming that about 50% of the primary energy spent in a conventional plant is returned to the environment as heat dissipation, it is obvious that increasing

the number of this type of plants reflects in a trend to half the primary energy consumption. This must be the target for future approaches of electrical power plants until more profitable alternatives to fossil energy are found in order to eradicate combustion as mean of electrical and thermal generation. Then, cleaner energy production would be possible without environmental pollution such as CO₂.

This work intends to be a design exercise led to minimize combustion in a “non-clean” power generation context. This is not the optimal solution, since it is based on fossil fuel. But it is a palliative regarding the environmental pollution which is getting more harmful every day because of the produced residues from the increasing consumption of energy.

Appendix 1 Meteorological data.

Time range	Ts, °C	HR, %	PP, mm	VV, m/s	DV, Deg	P, hpa	RS, W/m ²
00:00+00:30	10.9	76	0	7.9	247	1028	0
00:30+01:00	11.3	73	0	8.4	248	1028	0
01:00+01:30	11.7	71	0	8.4	248	1027	0
01:30+02:00	11.7	71	0	8.4	254	1027	0
02:00+02:30	12	70	0	8.9	253	1027	0
02:30+03:00	11.8	71	0	7.9	254	1027	0
03:00+03:30	11.3	73	0	9.6	262	1026	0
03:30+04:00	10.8	74	0	9.6	261	1026	0
04:00+04:30	10.5	72	0	10.7	268	1026	0
04:30+05:00	10.6	70	0	10.5	265	1026	0
05:00+05:30	10.3	70	0	8.6	267	1026	0
05:30+06:00	9.6	73	0	5.2	245	1026	0
06:00+06:30	9.4	75	0	5.5	239	1025	0
06:30+07:00	10	74	0	6	241	1025	0
07:00+07:30	10.4	74	0	5.9	239	1025	0
07:30+08:00	10.2	74	0	4.9	248	1026	0
08:00+08:30	10.7	74	0	7.1	300	1026	0
08:30+09:00	10.6	74	0	8	280	1026	23
09:00+09:30	10.2	76	0	7.3	268	1026	55
09:30+10:00	10.4	77	0	8.2	255	1025	70
10:00+10:30	10.6	76	0	7.5	288	1025	94
10:30+11:00	10.8	75	0	6.1	298	1025	175
11:00+11:30	11.4	74	0	1.5	305	1025	124
11:30+12:00	11.4	74	0	1.7	321	1025	168
12:00+12:30	11.6	73	0	0.8	293	1024	208
12:30+13:00	11.4	75	0	0.8	100	1024	130
13:00+13:30	11.4	74	0	0.1	156	1024	159
13:30+14:00	12.1	73	0	1.1	22	1023	172
14:00+14:30	11.9	73	0	1.6	310	1023	118
14:30+15:00	12.1	74	0	0.3	269	1023	127
15:00+15:30	12.1	73	0	0.9	43	1023	81
15:30+16:00	11.6	75	0	0.8	338	1023	3
16:00+16:30	11.5	76	0	1.1	21	1023	0
16:30+17:00	11.4	76	0	0.5	358	1023	0
17:00+17:30	11.1	77	0	1.9	325	1023	0
17:30+18:00	11.3	77	0	3.4	317	1023	0
18:00+18:30	11.1	77	0	2.3	323	1023	0
18:30+19:00	10.8	79	0	2	320	1024	0
19:00+19:30	10.8	79	0	2.1	312	1024	0
19:30+20:00	10.6	80	0	1	314	1024	0
20:00+20:30	10.6	80	0	0.7	292	1024	0
20:30+21:00	10.2	82	0	2.1	195	1023	0
21:00+21:30	10	83	0	1.5	204	1023	0
21:30+22:00	9.9	84	0	1.5	233	1023	0
22:00+22:30	10	84	0	2	264	1023	0
22:30+23:00	9.7	85	0	2.1	306	1023	0
23:00+23:30	9.7	85	0	2.3	310	1023	0
23:30+00:00	9.4	86	0	2.9	341	1023	0

Appendix 2

Monthly averages per time range.

Time range	Ts, °C	HR, %	PP, mm	VV, m/s	DV, Deg	P, hPa	RS, W/m ²	Gamma	rho	Delta, rad
00:00+00:30	8.4	76	0.00	7.0	236	1017	0.0	0.2582	0.9835	-0.3634
00:30+01:00	8.4	76	0.00	7.0	240	1017	0.0	0.2582	0.9835	-0.3634
01:00+01:30	8.3	76	0.00	6.8	224	1017	0.0	0.2582	0.9835	-0.3634
01:30+02:00	8.2	76	0.00	6.5	218	1017	0.0	0.2582	0.9835	-0.3634
02:00+02:30	8.1	77	0.00	6.0	225	1017	0.0	0.2582	0.9835	-0.3634
02:30+03:00	7.9	78	0.00	5.8	227	1017	0.0	0.2582	0.9835	-0.3634
03:00+03:30	7.9	78	0.00	5.9	241	1016	0.0	0.2582	0.9835	-0.3634
03:30+04:00	7.7	78	0.00	6.0	246	1016	0.0	0.2582	0.9835	-0.3634
04:00+04:30	7.8	78	0.00	5.8	238	1016	0.0	0.2582	0.9835	-0.3634
04:30+05:00	7.7	78	0.00	6.0	245	1016	0.0	0.2582	0.9835	-0.3634
05:00+05:30	7.7	78	0.00	6.1	247	1016	0.0	0.2582	0.9835	-0.3634
05:30+06:00	7.7	77	0.00	5.9	250	1016	0.0	0.2582	0.9835	-0.3634
06:00+06:30	7.7	77	0.00	5.8	240	1016	0.0	0.2582	0.9835	-0.3634
06:30+07:00	7.8	76	0.00	5.9	238	1017	0.0	0.2582	0.9835	-0.3634
07:00+07:30	7.8	76	0.00	6.0	253	1017	0.0	0.2582	0.9835	-0.3634
07:30+08:00	7.9	75	0.00	6.0	257	1017	4.5	0.2582	0.9835	-0.3634
08:00+08:30	8.3	73	0.00	6.2	264	1017	41.2	0.2582	0.9835	-0.3634
08:30+09:00	8.5	72	0.00	5.7	264	1017	92.7	0.2582	0.9835	-0.3634
09:00+09:30	8.7	71	0.00	5.7	257	1017	148.5	0.2582	0.9835	-0.3634
09:30+10:00	9.1	70	0.00	5.2	236	1017	207.6	0.2582	0.9835	-0.3634
10:00+10:30	9.9	66	0.00	5.3	241	1017	253.5	0.2582	0.9835	-0.3634
10:30+11:00	10.5	63	0.00	4.8	242	1017	301.8	0.2582	0.9835	-0.3634
11:00+11:30	11.0	61	0.00	4.3	238	1017	337.7	0.2582	0.9835	-0.3634
11:30+12:00	11.6	59	0.10	3.8	232	1017	358.1	0.2582	0.9835	-0.3634
12:00+12:30	11.9	59	0.01	3.4	232	1016	343.8	0.2582	0.9835	-0.3634
12:30+13:00	12.3	58	0.01	3.5	225	1016	334.1	0.2582	0.9835	-0.3634
13:00+13:30	12.6	58	0.01	3.5	211	1016	326.2	0.2582	0.9835	-0.3634
13:30+14:00	12.8	58	0.00	3.4	217	1016	306.4	0.2582	0.9835	-0.3634
14:00+14:30	12.8	58	0.00	3.5	224	1016	263.0	0.2582	0.9835	-0.3634
14:30+15:00	12.5	59	0.00	3.5	214	1016	213.5	0.2582	0.9835	-0.3634
15:00+15:30	12.1	62	0.00	3.5	219	1016	152.0	0.2582	0.9835	-0.3634
15:30+16:00	11.8	64	0.00	3.6	226	1016	81.5	0.2582	0.9835	-0.3634
16:00+16:30	11.0	65	0.00	3.6	229	1016	21.3	0.2582	0.9835	-0.3634
16:30+17:00	10.3	68	0.00	4.2	248	1016	0.7	0.2582	0.9835	-0.3634
17:00+17:30	9.9	70	0.00	5.0	251	1016	0.0	0.2582	0.9835	-0.3634
17:30+18:00	9.7	71	0.00	5.1	254	1017	0.0	0.2582	0.9835	-0.3634
18:00+18:30	9.6	71	0.01	5.1	246	1017	0.0	0.2582	0.9835	-0.3634
18:30+19:00	9.5	71	0.01	5.4	250	1017	0.0	0.2582	0.9835	-0.3634
19:00+19:30	9.3	71	0.00	5.4	261	1017	0.0	0.2582	0.9835	-0.3634
19:30+20:00	9.1	71	0.00	5.7	244	1017	0.0	0.2582	0.9835	-0.3634
20:00+20:30	9.1	72	0.00	6.0	247	1017	0.0	0.2582	0.9835	-0.3634
20:30+21:00	9.1	72	0.00	6.2	262	1017	0.0	0.2582	0.9835	-0.3634
21:00+21:30	9.0	73	0.00	6.2	251	1017	0.0	0.2582	0.9835	-0.3634
21:30+22:00	8.9	73	0.00	6.6	241	1017	0.0	0.2582	0.9835	-0.3634
22:00+22:30	8.8	74	0.00	6.9	242	1017	0.0	0.2582	0.9835	-0.3634
22:30+23:00	8.5	75	0.00	6.9	246	1017	0.0	0.2582	0.9835	-0.3634
23:00+23:30	8.4	76	0.01	7.0	248	1017	0.0	0.2582	0.9835	-0.3634
23:30+00:00	8.4	76	0.00	6.8	238	1017	0.0	0.2582	0.9835	-0.3634

Appendix 3
Averaged electrical demand per time range.

Time	January		February		March		April		May		June		July		August		September		October		November		December		Average		Maximum		Minimum			
	Work	W-end.	Work	W-end.	Work	W-end.	Work	W-end.	Work	W-end.	Work	W-end.	Work	W-end.	Work	W-end.	Work	W-end.	Work	W-end.	Work	W-end.	Work	W-end.	Work	W-end.	Work	W-end.	Work	W-end.		
	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW		
00:00-00:30	198.89	212.58	186.35	208.53	178.55	206.25	163.20	191.79	161.28	190.48	168.58	200.22	182.03	221.10	158.06	168.48	162.20	188.48	157.99	189.02	181.00	215.22	202.42	234.25	202.42	243.25	175.05	202.95	202.42	243.25	157.99	168.48
00:30-01:00	188.59	204.66	176.30	202.14	171.76	199.80	161.43	186.35	156.59	182.98	161.34	196.86	173.57	213.24	154.45	164.87	154.80	183.50	154.95	183.24	174.15	209.72	193.41	234.04	168.45	196.78	168.45	196.78	154.80	164.87		
01:00-01:30	180.11	195.17	169.59	195.17	152.70	190.87	152.70	179.41	148.80	188.85	167.04	188.85	167.04	195.17	140.29	158.76	149.87	175.44	147.11	180.08	165.29	190.82	181.90	223.00	160.88	188.92	160.88	188.92	148.80	158.76		
01:30-02:00	172.69	188.14	163.31	186.64	153.04	182.73	147.40	172.68	144.31	169.95	150.23	180.92	160.93	180.92	140.16	151.87	144.91	169.65	142.65	171.42	160.12	190.43	177.20	214.81	155.08	181.45	155.08	181.45	140.16	151.87		
02:00-02:30	166.41	180.48	155.99	179.80	151.47	176.79	143.14	164.60	138.73	165.09	143.88	174.51	156.65	191.22	138.43	149.03	142.01	165.06	140.37	167.24	153.52	180.96	171.11	208.10	171.11	208.10	150.14	175.24	171.11	208.10	138.43	149.03
02:30-03:00	163.10	174.14	150.53	171.82	139.19	157.06	136.40	154.32	131.38	158.50	142.67	169.98	151.68	183.95	137.45	147.17	136.42	152.23	135.11	165.93	150.13	174.50	166.43	198.55	166.43	198.55	144.15	169.49	166.43	198.55	133.72	145.17
03:00-03:30	159.16	167.99	149.83	166.41	146.22	167.23	138.32	156.05	136.40	154.32	141.38	167.63	149.85	180.98	130.26	142.56	139.29	157.23	135.51	160.12	153.33	175.54	166.26	192.83	166.26	192.83	147.98	165.65	166.26	192.83	147.98	165.65
03:30-04:00	156.40	164.77	146.76	160.71	143.04	166.08	135.60	154.69	136.09	153.28	140.15	165.56	147.55	179.07	129.48	139.91	135.60	158.66	136.10	159.74	148.05	169.40	161.24	190.00	161.24	190.00	143.01	163.49	161.24	190.00	129.48	139.91
04:00-04:30	154.52	161.76	144.97	158.80	144.20	161.57	134.91	152.29	133.81	154.14	139.85	161.65	147.34	175.88	128.15	137.76	136.41	153.56	134.34	154.17	146.94	166.89	159.09	186.54	142.18	160.50	142.18	160.50	128.15	137.76		
04:30-05:00	154.82	158.45	144.79	156.07	142.38	159.13	132.05	152.19	133.48	152.26	138.34	158.45	151.89	176.06	128.74	137.68	134.92	153.81	135.29	155.50	148.93	164.65	158.22	186.46	142.02	159.14	142.02	159.14	128.74	137.68		
05:00-05:30	154.24	157.31	143.86	154.28	141.99	157.09	134.17	149.65	135.58	150.12	139.02	158.28	144.23	173.65	127.95	135.60	132.94	150.62	135.81	153.06	146.72	164.47	159.22	181.72	141.31	157.15	141.31	157.15	127.95	135.60		
05:30-06:00	153.73	153.87	143.55	152.97	142.95	157.11	134.82	146.93	136.17	148.96	141.13	156.47	147.10	170.77	127.36	134.19	135.48	150.44	134.73	154.16	148.80	162.41	159.73	180.34	142.30	155.72	142.30	155.72	127.36	134.19		
06:00-06:30	157.49	152.57	150.62	150.17	147.01	154.22	136.13	145.85	138.02	146.26	142.87	153.43	149.56	170.42	129.69	135.29	138.56	148.67	139.39	151.08	151.53	160.50	163.71	176.30	163.71	176.30	163.71	176.30	147.01	154.22		
06:30-07:00	166.76	156.24	160.19	153.48	157.67	156.80	148.72	146.79	149.68	148.39	150.78	153.52	158.04	173.15	133.69	135.91	148.82	150.62	149.59	157.64	164.32	162.93	170.70	177.02	154.91	156.04	154.91	156.04	148.72	146.79		
07:00-07:30	176.80	155.70	169.87	155.86	167.46	160.14	160.20	152.06	153.90	146.70	156.47	151.39	161.32	169.55	141.85	139.95	157.35	154.88	161.74	159.83	171.21	163.80	183.30	179.50	163.46	157.45	163.46	157.45	141.85	139.95		
07:30-08:00	192.26	159.49	183.56	157.93	175.52	154.85	169.01	151.83	165.37	150.48	168.87	156.79	171.32	170.74	146.77	138.42	170.01	160.81	174.64	164.33	187.15	167.73	200.48	181.60	175.41	159.58	200.48	181.60	146.77	138.42		
08:00-08:30	203.35	164.41	191.26	159.82	181.78	158.67	171.42	155.02	170.52	156.94	173.58	161.03	178.05	176.82	144.99	137.62	167.39	162.93	185.35	172.22	192.31	167.03	215.04	186.54	181.25	162.73	215.04	186.54	144.99	137.62		
08:30-09:00	218.88	169.99	203.21	164.23	196.16	166.95	184.47	165.09	183.83	165.66	186.84	173.86	190.32	184.04	156.51	142.84	185.10	162.62	192.23	172.44	202.31	174.42	225.72	189.18	193.93	169.28	225.72	189.18	156.51	142.84		
09:00-09:30	215.83	172.08	206.82	174.13	197.81	178.14	186.95	172.45	185.64	171.01	190.35	180.34	196.51	191.55	160.49	148.07	186.97	170.97	189.42	177.55	204.12	184.94	225.47	197.70	195.53	176.58	225.47	197.70	160.49	148.07		
09:30-10:00	221.13	182.72	206.59	183.83	202.01	184.41	190.06	181.90	190.01	180.90	196.66	189.39	202.88	200.47	167.88	157.81	192.31	181.13	192.03	182.99	208.98	194.69	230.95	205.94	200.12	185.52	230.95	205.94	167.88	157.81		
10:00-10:30	227.19	191.47	207.91	194.81	204.40	193.87	192.66	189.45	195.04	180.10	201.47	197.61	209.42	210.82	174.30	163.60	197.74	187.73	192.85	192.22	213.32	200.21	234.51	216.94	203.87	194.07	234.51	216.94	174.30	163.60		
10:30-11:00	228.48	199.00	209.68	202.56	204.94	200.64	194.75	197.60	197.53	193.70	206.76	205.58	214.80	219.14	179.05	170.16	201.60	193.79	194.65	198.57	215.07	209.71	235.76	225.36	206.92	201.32	235.76	225.36	179.05	170.16		
11:00-11:30	227.28	201.48	210.58	204.93	206.35	200.52	196.38	198.09	199.48	201.07	207.75	208.56	219.35	223.61	181.03	173.48	202.79	199.56	195.54	201.52	215.14	210.53	235.52	228.09	208.10	204.29	235.52	228.09	181.03	173.48		
11:30-12:00	228.39	200.87	209.58	205.87	205.94	201.05	197.33	198.93	201.16	203.00	211.28	210.42	221.88	223.22	183.37	178.19	205.00	201.62	196.38	201.52	215.44	213.17	234.25	225.94	209.17	205.38	234.25	225.94	183.37	178.19		
12:00-13:00	225.45	199.72	208.34	204.55	204.88	201.55	199.01	198.21	203.70	203.47	213.90	210.95	226.09	226.20	186.58	178.65	209.69	202.46	197.49	201.10	215.96	213.04	231.22	225.48	209.46	205.66	231.22	225.48	186.58	178.65		
12:30-13:00	225.33	197.19	208.35	205.00	205.34	199.17	200.81	200.60	203.76	203.47	213.90	210.95	226.09	226.20	186.58	178.65	209.69	202.46	197.49	201.10	215.96	213.04	231.22	225.48	209.46	205.66	231.22	225.48	186.58	178.65		
13:00-13:30	222.48	197.49	206.72	204.40	204.33	199.51	200.77	199.10	203.67	201.85	213.34	212.85	226.34	227.95	187.80	178.82	209.56	204.19	197.65	202.02	215.17	208.88	228.92	224.29	209.73	205.11	228.92	224.29	187.80	178.82		
13:30-14:00	218.30	194.63	203.59	203.45	201.46	198.26	197.78	199.01	201.31	202.89	212.82	212.22	229.23	227.91	187.33	178.19	208.28	202.36	196.73	199.96	214.07	207.04	227.20	227.35	208.18	204.44	229.23	227.91	187.33	178.19		
14:00-14:30	208.91	191.75	195.09	201.09	194.26	191.34	189.32	190.84	194.36	197.30	204.42	207.08	222.02	222.16	183.79	177.53	202.12	198.99	191.59	196.97	206.15	202.41	217.46	222.49	200.79	199.99	222.02	222.49	183.79	177.53		
14:30-15:00	206.51	185.48	191.44	193.08	191.68	188.84	186.33	188.39	191.43	193.94	200.62	202.47	220.46	217.11	180.18	173.61	197.23	193.32	188.04	191.20	202.32	199.37	215.70	218.01	197.66	195.40	220.46	218.01	180.18	173.61		
15:00-15:30	204.10	184.72	190.36	188.52	187.76	184.54	183.34	184.24	190.00	187.63	198.78	197.95	218.96	213.11	174.73	169.96	194.59	189.78	187.35	184.02	199.56	194.48	211.26	214.68	195.05	191.14	211.26	214.68	174.73	169.96		
15:30-16:00	205.21	179.88	189.11	183.86	186.82	179.64	186.94	179.09	190.37	184.96	203.47	194.34	220.28	206.05	173.82	166.10	196.82	185.32	188.90	181.09	201.90	193.25	214.57	210.99	196.52	187.04	220.28	210.99	173.82	166.10		
16:00-16:30	202.79	177.58	188.21	184.50	187.02	179.52	186.56	176.04	192.73	180.49	204.86	190.16	220.52	205.24	173.51	165.59	196.43	184.79	190.81	180.18	200.69	189.50	214.84	209.35								

Appendix 4
Thermal transmission.

Time	Jan, MW	Feb, MW	Mar, MW	Apr, MW	May, MW	Jun, MW	Jul, MW	Aug, MW	Sep, MW	Oct, MW	Nov, MW	Dec, MW	Ave., MW	Max, MW	Min, MW
00:00–00:30	-29.39	-27.28	-27.01	-17.85	-13.26	-4.90	-1.50	-0.73	-5.97	-14.43	-26.30	-31.93	-16.71	-0.73	-31.93
00:30–01:00	-29.59	-27.46	-27.11	-17.93	-13.14	-5.22	-1.60	-0.74	-6.05	-14.52	-26.43	-31.78	-16.80	-0.74	-31.78
01:00–01:30	-29.69	-27.69	-27.36	-17.95	-13.36	-5.34	-1.41	-0.76	-6.12	-14.62	-26.75	-31.80	-16.90	-0.76	-31.80
01:30–02:00	-30.00	-27.79	-27.59	-18.00	-13.68	-5.61	-1.62	-0.75	-6.14	-14.82	-26.75	-32.08	-17.07	-0.75	-32.08
02:00–02:30	-30.20	-27.82	-27.61	-18.00	-13.81	-5.70	-1.84	-0.77	-6.34	-15.00	-26.96	-32.08	-17.18	-0.77	-32.08
02:30–03:00	-30.73	-28.12	-27.92	-18.30	-14.28	-5.70	-1.96	-0.80	-6.58	-15.17	-27.18	-32.00	-17.40	-0.80	-32.00
03:00–03:30	-30.91	-28.25	-28.20	-18.55	-14.57	-5.95	-2.11	-0.92	-6.85	-15.34	-27.46	-32.39	-17.62	-0.92	-32.39
03:30–04:00	-31.32	-28.35	-28.27	-18.60	-14.60	-5.92	-2.33	-1.16	-7.22	-15.57	-27.61	-32.74	-17.81	-1.16	-32.74
04:00–04:30	-31.16	-28.63	-28.80	-18.80	-14.75	-5.90	-2.71	-1.31	-7.56	-15.59	-27.84	-32.77	-17.99	-1.31	-32.77
04:30–05:00	-31.37	-28.73	-29.31	-18.90	-14.65	-5.63	-2.79	-1.45	-7.71	-15.64	-28.37	-32.77	-18.11	-1.45	-32.77
05:00–05:30	-31.34	-28.75	-29.18	-18.90	-14.48	-5.07	-2.23	-1.96	-7.93	-15.66	-28.42	-32.79	-18.06	-1.96	-32.79
05:30–06:00	-31.19	-28.85	-29.36	-18.60	-14.05	-4.07	-1.28	-1.99	-7.83	-15.62	-28.73	-32.82	-17.87	-1.28	-32.82
06:00–06:30	-31.39	-28.98	-29.49	-18.05	-13.29	-3.25	-0.76	-1.65	-7.63	-15.71	-28.85	-32.87	-17.66	-0.76	-32.87
06:30–07:00	-31.04	-28.96	-28.88	-17.03	-12.42	-2.45	-0.68	-0.92	-7.10	-15.57	-28.90	-33.25	-17.27	-0.68	-33.25
07:00–07:30	-31.14	-28.60	-28.09	-16.14	-11.64	-0.77	-0.59	-0.71	-5.88	-14.60	-28.80	-33.33	-16.69	-0.59	-33.33
07:30–08:00	-30.71	-28.27	-26.85	-15.14	-10.09	-0.68	-0.51	-0.66	-4.32	-13.56	-28.35	-33.05	-16.02	-0.51	-33.05
08:00–08:30	-29.77	-27.64	-25.57	-14.15	-7.93	-0.58	-0.43	-0.58	-2.69	-12.65	-27.94	-32.46	-15.20	-0.43	-32.46
08:30–09:00	-29.16	-26.63	-23.93	-12.87	-5.39	-0.46	-0.36	-0.53	-0.99	-11.66	-26.98	-31.85	-14.23	-0.36	-31.85
09:00–09:30	-28.73	-25.37	-22.05	-11.64	-3.25	-0.41	-0.29	-0.48	-0.71	-9.74	-25.24	-31.14	-13.25	-0.29	-31.14
09:30–10:00	-27.69	-23.68	-19.62	-10.50	-1.09	-0.35	0.95	-0.42	-0.63	-8.05	-23.75	-30.17	-12.08	0.95	-30.17
10:00–10:30	-25.59	-21.17	-16.88	-8.98	-0.71	-0.30	2.29	-0.38	-0.56	-6.44	-22.98	-29.26	-10.91	2.29	-29.26
10:30–11:00	-24.33	-19.60	-14.92	-7.98	-0.63	0.05	3.58	-0.37	-0.53	-5.51	-22.12	-28.32	-10.06	3.58	-28.32
11:00–11:30	-22.90	-18.72	-13.34	-7.32	-0.58	1.79	4.73	-0.34	-0.50	-5.07	-20.95	-27.06	-9.19	4.73	-27.06
11:30–12:00	-21.42	-17.23	-12.03	-7.00	-0.56	3.30	5.67	-0.30	-0.47	-4.34	-19.07	-25.44	-8.24	5.67	-25.44
12:00–12:30	-20.72	-16.43	-11.51	-6.88	-0.54	4.40	6.98	-0.29	-0.45	-3.54	-18.70	-24.96	-7.72	6.98	-24.96
12:30–13:00	-19.75	-15.86	-11.12	-6.90	-0.52	4.33	7.91	-0.29	-0.44	-3.47	-17.85	-24.56	-7.37	7.91	-24.56
13:00–13:30	-19.05	-15.00	-10.75	-6.44	-0.52	4.59	8.38	-0.27	-0.42	-3.03	-17.20	-24.08	-6.98	8.38	-24.08
13:30–14:00	-18.40	-14.85	-11.46	-6.02	-0.55	4.54	7.56	-0.26	-0.42	-3.25	-16.98	-24.08	-7.01	7.56	-24.08
14:00–14:30	-18.42	-14.95	-11.88	-6.56	-0.57	3.47	7.40	-0.12	-0.43	-3.73	-16.71	-24.23	-7.23	7.40	-24.23
14:30–15:00	-19.15	-15.52	-13.56	-7.51	-0.59	2.22	7.23	-0.05	-0.43	-4.97	-17.70	-24.64	-7.89	7.23	-24.64
15:00–15:30	-20.17	-16.38	-14.97	-9.10	-0.66	1.09	6.04	-0.27	-0.46	-6.41	-18.77	-25.47	-8.79	6.04	-25.47
15:30–16:00	-21.07	-17.68	-16.81	-10.28	-0.75	-0.19	4.62	-0.31	-0.49	-7.61	-20.02	-26.60	-9.77	4.62	-26.60
16:00–16:30	-22.83	-19.85	-18.20	-11.54	-1.67	-0.34	2.55	-0.34	-0.55	-9.35	-21.40	-27.89	-10.95	2.55	-27.89
16:30–17:00	-24.74	-21.67	-19.92	-13.73	-3.20	-0.43	0.07	-0.38	-0.64	-10.95	-22.88	-29.11	-12.30	0.07	-29.11
17:00–17:30	-25.77	-23.25	-21.95	-15.37	-5.29	-0.51	-0.33	-0.45	-0.74	-12.23	-23.55	-29.79	-13.27	-0.33	-29.79
17:30–18:00	-26.22	-24.16	-23.45	-16.41	-7.66	-0.61	-0.43	-0.54	-1.99	-12.82	-23.91	-30.22	-14.03	-0.43	-30.22
18:00–18:30	-26.50	-24.58	-24.36	-17.48	-9.32	-0.73	-0.55	-0.62	-3.32	-13.36	-24.23	-30.66	-14.64	-0.55	-30.66
18:30–19:00	-26.70	-25.14	-24.76	-18.13	-9.91	-1.62	-0.63	-0.67	-4.10	-13.86	-24.56	-30.88	-15.08	-0.63	-30.88
19:00–19:30	-27.18	-25.67	-24.84	-18.15	-10.68	-2.93	-0.68	-0.70	-4.46	-14.28	-24.84	-30.81	-15.43	-0.68	-30.81
19:30–20:00	-27.66	-25.87	-25.09	-18.05	-10.70	-3.51	-0.72	-0.73	-4.73	-14.33	-24.94	-30.94	-15.60	-0.72	-30.94
20:00–20:30	-27.74	-25.95	-25.44	-17.98	-10.87	-3.51	-0.73	-0.75	-4.97	-14.57	-25.14	-31.16	-15.73	-0.73	-31.16
20:30–21:00	-27.76	-25.95	-25.79	-17.73	-10.90	-3.30	-0.74	-0.75	-5.07	-14.85	-25.34	-31.34	-15.79	-0.74	-31.34
21:00–21:30	-27.94	-26.12	-25.90	-17.53	-11.00	-3.30	-0.75	-0.76	-5.19	-14.90	-25.44	-31.52	-15.86	-0.75	-31.52
21:30–22:00	-28.30	-26.22	-25.82	-17.50	-11.32	-3.32	-0.75	-0.77	-5.17	-14.72	-25.52	-31.44	-15.90	-0.75	-31.44
22:00–22:30	-28.63	-26.43	-25.92	-17.13	-11.71	-3.61	-0.76	-0.77	-5.14	-14.72	-25.59	-31.70	-16.01	-0.76	-31.70
22:30–23:00	-29.26	-26.60	-26.07	-17.15	-12.25	-3.85	-0.87	-0.77	-5.39	-14.85	-25.82	-31.80	-16.22	-0.77	-31.80
23:00–23:30	-29.49	-26.75	-26.37	-18.57	-12.60	-4.15	-0.99	-0.76	-5.68	-14.87	-25.87	-31.78	-16.49	-0.76	-31.78
23:30–00:00	-29.41	-26.78	-26.60	-18.55	-12.89	-4.15	-1.21	-0.75	-5.92	-14.85	-26.32	-31.83	-16.61	-0.75	-31.83
Daily =													-14.02	8.38	-33.33

Appendix 5

Thermal ventilation.

Time	Jan, MW	Feb, MW	Mar, MW	Apr, MW	May, MW	Jun, MW	Jul, MW	Aug, MW	Sep, MW	Oct, MW	Nov, MW	Dec, MW	Ave., MW	Max, MW	Min, MW
00:00–00:30	-104.24	-96.75	-95.76	-62.82	-46.12	-15.34	-2.71	0.00	-19.31	-50.36	-93.23	-113.27	-58.33	0.00	-113.27
00:30–01:00	-104.97	-97.39	-96.12	-63.09	-45.67	-16.52	-3.07	0.00	-19.59	-50.72	-93.68	-112.73	-58.63	0.00	-112.73
01:00–01:30	-105.33	-98.20	-97.02	-63.18	-46.48	-16.97	-2.35	0.00	-19.86	-51.08	-94.86	-112.82	-59.01	0.00	-112.82
01:30–02:00	-106.41	-98.56	-97.84	-63.36	-47.65	-17.96	-3.16	0.00	-19.95	-51.81	-94.86	-113.81	-59.61	0.00	-113.81
02:00–02:30	-107.13	-98.65	-97.93	-63.36	-48.11	-18.32	-3.97	0.00	-20.67	-52.44	-95.58	-113.81	-60.00	0.00	-113.81
02:30–03:00	-109.03	-99.73	-99.01	-64.44	-49.82	-18.32	-4.42	-0.09	-21.57	-53.07	-96.39	-113.54	-60.79	-0.09	-113.54
03:00–03:30	-109.66	-100.18	-100.00	-65.34	-50.90	-19.22	-4.96	-0.54	-22.56	-53.70	-97.39	-114.89	-61.61	-0.54	-114.89
03:30–04:00	-111.10	-100.54	-100.27	-65.53	-50.99	-19.13	-5.78	-1.44	-23.92	-54.51	-97.93	-116.16	-62.28	-1.44	-116.16
04:00–04:30	-110.56	-101.54	-102.17	-66.25	-51.54	-19.04	-7.22	-1.99	-25.18	-54.60	-98.74	-116.25	-62.92	-1.99	-116.25
04:30–05:00	-111.28	-101.90	-103.97	-66.61	-51.17	-18.05	-7.49	-2.53	-25.72	-54.78	-100.63	-116.25	-63.37	-2.53	-116.25
05:00–05:30	-111.19	-101.99	-103.52	-66.61	-50.54	-15.98	-5.42	-4.42	-26.53	-54.88	-100.81	-116.34	-63.19	-4.42	-116.34
05:30–06:00	-110.65	-102.35	-104.15	-65.53	-49.01	-12.27	-1.90	-4.51	-26.17	-54.69	-101.90	-116.43	-62.46	-1.90	-116.43
06:00–06:30	-111.37	-102.80	-104.61	-63.54	-46.21	-9.21	0.00	-3.25	-25.45	-55.06	-102.35	-116.61	-61.70	0.00	-116.61
06:30–07:00	-110.11	-102.71	-102.44	-59.84	-43.05	-6.23	0.00	-0.54	-23.47	-54.51	-102.53	-117.96	-60.28	0.00	-117.96
07:00–07:30	-110.47	-101.45	-99.64	-56.59	-40.16	0.00	0.00	0.00	-18.95	-50.99	-102.17	-118.23	-58.22	0.00	-118.23
07:30–08:00	-108.94	-100.27	-95.22	-52.98	-34.48	0.00	0.00	0.00	-13.18	-47.20	-100.54	-117.24	-55.84	0.00	-117.24
08:00–08:30	-105.60	-98.02	-90.62	-49.37	-26.53	0.00	0.00	0.00	-7.13	-43.86	-99.10	-115.17	-52.95	0.00	-115.17
08:30–09:00	-103.43	-94.41	-84.75	-44.68	-17.15	0.00	0.00	0.00	-0.81	-40.25	-95.67	-113.00	-49.51	0.00	-113.00
09:00–09:30	-101.90	-89.89	-77.98	-40.16	-9.21	0.00	0.00	0.00	0.00	-33.21	-89.44	-110.47	-46.02	0.00	-110.47
09:30–10:00	-98.20	-83.85	-69.23	-36.01	-1.17	0.00	4.60	0.00	0.00	-26.99	-84.12	-107.04	-41.83	4.60	-107.04
10:00–10:30	-90.71	-74.82	-59.30	-30.42	0.00	0.00	9.75	0.00	0.00	-21.03	-81.32	-103.79	-37.64	9.75	-103.79
10:30–11:00	-86.19	-69.14	-52.17	-26.72	0.00	1.17	14.71	0.00	0.00	-17.60	-78.25	-100.45	-34.55	14.71	-100.45
11:00–11:30	-81.05	-65.98	-46.39	-24.28	0.00	7.85	19.13	0.00	0.00	-15.98	-74.01	-95.94	-31.39	19.13	-95.94
11:30–12:00	-75.72	-60.56	-41.61	-23.11	0.00	13.63	22.74	0.00	0.00	-13.27	-67.24	-90.16	-27.94	22.74	-90.16
12:00–12:30	-73.20	-57.67	-39.71	-22.65	0.00	17.87	27.80	0.00	0.00	-10.29	-65.89	-88.45	-26.02	27.80	-88.45
12:30–13:00	-69.68	-55.60	-38.27	-22.74	0.00	17.60	31.41	0.00	0.00	-10.02	-62.82	-87.01	-24.76	31.41	-87.01
13:00–13:30	-67.15	-52.44	-36.91	-21.03	0.00	18.59	33.21	0.00	0.00	-8.39	-60.47	-85.29	-23.32	33.21	-85.29
13:30–14:00	-64.80	-51.90	-39.53	-19.50	0.00	18.41	30.05	0.00	0.00	-9.21	-59.66	-85.29	-23.45	30.05	-85.29
14:00–14:30	-64.89	-52.26	-41.07	-21.48	0.00	14.26	29.42	0.54	0.00	-11.01	-58.67	-85.83	-24.25	29.42	-85.83
14:30–15:00	-67.51	-54.33	-47.20	-25.00	0.00	9.48	28.79	0.81	0.00	-15.61	-62.28	-87.28	-26.68	28.79	-87.28
15:00–15:30	-71.21	-57.49	-52.35	-30.87	0.00	5.14	24.19	0.00	0.00	-20.94	-66.16	-90.26	-29.99	24.19	-90.26
15:30–16:00	-74.46	-62.19	-59.03	-35.20	0.00	0.27	18.68	0.00	0.00	-25.36	-70.67	-94.32	-33.52	18.68	-94.32
16:00–16:30	-80.78	-70.04	-64.08	-39.80	-3.34	0.00	10.74	0.00	0.00	-31.77	-75.63	-98.92	-37.80	10.74	-98.92
16:30–17:00	-87.64	-76.63	-70.31	-47.84	-9.03	0.00	1.26	0.00	0.00	-37.64	-80.96	-103.25	-42.67	1.26	-103.25
17:00–17:30	-91.34	-82.31	-77.62	-53.79	-16.79	0.00	0.00	0.00	0.00	-42.33	-83.40	-105.69	-46.11	0.00	-105.69
17:30–18:00	-92.96	-85.56	-83.03	-57.58	-25.54	0.00	0.00	0.00	-4.51	-44.50	-84.66	-107.22	-48.80	0.00	-107.22
18:00–18:30	-93.96	-87.10	-86.28	-61.46	-31.68	0.00	0.00	0.00	-9.48	-46.48	-85.83	-108.76	-50.92	0.00	-108.76
18:30–19:00	-94.68	-89.08	-87.73	-63.81	-33.85	-3.16	0.00	0.00	-12.36	-48.29	-87.01	-109.57	-52.46	0.00	-109.57
19:00–19:30	-96.39	-90.98	-88.00	-63.90	-36.64	-8.03	0.00	0.00	-13.72	-49.82	-88.00	-109.30	-53.73	0.00	-109.30
19:30–20:00	-98.11	-91.70	-88.90	-63.54	-36.73	-10.20	0.00	0.00	-14.71	-50.00	-88.36	-109.75	-54.33	0.00	-109.75
20:00–20:30	-98.38	-91.97	-90.16	-63.27	-37.37	-10.20	0.00	0.00	-15.61	-50.90	-89.08	-110.56	-54.79	0.00	-110.56
20:30–21:00	-98.47	-91.97	-91.43	-62.37	-37.46	-9.39	0.00	0.00	-15.98	-51.90	-89.80	-111.19	-55.00	0.00	-111.19
21:00–21:30	-99.10	-92.60	-91.79	-61.64	-37.82	-9.39	0.00	0.00	-16.43	-52.08	-90.16	-111.83	-55.24	0.00	-111.83
21:30–22:00	-100.36	-92.96	-91.52	-61.55	-38.99	-9.48	0.00	0.00	-16.34	-51.45	-90.44	-111.56	-55.39	0.00	-111.56
22:00–22:30	-101.54	-93.68	-91.88	-60.20	-40.43	-10.56	0.00	0.00	-16.25	-51.45	-90.71	-112.46	-55.76	0.00	-112.46
22:30–23:00	-103.79	-94.32	-92.42	-60.29	-42.42	-11.46	-0.36	0.00	-17.15	-51.90	-91.52	-112.82	-56.54	0.00	-112.82
23:00–23:30	-104.61	-94.86	-93.50	-65.43	-43.68	-12.55	-0.81	0.00	-18.23	-51.99	-91.70	-112.73	-57.51	0.00	-112.73
23:30–00:00	-104.33	-94.95	-94.32	-65.34	-44.77	-12.55	-1.62	0.00	-19.13	-51.90	-93.32	-112.91	-57.93	0.00	-112.91
Daily =													-48.69	33.21	-118.23

Appendix 7
Hot water daily consumption.



Time	Residential				Hotels				Offices and commercial				Swimming pools and sport clubs				Total				
	6545 m ³ /day		1431 m ³ /day		44 m ³ /day		87 m ³ /day		8107 m ³ /day												
	Accum.	Densi.	Q _{hot water}	Accum.	Densi.	Q _{hot water}	Accum.	Densi.	Q _{hot water}	Accum.	Densi.	Q _{hot water}	Accum.	Densi.	Q _{hot water}	Accum.	Densi.	Q _{hot water}			
00:00-00:30	0.2	13.09091	0.73	0.5	7.153455	0.40	0.125	0.0545455	0.42	0.1832727	0.01	0.31	25.23	0.42	0.1832727	0.01	0.31	25.23			
00:30-01:00	0.4	13.09091	0.73	1	14.30691	0.40	0.5	0.2181818	0.84	0.3665455	0.01	0.69	55.53	0.84	0.3665455	0.01	0.69	55.53			
01:00-01:30	0.6	13.09091	0.73	1.5	21.46036	0.40	0.725	0.183636	1.26	0.5498182	0.01	1.02	82.79	1.26	0.5498182	0.01	1.02	82.79			
01:30-02:00	0.8	13.09091	0.73	2	28.61382	0.40	1.2	0.363636	1.68	0.730909	0.01	1.37	111.07	1.68	0.730909	0.01	1.37	111.07			
02:00-02:30	1	13.09091	0.73	2.5	35.76727	0.40	1.5	0.526364	2.1	0.9163636	0.01	1.70	137.82	2.1	0.9163636	0.01	1.70	137.82			
02:30-03:00	1.2	13.09091	0.73	3	42.92073	0.40	1.6	0.6981818	2.52	1.0996364	0.01	2.03	164.57	2.52	1.0996364	0.01	2.03	164.57			
03:00-03:30	1.4	13.09091	0.73	3.5	50.07418	0.40	1.6	0.6981818	2.94	1.2829091	0.01	2.36	191.33	2.94	1.2829091	0.01	2.36	191.33			
03:30-04:00	1.6	13.09091	0.73	4	57.22764	0.40	1.7	0.7418182	3.36	1.4661818	0.01	2.67	216.05	3.36	1.4661818	0.01	2.67	216.05			
04:00-04:30	1.8	13.09091	0.73	4.5	64.38109	0.40	1.8	0.7894545	3.78	1.6494545	0.01	2.97	240.78	3.78	1.6494545	0.01	2.97	240.78			
04:30-05:00	2	13.09091	0.73	5	71.53455	0.40	1.9	0.8290909	4.2	1.8327273	0.01	3.28	265.51	4.2	1.8327273	0.01	3.28	265.51			
05:00-05:30	2.6	13.09091	0.73	5.7	81.54938	0.40	2	0.8727273	4.62	2.016	0.01	3.73	302.39	4.62	2.016	0.01	3.73	302.39			
05:30-06:00	3.2	13.09091	0.73	6.5	92.99491	0.40	2.5	1.0909091	5.04	2.1992727	0.01	4.31	349.41	5.04	2.1992727	0.01	4.31	349.41			
06:00-06:30	3.8	13.09091	0.73	7	100.1484	0.40	3	1.3090909	5.46	2.3825455	0.01	4.82	390.35	5.46	2.3825455	0.01	4.82	390.35			
06:30-07:00	4.4	13.09091	0.73	7	100.1484	0.40	3	1.3090909	5.88	2.5658182	0.01	5.70	461.70	5.88	2.5658182	0.01	5.70	461.70			
07:00-07:30	5	13.09091	0.73	10	143.0691	0.40	4	1.7454545	6.3	2.7490909	0.01	6.33	512.77	6.3	2.7490909	0.01	6.33	512.77			
07:30-08:00	5.5	13.09091	0.73	14	200.2967	0.40	9	3.9272727	6.72	2.9232636	0.01	9.06	734.09	6.72	2.9232636	0.01	9.06	734.09			
08:00-08:30	6	13.09091	0.73	19	271.8313	0.40	10	4.3636364	7.14	3.1156364	0.01	11.04	894.61	7.14	3.1156364	0.01	11.04	894.61			
08:30-09:00	6.5	13.09091	0.73	25	357.6727	0.40	12	5.2363636	7.56	3.2989091	0.01	13.52	1095.67	7.56	3.2989091	0.01	13.52	1095.67			
09:00-09:30	11	13.09091	0.73	31	443.5142	0.40	14	6.1090909	7.98	3.4821818	0.01	16.00	1296.72	7.98	3.4821818	0.01	16.00	1296.72			
09:30-10:00	13	13.09091	0.73	42	600.8902	0.40	17.5	7.6363636	8.4	3.6654545	0.01	20.23	1639.65	8.4	3.6654545	0.01	20.23	1639.65			
10:00-10:30	16	13.09091	0.73	46	658.1178	0.40	19	8.2909091	8.82	3.8487273	0.01	22.46	1820.44	8.82	3.8487273	0.01	22.46	1820.44			
10:30-11:00	20	13.09091	0.73	48	686.7316	0.40	21	9.1636364	9.24	4.032	0.01	24.56	1991.09	9.24	4.032	0.01	24.56	1991.09			
11:00-11:30	28	13.09091	0.73	51	715.3455	0.40	23	10.036364	9.66	4.2152727	0.01	27.67	2242.82	9.66	4.2152727	0.01	27.67	2242.82			
11:30-12:00	45	13.09091	0.73	50	729.6524	0.40	26	11.345455	10.08	4.3985455	0.01	33.02	2676.95	10.08	4.3985455	0.01	33.02	2676.95			
12:00-12:30	52.5	13.09091	0.73	53	743.9593	0.40	27	11.781818	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00			
13:00-13:00	55	13.09091	0.73	53	758.2662	0.40	28	12.218182	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00			
13:00-13:30	57	13.09091	0.73	54	772.5731	0.40	29	12.654545	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00			
13:30-14:00	58	13.09091	0.73	55	786.88	0.40	30	13.090909	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00			
14:00-14:30	59.5	13.09091	0.73	56	801.1869	0.40	30.5	13.309091	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00			
14:30-15:00	60	13.09091	0.73	57	815.4938	0.40	31	13.527273	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00			
15:00-15:30	61.5	13.09091	0.73	58	829.8007	0.40	31.5	13.745455	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00			
15:30-16:00	65	13.09091	0.73	60	858.4145	0.40	32	13.963636	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00			
16:00-16:30	70.5	13.09091	0.73	62.5	894.1818	0.40	33	14.4	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00			
16:30-17:00	72	13.09091	0.73	67.5	965.7164	0.40	34	14.836364	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00			
17:00-17:30	73	13.09091	0.73	70	1001.484	0.40	35	15.272727	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00			
17:30-18:00	73.5	13.09091	0.73	71	1015.791	0.40	36	15.709091	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00			
18:00-18:30	74	13.09091	0.73	72	1030.097	0.40	36	16.145455	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00			
18:30-19:00	74.5	13.09091	0.73	72.5	1037.251	0.40	36.5	16.581818	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00			
19:00-19:30	75	13.09091	0.73	73	1044.404	0.40	37	17.018182	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00			
19:30-20:00	77	13.09091	0.73	73.5	1051.558	0.40	37.5	17.454545	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00			
20:00-20:30	85	13.09091	0.73	75	1073.018	0.40	38	17.890909	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00			
20:30-21:00	92	13.09091	0.73	80	1144.553	0.40	39	18.327273	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00			
21:00-21:30	94	13.09091	0.73	81	1158.86	0.40	39.5	18.772727	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00			
21:30-22:00	95.2	13.09091	0.73	83	1183.315	0.40	40	19.218182	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00			
22:00-22:30	96.4	13.09091	0.73	87	1387.77	0.40	42	20.654545	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00			
22:30-23:00	97.8	13.09091	0.73	88	1402.077	0.40	43	21.090909	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00			
23:00-23:30	99	13.09091	0.73	99	1416.384	0.40	99	43.2	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00			
23:30-00:00	100	13.09091	0.73	100	1430.691	0.40	100	43.636364	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00	10.5	4.5818182	0.01	35.50	2878.00			
Total daily	100	6545.455	364.80	100	1430.691	79.74	100	43.636364	100	43.636364	2.43	100	8107.05	100	43.636364	2.43	100	8107.05	100	8107.05	18.83

Appendix 8
Year energies with gas turbines operating at full load basis and steam turbine regulating from 0 to 100%.

Daily energy	GN Cj	Electricity consume, GJ	Electricity generate, GJ	Photovoltaic electricity, GJ	Electrical demand, GJ	Electrical excess, GJ	Generated heat, GJ	Solar heat onto windows, GJ	Solar heat onto façade, GJ	Transmission heat losses, GJ	Ventilation heat losses, GJ	Total heat, GJ	Needed heat, GJ	Hot water heat needed, GJ	Solar thermal energy, GJ	MED energy, GJ
Working days																
January	46,331	16,790	17,031	637	17,427	241	26,816	1206	804	-2328	-8252	-8571	12,244	1627	477	13,422
February	39,712	15,690	15,828	445	16,135	138	25,781	1217	811	-2088	-7391	-7451	10,646	1627	445	13,953
March	37,873	15,207	15,239	665	15,872	33	25,747	1385	923	-1965	-6946	-6603	9745	1627	498	14,874
April	36,403	14,633	14,709	491	15,125	76	25,780	1137	758	-1256	-4381	-3743	5960	1627	368	18,562
May	37,138	14,559	14,692	644	15,202	133	26,046	1341	894	-707	-2381	-853	4245	1627	482	20,657
June	39,712	15,160	15,313	621	15,781	153	26,295	1183	789	-152	-369	1451	2732	1627	465	22,401
July	45,227	16,227	16,403	567	16,794	177	27,070	1151	767	70	452	2441	2343	1627	425	23,525
August	35,299	13,430	13,569	592	14,022	139	26,547	1315	877	-59	-32	2099	1871	1627	444	23,493
September	39,344	14,840	15,037	652	15,492	197	26,448	1551	1034	-326	-990	1269	3462	1627	488	21,847
October	38,609	14,606	14,758	704	15,310	153	26,477	1608	1072	-1009	-3477	-1805	5895	1627	527	19,483
November	41,183	15,977	16,072	766	16,744	94	26,034	1556	1038	-2110	-7470	-6986	10,089	1627	574	14,892
December	47,434	17,397	17,582	815	18,211	185	26,638	1592	1062	-2606	-9242	-9194	13,218	1627	610	12,403
Working year=	1,05E+07	4,01E+06	4,05E+06	1,66E+05	4,17E+06	3,74E+04	6,86E+06	3,53E+05	2,35E+05	-3,15E+05	-1,09E+06	-8,19E+06	1,79E+06	4,24E+05	1,26E+05	4,78E+06
Weekend																
January	40,447	15,421	15,490	637	16,058	70	26,367	1206	804	-2328	-8252	-8571	12,244	1627	477	12,974
February	40,080	15,686	14,152	445	16,131	-1534	25,964	1217	811	-2088	-7391	-7451	10,646	1627	445	14,136
March	39,344	15,275	15,344	665	15,940	68	26,141	1385	923	-1965	-6946	-6603	9745	1627	498	15,267
April	36,770	14,764	14,822	491	15,255	58	25,792	1137	758	-1256	-4381	-3743	5960	1627	368	18,574
May	36,035	14,635	14,680	644	15,278	46	25,685	1341	894	-707	-2381	-853	4245	1627	482	20,296
June	38,241	15,440	15,580	621	16,061	139	25,531	1183	789	-152	-369	1451	2732	1627	465	21,637
July	46,698	16,858	17,089	567	17,426	230	26,883	1151	767	70	452	2441	2343	1627	425	23,337
August	35,299	13,306	13,379	592	13,898	74	26,737	1315	877	-59	-32	2099	1871	1627	444	23,683
September	37,138	14,873	14,927	652	15,525	55	25,811	1551	1034	-326	-990	1269	3462	1627	488	21,210
October	37,873	15,021	15,077	704	15,725	56	25,910	1608	1072	-1009	-3477	-1805	5895	1627	527	18,916
November	41,183	16,201	16,251	766	16,968	50	25,854	1556	1038	-2110	-7470	-6986	10,089	1627	574	14,713
December	47,801	17,785	18,004	815	18,600	219	26,341	1592	1062	-2606	-9242	-9194	13,218	1627	610	12,106
Weekend year=	4,15E+06	1,61E+06	1,61E+06	6,62E+04	1,68E+06	-2,94E+03	2,72E+06	1,41E+05	9,42E+04	-1,26E+05	-4,37E+05	-3,27E+05	7,15E+05	1,70E+05	5,05E+04	1,89E+06
Total year=	1,47E+07	5,62E+06	5,65E+06	2,32E+05	5,85E+06	3,45E+04	9,58E+06	4,94E+05	3,30E+05	-4,41E+05	-1,53E+06	-1,15E+06	2,50E+06	5,94E+05	1,77E+05	6,66E+06

References

- [1] Banyeras Lluís Jutglar I. Cogeneration of heat and electricity. Editions CEAC; 1996. p. 14.
- [2] Vaninsky Alexander. Prospective national and regional environmental performance: boundary estimations using a combined data envelopment – stochastic frontier analysis approach. *Energy* September 2010;35(9). ISSN: 0360-5442:3657–65.
- [3] Statistics of MICYT. Book of energy in Spain (year 2.004), p. 11.
- [4] www.marinador.com (Octubre 2008).
- [5] von Medeazza Gregor Meerganz, Moreau Vincent. Modelling of water–energy systems. The case of desalination. *Energy* June 2007;32(6). ISSN: 0360-5442: 1024–31.
- [6] Shiroumaru I, Iwariya T, Fukai M. Integrated operation and management system for a 700 MW combined cycle power plant. *Energy Conversion, IEEE*; Mar 1992 ISSN: 0885-8969 (7).
- [7] Bebic J, Walling R, O'Brien K, Kroposki B, Bebic JWalling, et al. *Power and Energy Magazine, IEEE* May–June 2009;7(3). ISSN: 1540-7977:45–54.
- [8] Escobar J. Technical meeting on energetic costs reduction in the turistic industry. Tarragona: Spanish Association for the Development of Electrical Energy (AEDIE), www.aedie.org; February, 2004.
- [9] Luo Chending, Zhang Na, Lior Noam, Lin Hu. Proposal and analysis of a dual-purpose system integrating a chemically recuperated gas turbine cycle with thermal seawater desalination. *Energy* June 2011;36(6). ISSN: 0360-5442: 3791–803.
- [10] Sharaf MA, Nafey AS, García-Rodríguez Lourdes. Thermo-economic analysis of solar thermal power cycles assisted MED-VC (multi effect distillation-vapor compression) desalination processes. *Energy* May 2011;36(5). ISSN: 0360-5442:2753–64.
- [11] The experiment Dubai. Sunday “Magazine” of “LA VANGUARDIA”; August 31, 2008. pp. 36–45.
- [12] Ministry of Science and Innovation. <http://www.psa.es/webesp/index.html>.
- [13] IDE Technologies.<http://www.ide-tech.com>.
- [14] Rahman S, Khallat MA, Salameh ZM. Characterization of insolation data for use in photovoltaic system analysis models. *Energy* January 1988;13(1). ISSN: 0360-5442:63–72.
- [15] Kroposki B, Margolis R, Ton D. Harnessing the sun. *Power and Energy Magazine, IEEE* May–June 2009;7(3):22–33. 1540–7977.
- [16] Chicco G, Mancarella P. From cogeneration to trigeneration: profitable alternatives in a competitive market. *Energy Conversion, IEEE*; Mar 2006 ISSN: 0885-8969 (21).
- [17] Roy S. Optimal efficiency as a design criterion for closed loop combined cycle industrial cogeneration. *Energy Conversion, IEEE*; Jun 2001 ISSN: 0885-8969 (16).
- [18] Hashemi R. A developed offline model for optimal operation of combined heating and cooling and power systems. *Energy Conversion, IEEE*; March 2009 ISSN: 0885-8969 (24).
- [19] Kolhe M, Joshi JC, Kothari DP. Performance analysis of a directly coupled photovoltaic water-pumping system. *Energy Conversion, IEEE*; Sep 2004 ISSN: 0885-8969 (19).
- [20] Castro Gil Manuel-Alonso. Solar power plants simulation. Application to electrical energy management. Editions Saber hoy S.A; 1990. pp. 49–62.
- [21] Alonso JA, Rodríguez JJ, Carmona MM, Martín A, Calle JL, Martínez T, et al. Industrial energy conservation techniques: operation saving fundamentals, Tomo I. Publications department of the Ministry of Industry, Trading and Tourism. Center of Energy Studing, ISBN 84-7474-170-X; 1982. p. 237.
- [22] Hatzikioseyan Artin, Vidali Roza, Kousi Paulina. Modelling and thermodynamic of a multieffect distillation (MED) plant for seawater desalination. National Technical University of Athens (NTUA), School of Mining, Metallurgical Engineering, Laboratory of Environmental Science and Engineering.
- [23] Hunlitz A, Blanco J, Alarcón D, Spinnler M. Comparative assessment of different configurations to supply solar thermal energy to a multi-effect distillation plant for solar seawater desalination. Madrid, Spain: CIEMAT, ISBN 84-7834-466-7; 2004.
- [24] José María Sala Lizárraga. Cogeneration. Edition Services of the University of País Vasco.
- [25] SENDECO2, Spanish stock market of dioxide of carbon rights of emissions (EUA's) and Carbon credits (CER's), <http://www.sendeco2.com/>; May 2011.
- [26] Resolution of March, 22nd of 2011 of General Direction of energetic politics and mines by which it is published the Price list of natural. B.O.E. of March, 31st of 2011.
- [27] Farghal SA, Tantawy MA, El-Alfy AE. Impact of solar thermal power plants on economy and reliability of utility system. *Energy Conversion, IEEE*; June 1987 ISSN: 0885-8969.
- [28] Royal decree 2818/1998 of electrical energy production.
- [29] Royal decree 616/2007 of cogeneration promotion.
- [30] Royal decree 661/2007 of regulation of the activity of electrical energy production under special regime.
- [31] Law 54/1997 of November, 27th of electrical sector.
- [32] Thye JF, Chertow M. MEM masters project. Yale School of Forestry and Environmental Studies; May 9th, 2010.
- [33] Barroso LA, Rudrick H, Sensfuss F, Linares P, PSR, Rio de Janeiro, Brazil. The Green effect. *Power and Energy Magazine, IEEE* Sept–Oct 2010;8(5). ISSN: 1540-7977:22–35.

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 222 de 231

ANEXO XVII: “Tri-generation system to couple production to demand in a combined cycle”.

CERTIFICADO DE PUBLICACIÓN



Energy

Certificate of publication for the article titled:
"Tri-generation system to couple
production to demand in a combined cycle"

Authored by:

C. Cuviella Suárez



A. Colmenar-Santos, M. Castro-Gil

Published in:

Volume 40, Issue 1 (2012), Pages 271-290

Serial number: PR-270920-67DD8CD0DA01



 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 223 de 231

ANEXO XVIII: “Water and Energy Use in Sanitary-ware Manufacturing - Process Modelling for Greater Efficiency” CONTRATO DE PUBLICACION

Publishing Agreement

The following agreement has been approved by and entered into between

Carlos Cuviella Suárez, ROCA, Engineering, Rambla Lluch 2, 08850 Barcelona, Spain

Dr. David Borge-Diez, Universidad de León, Dpto.Ing. Eléctrica Sistemas Automático, Campus de Vegazana s/n, 24071 León, Spain

Dr. Antonio Colmenar-Santos, Univ Nacional de Edu a Distanci UNED, Control, electronics and electrical eng., Calle Juan del Rosal 12, 28040 Madrid, Spain

(hereinafter called **Author**)

on the one part and

Springer Nature Switzerland AG, Gewerbestrasse 11, 6330 Cham, Switzerland

(hereinafter called **Publisher**)

on the other part.

In Process

When Author is more than one person, the expression "Author" as used in this agreement will apply collectively unless otherwise indicated.

§ 1 Rights Granted

1.1 Author undertakes to prepare for publication by Publisher a work provisionally entitled:

Water and Energy Use in Sanitary-ware Manufacturing - Process Modelling for Greater Efficiency

(hereinafter called **Work**)

comprising approximately 300 pages, including approximately 60 illustrations, whereas the Publisher intends to publish the Work under the imprint Springer. The work may be published in the book series **Green Energy and Technology**.

The Work may contain or link to media, social or functional enhancements. If such enhancements are included in or linked to the Work it will be specified in Clause 9. To the extent Clause 9 specifies that enhancements are included in the Work, they are an integral part of the Work and, unless otherwise explicitly set forth in Clause 9, all rights, licences and obligations agreed to hereunder shall apply to such enhancements.

1.2 Author hereby grants and assigns to Publisher the exclusive, sole, permanent, world-wide, transferable, sub-licensable and unlimited right to reproduce, publish, distribute, transmit, make available or otherwise communicate to the public, translate, publicly perform, archive, store, lease or lend and sell the Work or parts thereof individually or together with other works in any language, in all revisions and versions (including soft cover, book club and collected editions, anthologies, advance printing, reprints or print to order, microfilm editions, audiograms and videograms), in all forms and media of expression including in electronic form



(including offline and online use, push or pull technologies, use in databases and data networks (e.g. Internet) for display, print and storing on any and all stationary or portable end-user devices, e.g. text readers, audio, video or interactive devices, and for use in multimedia or interactive versions as well as for the display or transmission of the works or parts thereof in data networks or search engines, and posting the Work on social media accounts closely related to the Work, as well as using the Work for educational or training purposes, e.g. but not limited to use in massive open online courses), in whole, in part or in abridged form, in each case as now known or developed in the future, including the right to grant further time-limited or permanent rights. Publisher especially has the right to permit others to use individual illustrations, tables or text quotations and may use the Work for advertising purposes. For the purposes of use in electronic forms, Publisher may adjust the Work to the respective form of use and include links (e.g. frames or inline-links) or otherwise combine it with other works and/or remove links or combinations with other works provided in the Work. For the avoidance of doubt, all provisions of this contract apply regardless of whether the Work itself constitutes a database under applicable copyright laws or not.

- 1.3 The copyright in the Work shall be vested in the name of Publisher. Author has asserted his/her right(s) to be identified as the originator of this Work in all editions and versions of the Work and parts thereof, published in all forms and media. Publisher may take, either in its own name or in that of Author, any necessary steps to protect the rights granted under this Agreement against infringement by third parties. It will have a copyright notice inserted into all editions of the Work according to the provisions of the Universal Copyright Convention (UCC).

The parties acknowledge that there may be no basis for claim of copyright in the United States to a Work prepared by an officer or employee of the United States government as part of that person's official duties. If the Work was performed under a United States government contract, but Author is not a United States government employee, Publisher grants the United States government royalty-free permission to reproduce all or part of the Work and to authorise others to do so for United States government purposes. If the Work was prepared or published by or under the direction or control of the Crown (i.e., the constitutional monarch of the Commonwealth realm) or any Crown government department, the copyright in the work shall, subject to any agreement with Author, belong to the Crown. If Author is an officer or employee of the United States government or of the Crown, reference will be made to this status on the signature page.

- 1.4 Author retains, in addition to uses permitted by law, the right to communicate the content of the Work to other research colleagues, to share the Work with them in manuscript form, to perform or present the Work or to use the content for non-commercial internal and educational purposes provided the original source of publication is cited according to current citation standards.

§ 2 Delivery and Acceptance of the Work

- 2.1 Author shall deliver the Work to Publisher on or before September 1, 2020 (hereinafter called **Delivery Date**) electronically in Microsoft Word format or in such form as may be agreed in writing with Publisher. The Work shall be in a form acceptable to the Publisher (acting reasonably) and in line with the instructions contained in the guidelines and Author shall provide at the same time, or earlier if the Publisher reasonably requests, any editorial, publicity or other form required by the Publisher. Publisher is entitled to have the Work peer-reviewed by external reviewers of its choice.

If Author fails to deliver the Work by the Delivery Date, or within any grace period given by Publisher, acting reasonably, then Publisher shall be entitled to:



- (a) commission an appropriate and competent person (who, in the case of joint Authors, may be a person comprising the Author) to complete the Work and any fees payable to the competent person shall be deducted by Publisher, acting reasonably, from any sums due to Author under this Agreement; or
- (b) terminate this Agreement by immediate written notice to Author, in which case all advance payments paid to Author under or in connection with this Agreement shall be repaid to Publisher within 28 days of said notice.
- (c) If Author, or where Author consists of two or more persons, any of the persons comprising the Author, dies or becomes incapacitated or otherwise incapable of performing Author's obligations under this Agreement, Publisher shall be entitled to be given copies of all notes, manuscripts or other materials relating to the Work. Publisher may either terminate this Agreement with immediate effect (by written notice to Author or Author's estate) or elect to continue to publish the Work.

- 2.2 Publisher is entitled to carry out editorial changes on the manuscript within the usual limits. This is intended especially to enhance the uniform overall organisation and form of the Work. Any significant changes in content require the approval of the Author. Publisher is entitled to prepare and use summaries within the intended use of the Work and for the purposes of sales, distribution and advertising.
- 2.3 Author agrees, at the request of Publisher, to execute all documents and do all things reasonably required by Publisher in order to confirm to Publisher all rights intended to be granted under this Agreement. Author warrants and represents that the Work is original except for such excerpts from copyrighted works (including illustrations, tables, animations and text quotations) as may be included with the permission of the copyright holder thereof, in which case(s) Author is required to obtain written permission to the extent necessary and to indicate the precise sources of the excerpts in the manuscript. Author is also requested to store the signed permission forms and to make them available to Publisher if required. Author warrants and represents that Author is entitled to grant the rights in accordance with Clause 1 "Rights Granted", that Author has not assigned such rights to third parties, that the Work has not heretofore been published in whole or in part, that the Work contains no libellous or defamatory statements and does not infringe on any copyright, trademark, patent, statutory right or proprietary right of others, including rights obtained through licences. Author agrees to amend the Work to remove any potential obscenity, defamation, libel, malicious falsehood or otherwise unlawful part(s) identified at any time. Any such removal or alteration shall not affect the warranties and representations given by Author in this Agreement.

§ 3 Publication of the Work

- 3.1 Publisher will undertake the publication and distribution of the Work in print and electronic form at its own expense and risk within a reasonable time after it has given notice of its acceptance of the Work to Author in writing. The final determination of the electronic formats and the number of copies produced is at the discretion of Publisher. Publisher will, at its sole discretion, set or alter the list-price, allow for deviations from the list-price (if permitted under applicable jurisdiction) and promote the Work as it considers most appropriate to optimise sales, including a good and suitable presentation for all distribution channels. All right, title and interest in the typography, design and/or look-and-feel of the Work shall remain the property of and is reserved to Publisher. Illustrations and any other material or immaterial property prepared at the expense of Publisher remain, as between the parties, the exclusive property of Publisher. Nothing in this Agreement shall constitute an undertaking on the part of Publisher to publish the Work unless and until: (i) Publisher has given notice of acceptance in writing of the final manuscript of the entire Work, and (ii) any issues in relation to the Work (including all necessary consents and permissions) raised by the Publisher have been resolved to the Publisher's satisfaction.



In consideration of the above, if Publisher decides to not publish the Work, Author shall in no event be entitled to any compensation or remedy in respect of any expense or loss incurred.

- 3.2 Publisher is entitled, depending on the market and the demand, to publish and distribute the Work in instalments (including but not limited to individual chapters) or to order. In case the Work is stored in physical stock Publisher is also entitled to pulp the print run or any portion thereof without previously notifying Author. Publisher is required to continue promoting the Work and to retain a sufficient number of copies unless the Work is available in electronic form or on the basis of a print-to-order offer.

§ 4 Approval for Publishing

- 4.1 Author shall proofread the page proofs, check the illustrations as well as any media, social or functional enhancements, and give approval for publishing, if and when requested by Publisher. Author's approval for publishing is deemed to have been given if Author does not respond within a suitable period of time after receiving the proofs.
- 4.2 Proofs are sent to enable Author to check that the manuscript has been properly set in type and to allow Author to correct any typesetter's or illustrator's errors. No alterations or corrections may be made by Author other than for the purpose of correcting typographical errors without the Publisher's prior written consent. In case Author makes major changes that lead to additional costs for Publisher, and if such costs exceed 10% of the total cost of typesetting (or reproduction in the case of illustrations) they will be borne by Author.

§ 5 Complimentary Copies, Author's Discount for Books and Electronic Access

- 5.1 Author or, if "Author" comprises several individual authors, each of the co-authors who is party to this agreement is entitled to receive 3 printed copies free of charge and may obtain additional copies for personal use at a discount of 40% off the list-price if ordered directly from Publisher.
- 5.2 Furthermore, Author is entitled to purchase for Author's personal use (directly from Publisher) other books published by Publisher at a discount of 40% off the list-price for as long as there is a contractual arrangement between Author and Publisher and subject to applicable book price regulation. Resale of such copies or of free copies is not permitted.
- 5.3 Publisher shall provide electronic access to the electronic final published version of the Work on Publisher's Internet portal, currently known as springer.com and/or palgrave.com, to Author, provided Author has included his/her email address in the manuscript of the Work. Furthermore, Author has the right to download and disseminate single contributions from the electronic final published version of the Work for his/her private and professional non-commercial research and classroom use (e.g. sharing the contribution by mail or in hard copy form with research colleagues for their professional non-commercial research and classroom use, or to use it for presentations or handouts for students). Author is also entitled to use single contributions for the further development of his/her scientific career (e.g. by copying and attaching contributions to an electronic or hard copy job or grant application).
- When Author is more than one person each of the co-authors may share single contributions of the Work with other scientists or research colleagues as described above. In each case, Publisher grants the rights to Author under this clause provided that Author has obtained the prior consent of any co-author(s) of the respective contribution.



§ 6 Remuneration

- 6.1 Publisher shall pay to Author a remuneration of EUR 1,200 payable upon publication, publication being stipulated as the point in time when the Work is being distributed in print or electronic form, whichever occurs earlier.
- 6.2 If Publisher grants licenses to use the Work or derivative works thereof or parts of either in products published by other publishers (e.g. a licence to translate the Work and to distribute the translation, or a licence to distribute parts of the Work in a third party publication), Author's sole payment for the respective licence and any related use will be a share of Publisher's Net Proceeds according to industry standards of 50%.
- 6.3 In the event that the Work contains or links (e.g. through frames or in-line links) to media, social or functional enhancements, the aforesaid remuneration, complimentary copies and/or access rights shall also cover the use of such material.
- 6.4 If "Author" comprises several individual authors, the aforesaid remuneration will be paid as a total to the joint group of authors. Each co-author will receive an equal share of any payment.
- 6.5 If there is a legal requirement for Publisher to withhold any taxes, the taxes will be deducted from the payments to Author. Authors are responsible for the taxation of their payments. Publisher is entitled to report related information (including personal and financial data) to the respective authorities.
- 6.6 Any publisher's proceeds from rights managed by national copyright organisations (collecting societies including but not limited to societies such as Copyright Clearance Center) are the sole property of Publisher. Any such author's proceeds are the sole property of Author, and if applicable, registration and taxation of such proceeds is Author's sole responsibility.

§ 7 Competing Works

Author agrees not to contribute or to release with another publisher any publication that contains expression or subject matter substantially similar to the Work and which may compete with the Work. Any publication of substantial parts of the Work requires the prior written consent of Publisher, such consent not to be unreasonably withheld.

§ 8 New Editions

- 8.1 Publisher has the sole right to determine the publication of any subsequent edition, such determination to be made only after consultation with the Author. In the event of subsequent editions, they shall be published by Publisher. Once notified by Publisher that a new edition is deemed necessary, Author agrees to deliver an updated manuscript according to the terms of Clause 2 "Delivery and Acceptance of the Work", together with the material for any new illustrations within 9 months of such notification. Substantial changes in the nature or size of the Work require the approval of Publisher. Upon publication of such new edition, Author shall receive a consideration equivalent to Clause 6 "Remuneration". The terms of this Agreement shall apply to any new edition that is published under this New Edition clause.
- 8.2 If Author, for whatever reason, is unwilling, unable or fails to submit an updated manuscript that meets the terms of this Agreement within the above stated period, then Publisher is entitled to revise, update and publish the content of the original edition or to designate one or more individuals (which, where Author comprises two or more persons, may be one or more of the persons comprising the Author) to prepare this



and all future editions. In this case, Author does not participate in preparing any subsequent editions. Publisher is entitled to continue to use the name of Author on any new editions of the Work. Notwithstanding clause 8.2 (first sentence), Author or Author's beneficiaries shall receive 50% of the financial consideration stipulated in Clause 6 "Remuneration" (if any) but shall have no right or claim from any further subsequent editions of the Work.

§ 9 Miscellaneous

This clause is left blank intentionally.

§ 10 General Provisions

- 10.1 If any difference shall arise between Author and Publisher concerning the meaning of this Agreement or the rights and liabilities of the parties, the parties shall engage in good faith discussions to attempt to seek a mutually satisfactory resolution of the dispute. This agreement shall be governed by, and shall be construed in accordance with, the laws of Switzerland. The courts of Zug, Switzerland shall have the exclusive jurisdiction.
- 10.2 Either party shall be entitled to terminate this Agreement forthwith by notice in writing to the other party if the other party commits a material breach of the terms of the Agreement which cannot be remedied or, if such breach can be remedied, fails to remedy such breach within 28 days of being given written notice to do so.
- 10.3 If Publisher, acting reasonably, decides that the Work is not suitable for publication in the intended market place, or that there is no substantial market for the Work, or the economic circumstances of publication have substantially changed (in each case other than due to the Work not being of a suitable quality to justify publication) then Publisher may at any time terminate this Agreement by giving one month's notice to Author in writing. In the event of such termination: (a) Author shall be entitled to retain all amounts received in respect of the Work previously paid to Author by Publisher at the date of termination, and (b) all rights granted by Author to Publisher under this Agreement shall revert to Author. Author will not in any event be entitled to any further payments due after the date of termination in respect to the Work.
- 10.4 Termination of this Agreement, howsoever caused, shall not affect:
- (a) any subsisting rights of any third party under any licence or sub-licence validly granted by Publisher prior to termination and Publisher shall be entitled to retain its share of any sum payable by any third party under any such licence or sub-licence;
 - (b) the rights of Author to any payments due in respect of exploitation of the Work by a third party pursuant to any licence granted by Publisher prior to the date of termination;
 - (c) any claim which either party may have against the other for damages or otherwise in respect of any rights or liabilities arising prior to the date of termination; or
 - (d) any option granted by Author to Publisher in respect of future works.
- 10.5 On termination of this Agreement in accordance with its terms, all rights and obligations of Publisher and Author under this Agreement will cease immediately, except that any terms of this Agreement that expressly or by implication survive termination of this Agreement shall remain in full force and effect. On termination of this Agreement by Publisher for any reason, Publisher shall not be liable for any payment in respect of any part of the Work not delivered at the date of termination. On termination of this Agreement Publisher may continue to sell any copies of the Work which are in its power, possession or control as at the date of expiry



or termination of this Agreement for a period of 6 months on a non-exclusive basis subject to the payment of royalties due hereunder.

10.6 This agreement and the documents referred to within constitute the entire agreement between the parties with respect to the subject matter hereof and supersede any previous agreements, warranties, representations, undertakings or understandings. It may be modified or amended only in writing. For purposes of this agreement, "in writing" requires either a written and signed document or an electronic confirmation with DocuSign or similar e-commerce solution.

10.7 The failure by either party to enforce any one or more of the terms of this Agreement at any time or for any period shall not constitute a waiver of such term or of that party's right to enforce any and all terms of the Agreement subsequently.

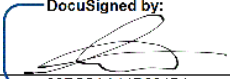
10.8 Author will not, without the prior written consent of Publisher, disclose the terms of this Agreement to any third party, except to Author's respective professional advisors or as required by a court, regulatory body or other authority of competent jurisdiction.

10.9 Nothing contained in this Agreement shall constitute or shall be construed as constituting a partnership, joint venture or contract of employment between Publisher and Author. Each author is jointly and severally liable for Author's obligations. Neither party may assign this agreement to third parties but Publisher may assign this agreement or the rights received hereunder to its affiliated companies.

To signify their agreement to the terms outlined herein, all parties have signed and exchanged this contract.

The Author(s)

Springer Nature Switzerland AG, Cham


DocuSigned by:

93D5CAA14D294B1...

Carlos Cuvilla Suárez

Guido Zosimo-Landolfo
Editorial Director /Asset Manager

Date 02 May 2019

Date _____

DocuSigned by:

660404E427EE433...

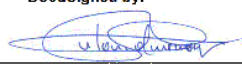
Dr. David Borge-Diez

Physical Sciences and Engineering
Vice President

Date 02 de mayo de 2019

Date _____



DocuSigned by:

E09A6EE547AD408
Dr. Antonio Colmenar Santos

Date 02 de mayo de 2019

For internal use only:

Order Number: 89019681

GPU/PD/PS: 3/32/457



Legal Entity Number: 1128

IU: 484940

Edition ID: 434783

In Process



Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 224 de 231

ANEXO XIX: “Water and Energy Use in Sanitary-ware Manufacturing - Process Modelling for Greater Efficiency” CERTIFICACION FIRMA ELECTRONICA DEL CONTRATO

Certificado de finalización

ID de sobre: 00785D062ECA42A99CA2D6371801893C Estado: Enviado
 Asunto: Contract 457_89019681_AUE_Cuviella Suárez_Water and Energy Use in Sanitary-ware Manufactu.
 Order Number: 89019681
 Sobre de origen:
 Páginas del documento: 8 Firmas: 3 Autor del sobre:
 Páginas del certificado: 6 Iniciales: 0 Contracts Applied Sciences
 Firma guiada: Activado Heidelberg Platz 3
 Cuña de la identificación del sobre: Activado Berlin, Germany 14197
 Zona horaria: (UTC+01:00) Ámsterdam, Berlín, Berna, Roma, Estocolmo, Viena contractsappliedsciences@springer.com
 Dirección IP: 195.128.10.103

Seguimiento de registro

Estado: Original Titular: Contracts Applied Sciences Ubicación: DocuSign
 30-04-2019 | 13:07 contractsappliedsciences@springer.com

Eventos de signatario

Eventos de signatario	Firma	Fecha y hora
Dr.Dieter Merkle dieter.merkle@springer.com Springer Nature Nivel de seguridad: Correo electrónico, Autenticación de cuenta (ninguna)	Completado Utilizando dirección IP: 213.71.6.130	Enviado: 30-04-2019 15:06 Visto: 30-04-2019 16:25 Firmado: 30-04-2019 16:26

Información sobre confidencialidad de registros y firmas electrónicas:

Aceptado: 08-07-2015 | 11:17
 ID: 2e22c681-d4a5-4b40-8db8-498a14508117

Antonio Colmenar-Santos
acolmenar@ieec.uned.es

DocuSigned by:

 F09A6FF6474D408...

Enviado: 30-04-2019 | 16:26
 Visto: 02-05-2019 | 11:12
 Firmado: 02-05-2019 | 11:13

Nivel de seguridad: Correo electrónico,
 Autenticación de cuenta (ninguna)

Adopción de firma: Imagen de firma cargada
 Utilizando dirección IP: 62.204.201.50

Información sobre confidencialidad de registros y firmas electrónicas:

No ofrecido a través de DocuSign

Carlos Cuviella Suárez
carlos.cuviella@roca.net

DocuSigned by:

 93D6CAA4D284B1...

Enviado: 30-04-2019 | 16:26
 Visto: 02-05-2019 | 14:45
 Firmado: 02-05-2019 | 14:46

Nivel de seguridad: Correo electrónico,
 Autenticación de cuenta (ninguna)

Adopción de firma: Dibujada en dispositivo
 Utilizando dirección IP: 185.124.28.62
 Firmado con un dispositivo móvil

Información sobre confidencialidad de registros y firmas electrónicas:

No ofrecido a través de DocuSign

David Borge-Diez
david.borge@unileon.es

DocuSigned by:

 500d04E427EE433...

Enviado: 30-04-2019 | 16:26
 Visto: 02-05-2019 | 10:57
 Firmado: 02-05-2019 | 10:58

Nivel de seguridad: Correo electrónico,
 Autenticación de cuenta (ninguna)

Adopción de firma: Imagen de firma cargada
 Utilizando dirección IP: 193.146.109.17

Información sobre confidencialidad de registros y firmas electrónicas:

No ofrecido a través de DocuSign

Eventos de signatario	Firma	Fecha y hora
-----------------------	-------	--------------

Guido Zosimo-Landolfo
guido.zosimo-landolfo@springer.com
Asset Manager
Springer Nature
Nivel de seguridad: Correo electrónico,
Autenticación de cuenta (ninguna)

Enviado: 02-05-2019 | 14:46

Información sobre confidencialidad de registros y firmas electrónicos:

Acceptado: 08-07-2015 | 11:16
ID: 36fd2f87-9da5-4aaa-8db2-8548e54cdcc5

Physical Sciences and Engineering
sigppu3@springer.com
Springer International Publishing
Nivel de seguridad: Correo electrónico,
Autenticación de cuenta (ninguna)

Enviado: 02-05-2019 | 14:46

Información sobre confidencialidad de registros y firmas electrónicos:

No ofrecido a través de DocuSign

Eventos de signatario en persona	Firma	Fecha y hora
----------------------------------	-------	--------------

Eventos de entrega al editor	Estado	Fecha y hora
------------------------------	--------	--------------

Eventos de entrega al agente	Estado	Fecha y hora
------------------------------	--------	--------------

Eventos de entrega al intermediario	Estado	Fecha y hora
-------------------------------------	--------	--------------

Eventos de entrega certificada	Estado	Fecha y hora
--------------------------------	--------	--------------

Eventos de copia oculta	Estado	Fecha y hora
-------------------------	--------	--------------

Anthony Doyle
Anthony.doyle@springer.com
Nivel de seguridad: Correo electrónico,
Autenticación de cuenta (ninguna)

Información sobre confidencialidad de registros y firmas electrónicos:

No ofrecido a través de DocuSign

Book contract archiving
book.contracts@springernature.com
Nivel de seguridad: Correo electrónico,
Autenticación de cuenta (ninguna)

Información sobre confidencialidad de registros y firmas electrónicos:

No ofrecido a través de DocuSign

Chandra Sekaran Arjunan
chandrasekaran.arjunan@springernature.com
Nivel de seguridad: Correo electrónico,
Autenticación de cuenta (ninguna)

Información sobre confidencialidad de registros y firmas electrónicos:

No ofrecido a través de DocuSign

Katrin Petermann
katrin.petermann@springer.com
Nivel de seguridad: Correo electrónico,
Autenticación de cuenta (ninguna)

Información sobre confidencialidad de registros y firmas electrónicos:

No ofrecido a través de DocuSign

Eventos de copia oculta	Estado	Fecha y hora
-------------------------	--------	--------------

Laura Burgess

laura.burgess@springer.com

Nivel de seguridad: Correo electrónico,
Autenticación de cuenta (ninguna)

Información sobre confidencialidad de registros y firmas electrónicos:

No ofrecido a través de DocuSign

Petra Jantzen

petra.jantzen@springer.com

Nivel de seguridad: Correo electrónico,
Autenticación de cuenta (ninguna)

Información sobre confidencialidad de registros y firmas electrónicos:

No ofrecido a través de DocuSign

Royalty Department

globalroyaltycontract@springer.com

Nivel de seguridad: Correo electrónico,
Autenticación de cuenta (ninguna)

Información sobre confidencialidad de registros y firmas electrónicos:

No ofrecido a través de DocuSign

Eventos de notario	Firma	Fecha y hora
--------------------	-------	--------------

Eventos de resumen de sobre	Estado	Marcas del tiempo
-----------------------------	--------	-------------------

Sobre enviado

Con hash/cifrado

02-05-2019 | 14:46

Eventos de pago	Estado	Marcas del tiempo
-----------------	--------	-------------------

Información sobre confidencialidad de registros y firmas electrónicos

CONSUMER DISCLOSURE

From time to time, Springer Science Business Science+Media Deutschland GmbH (we, us or Company) may be required by law to provide to you certain written notices or disclosures. Described below are the terms and conditions for providing to you such notices and disclosures electronically through the DocuSign, Inc. (DocuSign) electronic signing system. Please read the information below carefully and thoroughly, and if you can access this information electronically to your satisfaction and agree to these terms and conditions, please confirm your agreement by clicking the 'I agree' button at the bottom of this document.

Getting paper copies

At any time, you may request from us a paper copy of any record provided or made available electronically to you by us. You will have the ability to download and print documents we send to you through the DocuSign system during and immediately after signing session and, if you elect to create a DocuSign signer account, you may access them for a limited period of time (usually 30 days) after such documents are first sent to you. After such time, if you wish for us to send you paper copies of any such documents from our office to you, you will be charged a \$0.00 per-page fee. You may request delivery of such paper copies from us by following the procedure described below.

Withdrawing your consent

If you decide to receive notices and disclosures from us electronically, you may at any time change your mind and tell us that thereafter you want to receive required notices and disclosures only in paper format. How you must inform us of your decision to receive future notices and disclosure in paper format and withdraw your consent to receive notices and disclosures electronically is described below.

Consequences of changing your mind

If you elect to receive required notices and disclosures only in paper format, it will slow the speed at which we can complete certain steps in transactions with you and delivering services to you because we will need first to send the required notices or disclosures to you in paper format, and then wait until we receive back from you your acknowledgment of your receipt of such paper notices or disclosures. To indicate to us that you are changing your mind, you must withdraw your consent using the DocuSign 'Withdraw Consent' form on the signing page of a DocuSign envelope instead of signing it. This will indicate to us that you have withdrawn your consent to receive required notices and disclosures electronically from us and you will no longer be able to use the DocuSign system to receive required notices and consents electronically from us or to sign electronically documents from us.

All notices and disclosures will be sent to you electronically

Unless you tell us otherwise in accordance with the procedures described herein, we will provide electronically to you through the DocuSign system all required notices, disclosures, authorizations, acknowledgements, and other documents that are required to be provided or made available to you during the course of our relationship with you. To reduce the chance of you inadvertently not receiving any notice or disclosure, we prefer to provide all of the required notices and disclosures to you by the same method and to the same address that you have given us. Thus, you can receive all the disclosures and notices electronically or in paper format through the paper mail delivery system. If you do not agree with this process, please let us know as described below. Please also see the paragraph immediately above that describes the consequences of your electing not to receive delivery of the notices and disclosures

electronically from us.

How to contact Springer Science Business Science+Media Deutschland GmbH:

You may contact us to let us know of your changes as to how we may contact you electronically, to request paper copies of certain information from us, and to withdraw your prior consent to receive notices and disclosures electronically as follows:

To contact us by email send messages to: thuy.tran@springer.com

To advise Springer Science Business Science+Media Deutschland GmbH of your new e-mail address

To let us know of a change in your e-mail address where we should send notices and disclosures electronically to you, you must send an email message to us at thuy.tran@springer.com and in the body of such request you must state: your previous e-mail address, your new e-mail address. We do not require any other information from you to change your email address..

In addition, you must notify DocuSign, Inc. to arrange for your new email address to be reflected in your DocuSign account by following the process for changing e-mail in the DocuSign system.

To request paper copies from Springer Science Business Science+Media Deutschland GmbH

To request delivery from us of paper copies of the notices and disclosures previously provided by us to you electronically, you must send us an e-mail to thuy.tran@springer.com and in the body of such request you must state your e-mail address, full name, US Postal address, and telephone number. We will bill you for any fees at that time, if any.

To withdraw your consent with Springer Science Business Science+Media Deutschland GmbH

To inform us that you no longer want to receive future notices and disclosures in electronic format you may:

- i. decline to sign a document from within your DocuSign session, and on the subsequent page, select the check-box indicating you wish to withdraw your consent, or you may;
- ii. send us an e-mail to thuy.tran@springer.com and in the body of such request you must state your e-mail, full name, US Postal Address, and telephone number. We do not need any other information from you to withdraw consent.. The consequences of your withdrawing consent for online documents will be that transactions may take a longer time to process..

Required hardware and software

Operating Systems:	Windows® 2000, Windows® XP, Windows Vista®; Mac OS® X
Browsers:	Final release versions of Internet Explorer® 6.0 or above (Windows only); Mozilla Firefox 2.0 or above (Windows and Mac); Safari™ 3.0 or above (Mac only)
PDF Reader:	Acrobat® or similar software may be required to view and print PDF files
Screen Resolution:	800 x 600 minimum
Enabled Security Settings:	Allow per session cookies

** These minimum requirements are subject to change. If these requirements change, you will be



asked to re-accept the disclosure. Pre-release (e.g. beta) versions of operating systems and browsers are not supported.

Acknowledging your access and consent to receive materials electronically

To confirm to us that you can access this information electronically, which will be similar to other electronic notices and disclosures that we will provide to you, please verify that you were able to read this electronic disclosure and that you also were able to print on paper or electronically save this page for your future reference and access or that you were able to e-mail this disclosure and consent to an address where you will be able to print on paper or save it for your future reference and access. Further, if you consent to receiving notices and disclosures exclusively in electronic format on the terms and conditions described above, please let us know by clicking the 'I agree' button below.

By checking the 'I agree' box, I confirm that:

- I can access and read this Electronic CONSENT TO ELECTRONIC RECEIPT OF ELECTRONIC CONSUMER DISCLOSURES document; and
- I can print on paper the disclosure or save or send the disclosure to a place where I can print it, for future reference and access; and
- Until or unless I notify Springer Science Business Science+Media Deutschland GmbH as described above, I consent to receive from exclusively through electronic means all notices, disclosures, authorizations, acknowledgements, and other documents that are required to be provided or made available to me by Springer Science Business Science+Media Deutschland GmbH during the course of my relationship with you.

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuvilla Suárez	10/03/2021	Página 225 de 231

ANEXO XX: “Water and Energy Use in Sanitary-ware Manufacturing - Process Modelling for Greater Efficiency” FORMULARIO DE PROPUESTA DEL LIBRO

Please return to: Anthony Doyle, Executive Editor, Engineering
 Springer, The Campus, 4 Crinan Street, London, N1 9XW, UK.
 Tel: +44 (0) 20 3192 2750; Mobile +44 (0) 7818 406843; email: anthony.doyle@springer.com

Book Proposal Form

The following questions are designed to help us get a clear picture of your book proposal and to provide us with information about your expected readership. Please complete the form as fully as you can.

FULL OR WORKING TITLE OF THE BOOK: (please do not use ALL upper case)

Water and Energy consumption improvement in sanitary-ware industry by modelling processes

SUBTITLE: (please do not use ALL upper case)

Modelling of processes applied to re-engineering the flow-chart of energy and water

Will this be an authored or edited volume? (i.e. are you writing the manuscript yourself, or will you edit the chapters written by others?)

Authored x

Edited

	AUTHOR/EDITOR 1	AUTHOR/EDITOR 2	AUTHOR/EDITOR 3	AUTHOR/EDITOR 4
TITLE (PROFESSOR, DOCTOR, etc.)	Dr. Eng. candidate	Doctor	Doctor	
PERSONAL NAMES (IN FULL)	Carlos	David	Antonio	
FAMILY NAME	Cuviella Suárez	Borge Diez	Colmenar Santos	
E-MAIL	carlos.cuviella@roca.net	dbord@unileon.es	acolmenar@ieec.uned.es	
TELEPHONE NUMBER	34936351656	34987291000	34913987788	
QUALIFICATIONS (Ph.D., Dr. Eng etc.)	Dr. Eng. candidate	Dr. Eng.	Dr. Eng.	
HOME PAGE URL				
ORCID ID (APPLY AT ORCID.ORG)				

CORRESPONDING ADDRESS

INSTITUTION	ROCA	University of León	UNED	
DEPARTMENT	Engineering	Electrical engineering and automatic systems	Control, electronics and electrical engineering	
STREET NUMBER	2	s/n	12	
STREET NAME	Rambla Lluch	Campus de	Juan del Rosal	

		Vegazana		
CITY	Gavà	León	Madrid	
STATE /COUNTY	Barcelona	León	Madrid	
POSTAL/ZIP CODE	08850	24071	28040	
COUNTRY	Spain	Spain	Spain	

BOOK FORMAT

IN WHICH FORMAT(S) WILL YOUR ELECTRONIC SOURCE FILES BE?

(The following combinations are acceptable but if you wish to use some other format or have trouble producing pdf, please talk to us about it)

LaTeX + pdf MS Word x
 MS Word + pdf PDF

WHAT WILL BE THE APPROXIMATE FINAL LENGTH OF YOUR BOOK? (approx. 450 words = 1 page)

300 pages

WILL THE BOOK CONTAIN ANY OF THE FOLLOWING: YES NO IF "YES", HOW MANY?

line drawings	x	<input type="checkbox"/>	30
black and white photos	x	<input type="checkbox"/>	10
colour photos	x	<input type="checkbox"/>	20

DO YOU INTEND TO INCLUDE ANY OF THE FOLLOWING: YES NO

worked examples in the text	x	<input type="checkbox"/>
problems	<input type="checkbox"/>	x
solutions to problems	<input type="checkbox"/>	x
end-of-chapter references	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bibliography	x	<input type="checkbox"/>
Index	x	<input type="checkbox"/>

WILL THERE BE ANY SUPPLEMENTARY MATERIAL: YES NO

material via ftp/www	<input type="checkbox"/>	x
other (please give details)	<input type="checkbox"/>	x

IN WHAT FORM IS YOUR BOOK AT PRESENT:

ideas only	<input type="checkbox"/>
notes	x
draft chapters (how many?)	<input type="checkbox"/>
complete draft	<input type="checkbox"/>

WHEN DO YOU ANTICIPATE BEING ABLE TO SUBMIT THE FIRST COMPLETE DRAFT?

September 2020

ABOUT YOUR BOOK

WHICH ONE OF THE FOLLOWING CATEGORIES DO YOU THINK BEST DESCRIBES YOUR BOOK?

- A *textbook*: designed primarily to meet the demands of a course taught at undergraduate or post-graduate level
- A *monograph*: a detailed treatment on a very specific subject
- A *brief*: a very short review of a topic (150 pages or less)
- A *reference book*: a (probably) long book filled with facts or an overview of a subject bringing together many strands of research
- A *proceedings* volume
- A *handbook*: a concise compilation of approved, key information on methods of research and general principles with contributors from all over the world

MAIN DISCIPLINE(S) / SUB-DISCIPLINE(S)

PLEASE PROVIDE A MAXIMUM OF 6 OF THE MOST RELEVANT DISCIPLINES FOR YOUR BOOK, STARTING WITH THE MOST IMPORTANT. INSERT THE CODE OF THE DISCIPLINE FROM THE LIST PROVIDED BY YOUR PUBLISHING EDITOR.

MAIN DISCIPLINE/SUB-DISCIPLINE	PRODUCT MARKETING CODE (FROM ATTACHED LIST)
118000	Energy efficiency
T14000	Engineering Thermodynamics, Heat and Mass Transfer
T11006	Mathematical and Computational Engineering
P21050	Thermodynamics
P31000	Applied and technical physics
U35040	Waste Water Technology / Water Pollution Control / Water Management / Aquatic Pollution

PLEASE LIST SEVERAL (AT LEAST FIVE) KEYWORDS ASSOCIATED WITH YOUR BOOK.

Accurate, relevant keywords facilitate “search-engine optimization”: the process by which we try to ensure that your book appears as close to the top of relevant Google searches as possible. Please bear in mind that:

- one-word keywords are likely to be too generic, so try using two- or three-word phrases to be more specific;
 - include relevant variations of your best keywords if different words can be used in their place.
- i. Energy saving
 - ii. Sustainability
 - iii. Water saving
 - iv. Sanitary-ware industry
 - v. Heat recovering
 - vi. Process modelling
 - vii. Consumption optimization
 - viii. Factory design

ix.

x.

PLEASE WRITE A SHORT STATEMENT OUTLINING THE SUBJECT MATTER OF THE BOOK. Please bear in mind that this information will be used by many people, *most of whom are not engineers.*

Please try to address the following points:

- What is the subject of your book?
- What special features does your book have (illustrations, tables, new approach, *etc.*)?
- What is the main benefit of reading the book?

As an intensive consumer of energy and water, sanitary-ware ceramic industry has many chances to reduce consumption due, mainly, to the particular share of thermal energy which can be used as a tool of re-engineering applied to optimize energy and water consumption. This is the core of the book. The way to modelling the processes through the manufacturing line is defined for the purpose of defining the optimal plant configuration. Alternative energies, heat recovering, co-generation, multi-effect distillation, are the technics by which reductions of energy, water and CO₂ are obtained.

IF YOUR BOOK IS A NEW EDITION, HOW DOES IT DIFFER FROM THE PREVIOUS ONE(S)?

PLEASE GIVE DETAILS OF YOUR AREA OF WORK AND CAREER WHICH UNDERLINE THE USEFULNESS OF THE BOOK TO THE READER

Engineering of facilities for the ceramic sanitary-ware industry from the consumption point of view has been the main activity for 18 years in pursuing the best plant configuration and the lowest resources consumed.

PLEASE WRITE A SHORT STATEMENT ABOUT THE MOST IMPORTANT FEATURES OF YOUR BOOK TO BE USED AS THE BASIS OF THE BACK-COVER TEXT (About 200 words) (please do not use ALL upper case)

Over the years the ceramic industry has been widely studied. However, little attention has been devoted to the particular area of sanitary-ware manufacturing, although it is a great consumer of energy and water. The aim of this book is to analyze and quantify how and where energy and water are consumed by mapping the whole process. By modelling every relevant sub-process as a balance of mass and energy, the modelled map can be optimized by diverting energy flows from one sub-process to another searching for the minimum incoming energy within the global process, which derives in a minimization of residual energy, waste water and emissions. This book provides a tool to know how the resources are consumed in the sanitary-ware industry and show the possibilities to reduce them as well as the global impact. Sanitary-ware manufacturing has a specific particular configuration of energy consumption from the thermal point of view. Some techniques are very suitable to meet the optimal reduction. Heat recovery from kilns to dry ware and moulds, distillate water from flushing molds, condensate water from dryers and halls exhausting, combined heat and power plant coupled to the plant system, etc.

MARKET

PLEASE OUTLINE IN AS MUCH DETAIL AS POSSIBLE THE PRIMARY AND SECONDARY MARKETS FOR YOUR BOOK. (You should include academic and industrial areas and wherever possible please indicate the level the book, is aimed at (3rd/4th-year undergraduate, postgraduates, researchers *etc.*), the academic discipline involved, the titles of courses at which it could be taught, and specific job titles, functions and responsibilities.)

Primary Market

- i. Ceramic industry professionals related to energy or water management
- ii. Universities postgraduate (Project management, energy management, water management, etc.
- iii. Consulting engineering in thermal process design
- iv. Energy services professionals

Additional Market

- i. Engineers and plant managers
- ii. Undergraduate students in energy field
- iii. energy financing services

Course Titles (Please state whether the book is likely to appeal as a first choice for adoption or as a supplementary text)

- i. Energy management
- ii. Water management
- iii. Plant design for energy optimization
- iv. Modelling industrial processes

DO YOU ANTICIPATE THE POSSIBILITY OF A BULK SALE FOR THIS TITLE? IF SO, TO WHOM? PLEASE GIVE A CONTACT NAME AND DETAILS. (PLEASE DO NOT USE ALL UPPER CASE)

PLEASE GIVE SUGGESTIONS FOR CONFERENCES, JOURNALS *ETC.* THAT SHOULD BE CONSIDERED FOR PROMOTIONAL PURPOSES

CONFERENCE	DATE(S) (DD/MM/YY - DD/MM/YY)*	LOCATION	URL (IF KNOWN)
International Conference On Energy Research and Development	November 19-21, 2019	State of Kuwait	https://www.ashrae.org/conferences/topical-conferences/7th-international-conference-on-energy-research-development
International Conference on Energy Efficiency and Policy	December 2 - 3, 2020	Sydney, Australia	https://waset.org/conference/2020/12/Sydney/ICEEP
INTERNATIONAL CONFERENCE ON CLEAN ENERGY	10-14 August, 2020	Kuching, Sarawak	http://www.icce2020.org/
World Energy Congress	9th Sep to 12th Sep 2019	Abu Dhabi	https://www.worldenergy.org/events/4411c1e3-69bd-e711-80c6-00155d050ff0/
CERAMITEC	16.11.2021 - 19.11.2021	Munchen	https://www.tradefairdates.com/Ceramitec-M3506/Munich.html

* Please bear in mind that if your book is accepted for publication, it will be usually be published about four months after you submit a proceedings and between 6 and 9 months after you submit a manuscript. Conferences should usually be after that date and if accurate information will only be available around the time you submit, please leave returning this information until then.

JOURNAL FOR REVIEWS	PUBLISHER	PUBLISHER'S URL (IF KNOWN)
International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology	Springer	https://www.springer.com/engineering/industrial+management/journal/40684
Journal of Modern Power Systems and	Springer	https://www.springer.com/energy/systems

Clean Energy		%2C+storage+and+harvesting/journal/40565
International Journal of Energy and Environmental Engineering	Springer	https://www.springer.com/energy/renewable+and+green+energy/journal/40095
Journal of cleaner production	Elsevier	https://www.journals.elsevier.com/journal-of-cleaner-production
Applied thermal engineering	Elsevier	https://www.journals.elsevier.com/applied-thermal-engineering

PROFESSIONAL SOCIETY	CONTACT DETAILS (INCLUDING URL IF KNOWN)
American Society of Heating and Ventilating Engineers (ASHRAE)	ASHRAE Headquarters 1791 Tullie Circle, N.E. Atlanta, GA 30329 404-636-8400 https://www.ashrae.org/about/mission-and-vision/ashrae-industry-history
International energy Agency	info@iea.org +33 (0)1 40 57 65 00 31-35 rue de la Fédération 75739 Paris Cedex 15 France https://www.iea.org/
THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS	https://www.asme.org/
American Society of Thermal and Fluids Engineers (ASTFE)	Tel: +1 212 288 9200 https://www.astfe.org/

DO YOU KNOW OF ANYONE WHO WOULD BE ABLE TO REVIEW YOUR CURRENT PROPOSAL? PLEASE LIST UP TO FIVE CONTACTS AND THEIR EMAIL ADDRESSES. (Please do not use ALL upper case.)

COMPETITIVE/RELATED LITERATURE

WHAT OTHER WORKS HAVE BEEN PUBLISHED ON THIS SUBJECT? (Please give author, title, publisher, year of publication and price where possible)

- i. Cuiwella et al. Heat recovery in sanitary-ware industry applied to water and energy saving by multi-effect distillation. Journal of cleaner production. 2018

The current proposal is different from this book because it is not deeply detailed in calculation but results.

- ii. Cuviella et al. Management tool to optimize energy and water consumption in the sanitary-ware industry. 2018

The current proposal is different from this book because it is only a part of a series.

- iii. Cuviella et al. Sanitary-ware factories: heat recovery strategies to optimize energy
- iv. and water consumption. 2018

The current proposal is different from this book because The current proposal is different from this book because it is only a part of a series.

v.

The current proposal is different from this book because there is not much research referring sanitary-ware manufacturing processes from the consumption point of view. There is quite much research regarding tile manufacturing and ceramic production in general. This book would be a real novelty due to the specific of the subject.

Please give any more general reasons why your book is distinct from its competition here:

OPEN ACCESS?

ARE YOU INTERESTED IN MAKING YOUR BOOK AVAILABLE AS AN OPEN-ACCESS PUBLICATION?

Please check one of the following options:

my funder requires open-access publication

open-access publication is not required but I wish to explore this option

I do not wish to publish open access and am not required to do so by my funder

IF YOU ARE INTERESTED IN MAKING YOUR BOOK AVAILABLE AS AN OPEN-ACCESS PUBLICATION, PLEASE INDICATE WHETHER OR NOT YOUR RESEARCH WAS FUNDED AND, IF APPLICABLE, THE NAME OF THE FUNDER:

funded Identity of funding organization/institution

not funded

GENERAL REMARKS

When you return this form, please also include:

A BRIEF SYNOPSIS

A PROVISIONAL TABLE OF CONTENTS

A SHORT *c.v.*



IF POSSIBLE, A COUPLE OF SAMPLE CHAPTERS

(ELECTRONIC) SIGNATURE



DATE: February, 2019

Many thanks for taking the time to complete this questionnaire. Your detailed responses will be very helpful in our assessment of the potential market for your proposal and will enable us to reach a decision regarding publication that much sooner.

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 226 de 231

ANEXO XXI: “Water and Energy Use in Sanitary-ware Manufacturing - Process Modelling for Greater Efficiency” TABLA PROPUESTA DE CONTENIDOS

TABLE OF CONTENTS

1. INTRODUCTION TO CERAMIC SANITARY-WARE MANUFACTURING.....	12
1.1. Environment, sustainability and ceramics.....	12
1.2. Energy and water consumption relevant to the sanitary-ware industrial sector	14
1.3. Sanitary-ware manufacturing worldwide	16
1.4. Ceramic sanitary-ware manufacturing general process.....	18
2. TYPES OF FACTORIES BY CASTING TECHNOLOGY	21
2.1. Main technologies for casting barbotine	21
2.1.1. Traditional technology.....	21
2.1.2. Current technology	21
2.2. Characterization of factory type.....	23
2.2.1. Water consumption differences	24
2.2.1.1. Reverse osmosis	24
2.2.2. Energy consumption differences	25
2.2.2.1. Electrical differences	25
2.2.2.2. Thermal differences.....	25
3. PLANNING FOR ENERGY AND WATER MANGEMENT	26
3.1. Characterization of consumption and waste.....	26
3.2. Quantification of energy and water requirements	29
3.2.1. Electrical demand	29
3.2.1.1. Electrical demand for compressed air.....	29
3.2.1.2. Electrical demand for lighting	30
3.2.2. Thermal demand.....	30
3.2.2.1. Calculation of Wph.....	32
3.2.2.2. Calculation of Wlosses	32
3.2.3. Psychrometric calculations	32
3.3. Requirements in every section of the factory	34
3.3.1. Raw materials	34
3.3.2. Slip preparation	35
3.3.3. Glaze preparation.....	36
3.3.4. Modelling and molds	37
3.3.5. Casting.....	38
3.3.6. Heating and ventilation.....	39
3.3.7. Drying.....	39
3.3.8. Glazing	40
3.3.9. Kilns	41
3.3.10. Sorting	41
3.3.11. Offices	41
3.3.12. Ware-house.....	41

3.3.13. Facilities	41
3.4. Existing and potential links of resource and wastes	42
4. PRODUCTION LINE: PROCESS AND ENERGY MODELING	43
4.1. Raw materials section	43
4.2. Slip preparation	48
4.3. Glaze preparation	51
4.4. Modeling and molds.....	52
4.4.1. Molds dryer model.....	52
4.4.1.1. Daily production of molds	53
4.4.1.2. Water contained in one mold to be evaporated.....	54
4.4.1.3. Fresh air and psychrometric conditions to absorb evaporated water	55
4.4.1.4. Heat losses through the dryer enclosure	55
4.4.1.5. Required energy to heat up all masses inside the dryer	55
4.5. Casting	56
4.5.1. Plaster mold factory.....	56
4.5.2. Resin mold factory.....	57
4.5.2.1. Boilers	57
4.6. Heating and ventilation	58
4.6.1. Heating and Ventilation Unit model.....	58
4.6.2. Thermal demand calculation of a HVU.....	61
4.6.2.1. Heat up the ware and the supporting carts.....	61
4.6.2.2. Heat the fresh air to absorb evaporated water.....	62
4.6.2.3. Keep the temperature into the chamber because of the thermal losses.....	62
4.6.2.4. Keep the temperature into the chamber because of the solar radiation.....	62
4.6.2.5. Evaporate the water to be extracted.....	63
4.6.3. Climate conditions.....	63
4.7. Drying	64
4.7.1. Ware dryer.....	65
4.7.2. Thermal demand calculation of a ware dryer	67
4.7.2.1. Heat up the ware and the supporting carts.....	67
4.7.2.2. Heat the fresh air to absorb evaporated water.....	67
4.7.2.3. Keep the temperature into the chamber because of the thermal losses.....	68
4.7.2.4. Evaporate the water to be extracted.....	68
4.8. Glazing.....	68
4.8.1. Kilns	68
4.8.2. Tunnel kiln model	68
4.8.2.1. Kiln definition	71
4.8.2.2. Simulation methodology.....	73
4.8.2.3. Losses calculation.....	74
4.8.2.4. Load and carts thermal evolution	80



4.8.2.5. Mass and energy balances	81
4.8.3. Shuttle kiln model.....	82
4.9. Sorting, offices, ware-house and facilities sections.....	85
5. ANALYSIS OF CONSUMPTIONS	86
5.1. Electrical model	86
5.2. Thermal models.....	89
5.2.1. Molds dryer model results	90
5.2.2. HVU model results	90
5.2.3. Ware dryer model results.....	94
5.2.4. Tunnel kiln model results	96
5.2.4.1. Energy balance for each module.....	96
5.2.4.2. Global energy balance	97
5.2.4.3. Residual heat throughout the stacks	97
5.2.5. Shuttle kiln model results	98
5.2.5.1. Energy balance at each stage	98
5.2.5.2. Global energy balance	98
5.2.5.3. Residual heat throughout the stack.....	99
5.3. Water consumption model	100
5.4. CO2 emissions model	101
5.5. Global results.	102
6. IMPROVEMENT PROPOSALS	104
6.1. GENERALIZED PROPOSALS	105
6.1.1. Efficiency of the motors	105
6.1.2. Frequency variation of electrical motors.	106
6.1.3. Substitution of conventional by LED lighting	107
6.1.4. Lighting regulation by control of presence and external lighting level	108
6.2. PARTICULARIZED ACTIONS PER SECTION	108
6.3. RAW MATERIALS.....	109
6.3.1. Mills.....	109
6.3.2. Belts, sieves, magnets and other equipment.	110
6.4. SLIP PREPARATION	111
6.4.1. Blungers.....	111
6.4.2. Tanks for stock of slip	111
6.4.3. Peristaltic pumps, belts, sieves and other equipment.....	111
6.5. MODELLING & MOLDS	111
6.5.1. Mold dryers	111
6.5.2. Hygrothermal regulation of the dryer environment.	112
6.5.3. Insulation improvement	113
6.5.4. Recovered heat.	113
6.6. CASTING	113

6.6.1.	Casting benches	113
6.6.2.	Transformer for handling device	113
6.6.3.	Fans to dry molds	114
6.6.4.	Local lighting lines	114
6.6.5.	Pressure machines.....	114
6.6.6.	Tanks for stock of slip	114
6.7.	HEATING AND VENTILATION OF CASTING HALL.....	115
6.7.1.	Heating and ventilation units	115
6.7.2.	Heat recovery.....	115
6.7.3.	Hygrothermal regulation.....	115
6.7.4.	Enclosure insulation	115
6.8.	WARE DRYERS	115
6.8.1.	Thermal parameters of ware dryer operation.....	115
6.8.2.	Insulation of the enclosure.....	116
6.8.3.	Regulation of fresh air intake	116
6.8.4.	Heat recovery.....	117
6.9.	KILNS.....	117
6.9.1.	Induced draught and Pre-heating of combustion air	118
6.9.2.	Pulse burners	119
6.9.3.	Controlled regulation of the kiln.....	120
6.9.4.	Load control.....	120
6.9.5.	Substitution of cordierite by Silicon carbide for refractory supports.....	120
6.9.6.	Insulation increase	121
6.9.7.	Refractory lining film	121
6.10.	FACILITIES	121
6.10.1.	Frequency variation	121
6.10.2.	Heat recovery from compression cooling	122
6.10.3.	Appropriate maintenance of the compressed air network.....	122
6.10.4.	Boilers fueled by recovered heat	123
6.10.5.	Actions on pumping systems	123
6.11.	OTHER GENERAL ACTIONS.....	123
6.11.1.	Alternative energies (photovoltaic)	124
6.11.2.	Combined heat and power plant	125
6.11.3.	Organic Rankine Cycles	128
6.12.	WATER SAVING MEASURES	130
6.12.1.	Multi-effect distillation.....	130
6.12.2.	Condensation via absorption machine	131
6.13.	OPTIMIZATION	132
6.13.1.	First stage.....	132
6.13.2.	Second stage	133

6.13.3.	Global assessment.....	134
7.	PROPOSALS CALCULATION	135
7.1.	ELECTRICAL SAVINGS	135
7.1.1.	Efficiency of the motors	135
7.1.2.	Frequency variation of electrical motors.	136
7.1.3.	Substitution of conventional by LED lighting.....	137
7.1.4.	Lighting regulation by control of presence and external lighting level	137
7.1.5.	Summary of electrical generalized actions	138
7.2.	NON EXCLUSIVE THERMAL SAVINGS	138
7.2.1.	Increase of thermal insulation of the mold dryer.....	138
7.2.2.	Increase of thermal insulation of the casting hall	139
7.2.3.	Thermal and humidity control of the HVU's	139
7.2.4.	Increase of thermal insulation of the ware dryer	139
7.2.5.	Thermal and humidity control of the ware dryer.....	140
7.2.6.	Load lightening by SiC of the tunnel kiln.....	140
7.2.7.	Load lightening by SiC of the shuttle kiln.....	140
7.2.8.	Heating recovery from compressor refrigeration.....	141
7.2.9.	Summary of thermal non-exclusive savings	141
7.3.	EXCLUSIVE THERMAL SAVINGS	141
7.3.1.	Heating recovery.....	141
7.3.2.	Induced draught for tunnel kiln	142
7.3.3.	Primary air preheating for tunnel kiln.....	143
7.3.4.	Primary air preheating for shuttle kiln.....	144
7.3.5.	Condensation by absorption machine	144
7.3.5.1.	Psychrometric model	146
7.3.5.2.	Dryers and HVU calculation	148
7.3.5.2.1.	Heat up the ware and the supporting carts.....	148
7.3.5.2.2.	Heat the fresh air to absorb evaporated water.	148
7.3.5.2.3.	Keep the temperature into the chamber because of the thermal losses.....	149
7.3.5.2.4.	Evaporate the water to be extracted.....	149
7.3.5.2.5.	Mass of water from fresh air.	149
7.3.5.2.6.	Mass of water from combustion air when air is fueled by natural gas.	149
7.3.5.2.7.	Mass of water from recovered heat.	150
7.3.5.2.8.	System results.....	150
7.3.6.	MED distillation	152
7.3.6.1.	Cascade of two simple evaporating cells.....	154
7.3.6.2.	MED model	156
7.3.6.2.1.	Equations at the first effect.....	157
7.3.6.2.2.	Equations at the generic i-effect	158
7.3.6.3.	Models coupling	161

7.3.6.4. MED Consumptions and outputs.....	161
7.3.6.4.1. Result balance of simple cascade of condenser-evaporator cells	161
7.3.6.4.2. Result balance for MED	162
7.3.6.4.3. R.O. Consumptions and electrical increases.....	164
7.3.7. Photovoltaic plant.....	164
7.3.8. Cogeneration [94].....	166
7.3.8.1. Cogeneration plant design	168
7.3.8.1.1. Conventional factory consumption.....	171
7.3.8.1.2. Water saving measures	172
7.3.8.1.3. Gas turbine power design as annual averaged demanded power.....	173
7.3.8.1.4. Energy optimization. The power of the optimal gas turbine to minimize the primary energy	175
7.3.8.1.5. Economical optimization. The power of the optimal gas turbine to minimize the annual cost as a function of the prices of the energy.	177
7.4. SUMMARY OF OPTIMIZATION RESULTS	180
8. ENERGY SUPPLY VS. ENERGY DEMAND.....	182
8.1. VARIABILITY OF THE DEMAND.....	182
8.2. CYCLE ANALYSIS	183
8.3. WATER CONDENSATION POTENTIAL AND CO ₂ EMISSIONS	189
8.4. RECOVERY STRATEGY CONCLUSIONS.....	191
9. OPTIMIZED FACTORY VS. CONVENTIONAL FACTORY	193
9.1. OPTIMIZED CONFIGURATION	193
9.2. RESULTS AND DISCUSSION	194
10. EXERGoeconomic ANALYSIS [101].....	200
10.1. INTRODUCTION TO THE ANALYSIS APPROACH.....	200
10.2. METHODOLOGY OF CALCULATION	204
10.3. RESULTS OF EXERGoeconomic ANALYSIS.....	210
10.4. MAJOR CONCLUSIONS OF EXERGoeconomic ANALYSIS	217
11. PRACTICAL IMPLEMENTATION OF SELECTED CONFIGURATIONS.....	218
11.1. ELECTRICAL GENERAL MEASURES.....	219
11.1.1. Efficiency of the electrical motors.....	219
11.1.2. Frequency variation of the electrical motors	220
11.1.3. Substitution of conventional lighting by LED	220
11.1.4. Lighting regulation	220
11.2. GENERAL THERMAL MEASURES.....	220
11.2.1. Increase of thermal insulation.....	220
11.2.2. Thermal and humidity automatic control.....	220
11.2.3. Load lightening by SiC.....	220
11.2.4. Heating recovery from compressor refrigeration.....	221
11.3. EXCLUSIVE MEASURES	221



11.3.1. Heating recovery.....	221
11.3.2. Induced draught in tunnel kiln.....	221
11.3.3. Pre-heating of kiln airs	221
11.3.4. Absorption machine.....	221
11.3.5. MED distiller.....	221
11.3.6. Photovoltaic plant.....	221
11.3.7. Cogeneration plant.....	221
11.4. SUMMARY OF INVESTMENT.....	222
12. REFERENCES	226

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 227 de 231

ANEXO XXII: “Water and Energy Use in Sanitary-ware Manufacturing - Process Modelling for Greater Efficiency” PROPUESTA DE SINOPSIS

SYNOPSIS

Over the years the ceramic industry has been widely studied. However, little attention has been devoted to the particular area of sanitary-ware manufacturing, although it is a great consumer of energy and water. The aim of this book is to analyze and quantify how and where energy and water are consumed by mapping the whole process. By modeling every relevant sub-process as a balance of mass and energy, the modeled map can be optimized by diverting energy flows from one sub-process to another searching for the minimum incoming energy within the global process, which derives in a minimization of residual energy, waste water and emissions. This book provides a tool to know how the resources are consumed in the sanitary-ware industry and show the possibilities to reduce them as well as the global impact. Sanitary-ware manufacturing has a specific particular configuration of energy consumption from the thermal point of view. Some techniques are very suitable to meet the optimal reduction. Heat recovery from kilns to dry ware and molds, distillate water from flushing molds, condensate water from dryers and halls exhausting, combined heat and power plant coupled to the plant system, etc.

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 228 de 231

ANEXO XXIII: “Water and Energy Use in Sanitary-ware Manufacturing - Process Modelling for Greater Efficiency” FLYER DE LA PUBLICACION

Springer

1st
edition

Due 2021-09-11
1st ed. 2022, XXV, 275 p.
60 illus., 20 illus. in color.

Printed book

Hardcover

Printed book

Hardcover

ISBN 978-3-030-72490-0

Ca. £ 109,99 | Ca. CHF 153,50 | Ca.
129,99 € | Ca. 142,99 € (A) | Ca.
139,09 € (D)

Planned

Discount group

Science (SC)

Product category

Monograph

Series

Green Energy and Technology

Energy : Energy Efficiency

Cuviella Suárez, C., Borge-Diez, D., Colmenar-Santos, A.

Water and Energy Use in Sanitary-ware Manufacturing

Using Modelling Processes for Water and Energy Accounting and Decarbonisation

- Analyzes energy and water consumption in the ceramic sanitary-ware industry
- Presents modeling techniques to reduce energy consumption
- Showcases practical implementations of the proposed modeling configurations

This book analyses and quantifies how and where energy and water are consumed by the ceramic sanitary-ware industry and provides solutions as to how to reduce this. The whole production process is mapped, including modelling methods. The book begins by providing an introduction to ceramic sanitary-ware production and types of factories casting technology. It then moves on to discuss the process and energy modelling for the production line, analysis of energy and water consumptions and proposals for improvements. The last chapter presents the practical implementation of the selected modelling configuration. This book is of particular interest to water and energy management professionals within the ceramic industry, but the methods are of interest to those in other production industries as well.

[Order online at springer.com/booksellers](https://www.springer.com/booksellers)**Springer Nature Customer Service Center GmbH**

Customer Service

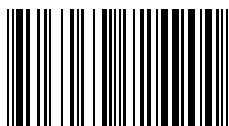
Tiergartenstrasse 15-17

69121 Heidelberg

Germany

T: +49 (0)6221 345-4301

row-booksellers@springernature.com



ISBN 978-3-030-72490-0 / BIC: TH / SPRINGER NATURE: SC118000

Prices and other details are subject to change without notice. All errors and omissions excepted. Americas: Tax will be added where applicable. Canadian residents please add PST, QST or GST. Please add \$5.00 for shipping one book and \$ 1.00 for each additional book. Outside the US and Canada add \$ 10.00 for first book, \$5.00 for each additional book. If an order cannot be fulfilled within 90 days, payment will be refunded upon request. Prices are payable in US currency or its equivalent.

Part of **SPRINGER NATURE**

[Editorial Policies](#)

[Rights & Permissions](#)

[Societies & Publishing Partners](#)

[Subscription Agencies \(Springer Nature\)](#)

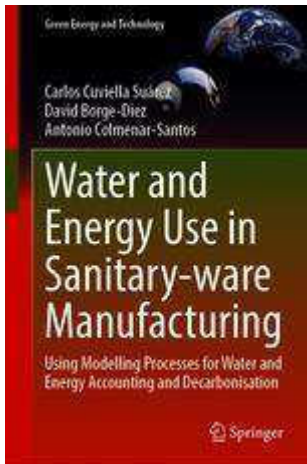
[Help & Contact](#)

[Springer Shop](#)

[About us](#)

[Energy Energy Efficiency](#)

[Green Energy and Technology](#)



© 2022

Water and Energy Use in Sanitary-ware Manufacturing

Using Modelling Processes for Water and Energy Accounting and Decarbonisation

Authors: **Cuvilla Suárez**, Carlos, **Borge-Diez**, David, **Colmenar-Santos**, Antonio

Analyzes energy and water consumption in the ceramic sanitary-ware industry

Presents modeling techniques to reduce energy consumption

Showcases practical implementations of the proposed modeling configurations

[see more benefits](#)

Buy this book

eBook

ISBN 978-3-030-72491-7

Digitally watermarked, DRM-free

Included format:

ebooks can be used on all reading devices

Hardcover

ca. 135,19 €

price for Spain (gross)

Due: September 11, 2021

ISBN 978-3-030-72490-0

Free shipping for individuals worldwide

Institutional customers should get in touch with their account manager

[Covid-19 shipping restrictions](#) & [severe weather in the US](#) may cause delays

The final prices may differ from the prices shown due to specifics of VAT rules

[FAQ Policy](#)

[About this book](#)

[About the authors](#)

[About this book](#)

[About the authors](#)

Carlos Cuvilla Suarez has over 25 years' experience working as Engineer in various capacities. He is currently pursuing his Ph.D. in Industrial Technologies at the National University of Distance Education, whilst also working as an internal consultant for the technological department of ROCA. He has published several papers on energy efficiency, sanitary-ware factories and alternative energy systems.

Dr. Colmenar-Santos is a senior lecturer in the field of Electrical Engineering at the Department of Electrical, Electronic and Control Engineering at the National Distance Education University. He is the author of more than 60 papers published on top peer-reviewed journals. He has participated in more than 100 national and international conferences related to renewable energies and multimedia systems applied to teaching. He has worked for AECI-ICI as a high qualified consultant at the INTECNA project (Nicaragua) and been part of the Spanish section of the International Solar Energy Society (ISES) and of the Association for the Advancement of Computing in Education (AACE), working in a number of projects related to renewable energies.

Dr. David Borge-Diez has a Ph.D. in Energy Engineering and master's degrees in Industrial Technology Research, Industrial Engineer and Bachelor in Industrial Engineer. His work in teaching and as a researcher is focused on the field of energy, with special emphasis on the use of unconventional energy sources and energy efficiency. For more than 8 years, he has worked in different private companies nationally and internationally developing research projects and engineering work, whilst he has made this activity compatible with teaching and research in different universities and organizations.

Buy this book

eBook

ISBN 978-3-030-72491-7

Digitally watermarked, DRM-free

Included format:

ebooks can be used on all reading devices

Hardcover

ca. 135,19 €

price for Spain (gross)

Due: September 11, 2021

ISBN 978-3-030-72490-0

Free shipping for individuals worldwide

Institutional customers should get in touch with their account manager

[Covid-19 shipping restrictions](#) & [severe weather in the US](#) may cause delays

The final prices may differ from the prices shown due to specifics of VAT rules

[FAQ Policy](#)

Services for this Book

[Download Product Flyer](#)

[Facebook](#)

[Twitter](#)

[LinkedIn](#)

[Google++](#)

Recommended for you

[previous](#)

[Editorial Policies](#)

[Rights & Permissions](#)

[Societies & Publishing Partners](#)

[Subscription Agencies \(Springer Nature\)](#)

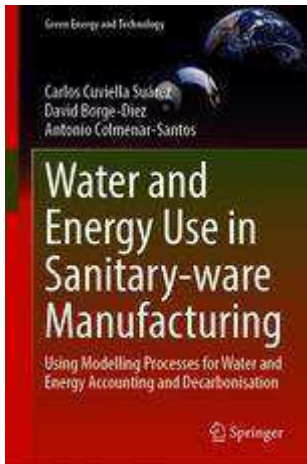
[Help & Contact](#)

[Springer Shop](#)

[About us](#)

[Energy Energy Efficiency](#)

[Green Energy and Technology](#)



© 2022

Water and Energy Use in Sanitary-ware Manufacturing

Using Modelling Processes for Water and Energy Accounting and Decarbonisation

Authors: **Cuvieila Suárez**, Carlos, **Borge-Diez**, David, **Colmenar-Santos**, Antonio

Analyzes energy and water consumption in the ceramic sanitary-ware industry

Presents modeling techniques to reduce energy consumption

Showcases practical implementations of the proposed modeling configurations

[see more benefits](#)

Buy this book

eBook

ISBN 978-3-030-72491-7

Digitally watermarked, DRM-free

Included format:

ebooks can be used on all reading devices

Hardcover

ca. 135,19 €

price for Spain (gross)

Due: September 11, 2021

ISBN 978-3-030-72490-0

Free shipping for individuals worldwide

Institutional customers should get in touch with their account manager

[Covid-19 shipping restrictions](#) & [severe weather in the US](#) may cause delays

The final prices may differ from the prices shown due to specifics of VAT rules

[FAQ Policy](#)

[About this book](#)

[About the authors](#)

[About this book](#)

This book analyses and quantifies how and where energy and water are consumed by the ceramic sanitary-ware industry and provides solutions as to how to reduce this. The whole production process is mapped, including modelling methods.

The book begins by providing an introduction to ceramic sanitary-ware production and types of factories casting technology. It then moves on to discuss the process and energy modelling for the production line, analysis of energy and water consumptions and proposals for improvements. The last chapter presents the practical implementation of the selected modelling configuration.

This book is of particular interest to water and energy management professionals within the ceramic industry, but the methods are of interest to those in other production industries as well.

[Show all](#)

[About the authors](#)

Buy this book

eBook

ISBN 978-3-030-72491-7

Digitally watermarked, DRM-free

Included format:

ebooks can be used on all reading devices

Hardcover

ca. 135,19 €

price for Spain (gross)

Due: September 11, 2021

ISBN 978-3-030-72490-0

Free shipping for individuals worldwide

Institutional customers should get in touch with their account manager

[Covid-19 shipping restrictions](#) & [severe weather in the US](#) may cause delays

The final prices may differ from the prices shown due to specifics of VAT rules

[FAQ Policy](#)

Services for this Book

[Download Product Flyer](#)

[Facebook](#)

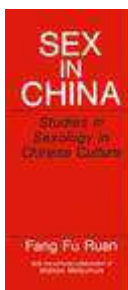
[Twitter](#)

[LinkedIn](#)

[Google++](#)



Recommended for you

[previous](#)



[Sex in China](#)

[Fang Fu Ruan \(1991\)](#)

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 229 de 231

ANEXO XXIV: “Aplicación práctica de medidas de reducción de consumos en la industria de productos sanitarios cerámicos” COPIA DEL DOCUMENTO

	TECNICAS DE AHORRO DE ENERGIA EN LAS FABRICAS DE SANITARIO	Enero 2019
		CF-0.5M-P-02
		Rev. 02

1. INTRODUCCION

Se analizan en este análisis las posibilidades calculadas de ahorro eléctrico, térmico y agua en una fábrica genérica de porcelana mono producto de inodoros considerada con los siguientes parámetros:

PARAMETROS PRODUCCION		
Días laborables=	232	días/año
Días horno=	300	días/año
Turnos=	1	turnos/día
Horas/turno=	8	h/turno
Peso medio pieza=	20	kg
Producción=	500,000	pcs/año
Rendimiento global=	80.0%	
Rendimiento colado=	95.0%	
Rendimiento horno=	84.2%	
Precio electricidad=	0.10	€/kWh
Precio gas=	0.03	€/kWh
Precio agua=	2.00	€/m ³

Mediante análisis de potencias y horas de funcionamiento se han elaborado las tablas de consumos según anexos 1 a 5. Los resultados se han contrastado con los consumos reales de una fábrica similar (Settat 2) para ver la posible desviación derivada de las hipótesis en la estimación. La comparación de datos ha resultado como sigue:

	ELECTRICIDAD kWh/año	GAS kWh/año	AIRE COMPRIMIDO kWh/año	AGUA m ³ /año
Estimación analítica=	7,277,798	35,037,776	498,851	30,838
Datos Settat 2 ^(*) =	6,371,404	39,772,230	2,547,046	15,157

(*) Valores 2017. Sin considerar agua de ósmosis ni de fórmulas

Se aprecia gran desviación entre la estimación y el consumo de agua y aire comprimido. Respecto al agua hay que puntualizar que en Settat 2 no hay preparación de pastas ni de esmalte ni de yeso. Tampoco hay planta de ósmosis.

La desviación de aire comprimido puede reflejar un gran error en la hipótesis de estimación o alternativamente, un excesivo consumo de aire comprimido. Esta sería una interesante auditoría a realizar para evaluar la eficiencia del sistema.

En las tablas de los anexos se presenta el análisis de consumos en cada elemento de la fábrica. En estas tablas se pueden identificar los elementos más representativos de la fábrica sobre los que se puede actuar con acciones correctivas para reducir sus consumos individuales.

De ellas se puede extraer información sobre los procesos o secciones de la producción donde se concentran los mayores consumos.

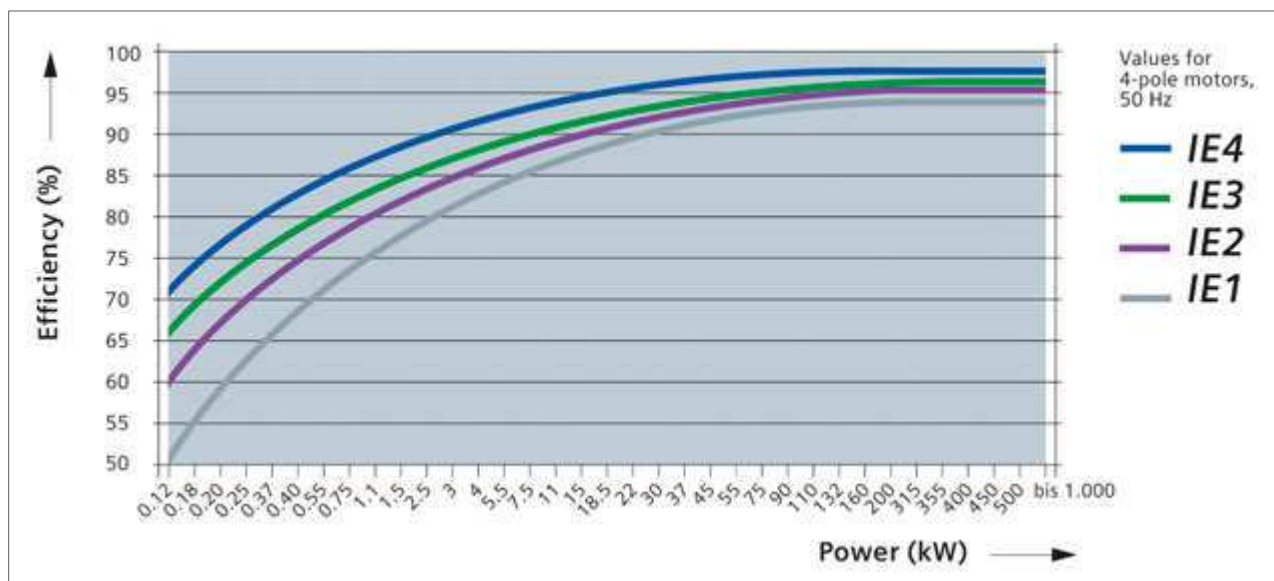
Los consumos agregados por secciones en la fábrica se presentan en la siguiente tabla:

CONSUMOS Nº Piezas	COLADO MOLDES YESO 500,000 pcs/año			
	ELECTRICIDAD	GAS	AIRE COMPRESIDO	AGUA
	kWh/año	kWh/año	kWh/año	m3/año
PRIMERAS MATERIAS	429,664		40,174	46
PREPARACION PASTA	916,493		41,983	5,108
PREPARACION ESMALTES	345,866		76,970	671
MODELERIA Y MOLDES	547,520	2,004,480	37,670	2,141
COLADO	1,625,856		157,076	6,714
ACONDICIONAMIENTO COLADO	182,074	3,118,080	1,810	
SECADO	551,232	3,340,800	6,515	
ESMALTERIA	202,304		83,243	464
HORNOS	916,800	25,734,000	22,074	
CONTROL FINAL	82,800	240,000	24,882	46
OFICINAS	112,288		0	110
ALMACEN	28,304		0	58
SERVICIOS	1,336,598	600,416	6,454	15,480
TOTAL ENERGIA=	7,277,798	35,037,776	498,851	30,838

Se han analizado las acciones de mejora desde una perspectiva individualizada para cada tipo de consumo aplicables sólo a determinados consumidores o tipos de consumidores. No obstante, hay acciones que son globales y se pueden realizar en cualquier sección y elemento de la fábrica entre las cuales estarían las acciones de mejora de consumo eléctrico sobre:

1.1. La eficiencia de motores

La diferencia de rendimiento en dos motores de las mismas características con eficiencias normalizadas IE2 e IE3 puede llegar a ser de 3% en los tamaños de motores habituales como puede verse en la gráfica siguiente:



De acuerdo a esta diferencia y su influencia en el consumo total anual, puede calcularse el retorno simple de las inversiones correspondientes:

La potencia del motor IE3 con mejor rendimiento ha de ser menor que la del IE2 en la relación:

$$P = P_{IE2} \cdot \eta_{IE2} = P_{IE3} \cdot \eta_{IE3}$$

Con lo que la disminución de consumo será:

$$\Delta P = P_{IE2} - P_{IE3} = P_{IE2} \cdot \left(1 - \frac{\eta_{IE2}}{\eta_{IE3}}\right)$$

Y el ahorro anual

$$A = \Delta P \cdot N_h \cdot p_{el}$$

$$I = N_m \cdot (c_{IE3} - c_{IE2})$$

$$r_s = \frac{I}{A}$$

Con

- P_{IE2} : Potencia motor IE2
- P_{IE3} : Potencia motor IE3
- η_{IE2} : Rendimiento motor IE2
- η_{IE3} : Rendimiento motor IE3
- ΔP : Disminución de potencia
- A : Ahorro anual
- N_h : Número de horas anuales
- p_{el} : Precio electricidad
- N_m : Número de motores
- c_{IE2} : Coste motor IE2
- c_{IE3} : Coste motor IE3
- I : Inversión. La inversión considerada es la diferencia de coste de un motor y otro.
- r_s : Retorno simple

Asumiendo incrementos de precio entre 8 y 15 % del IE3 respecto al IE2 (Tarifa ABB), los resultados se pueden ver en el anexo VI cuyo resumen se presenta en la tabla siguiente:

Ahorro eléctrico por eficiencia motores		Inversión	Ahorro	r_s
INSTALACION		€	€/año	años
DB01	PRIMERAS MATERIAS	2,905	932	3.12
DB02	PREPARACION PASTA	4,680	1,976	2.37
DB03	PREPARACION ESMALTES	2,848	699	4.07
DB04	MODELERIA Y MOLDES	3,007	1,541	1.95
DB05	COLADO	35,640	7,161	4.98
DB06	ACONDICIONAMIENTO COLADO	1,218	320	3.81
DB07	SECADO	780	2,882	0.27
DB08	ESMALTERIA	2,512	486	5.17
DB09	HORNOS	3,038	1,491	2.04
DB10	CONTROL FINAL	1,679	336	4.99
DB11	OFICINAS	1,380	97	14.21
DB12	ALMACEN	0	0	
DB13	SERVICIOS	7,602	1,959	3.88
TOTAL EFICIENCIA MOTOR		67,289	19,879	3.38

1.2. La variación de frecuencia en motores.

En los motores con par constante a velocidad constante (molinos...), se puede obtener una disminución de potencia o energía directamente proporcional a la disminución de velocidad o frecuencia del mismo. Del mismo modo cuando el par resistente es de función cuadrática respecto a la velocidad (ventiladores, bombas, agitadores...), la disminución de potencia es proporcional al cubo de la disminución de velocidad. Con estas premisas y cuando el proceso productivo lo permita se puede disminuir la frecuencia (velocidad) del motor y reducir así el consumo.

Momento resistente constante:

$$P_1 = M_r \cdot n_1 = cte \cdot n_1$$

$$P_2 = M_r \cdot n_2 = cte \cdot n_2$$

$$\Delta P = cte \cdot n_1 - cte \cdot n_2 = cte \cdot n_1 \cdot [1 - (1 - \Delta n)^1] = P_1 \cdot [1 - (1 - \Delta n)^1]$$

Momento resistente cuadrático respecto a n:

$$P_1 = M_r \cdot n_1 = cte \cdot n_1^3$$

$$P_2 = M_r \cdot n_2 = cte \cdot n_2^3$$

$$\Delta P = cte \cdot n_1^3 - cte \cdot n_2^3 = cte \cdot n_1 \cdot [1 - (1 - \Delta n)^3] = P_1 \cdot [1 - (1 - \Delta n)^3]$$

Entonces

$$A = \Delta P \cdot W_{año} \cdot p_{el}$$

$$I = N_v \cdot p_v$$

$$r_s = \frac{I}{A}$$

Con

- A : Ahorro anual
- M_r : Momento resistente
- P_1, P_2 : Potencias con y sin variador
- n_1, n_2 : Velocidades con y sin variador
- Δn : Disminución de velocidad porcentual
- $W_{año}$: Energía anual a la velocidad nominal
- p_{el} : Precio electricidad
- N_v : Número de variadores
- p_v : Precio de la implementación del variador en el cuadro eléctrico
- I : Inversión. La inversión considerada es la diferencia de coste del cuadro de mando con y sin variador de frecuencia.

	TECNICAS DE AHORRO DE ENERGIA EN LAS FABRICAS DE SANITARIO	Enero 2019
		CF-0.5M-P-02
		Rev. 02

- r_s : Retorno simple

Como ejemplo, con disminuciones de velocidad del 10% se obtienen los resultados mostrados en el anexo VII cuyo resumen se presenta en la tabla siguiente:

AHORRO POR VARIACION f		Inversion	Ahorro	r_s
INSTALACION		€	€/año	años
DB01	PRIMERAS MATERIAS	30,000	3,675	8.16
DB02	PREPARACION PASTA	64,670	24,520	2.64
DB03	PREPARACION ESMALTES	34,742	8,963	3.88
DB04	MODELERIA Y MOLDES	0	0	
DB05	COLADO	12,086	7,846	1.54
DB06	ACONDICIONAMIENTO COLADO	7,858	3,772	2.08
DB07	SECADO	52,530	14,938	3.52
DB08	ESMALTERIA	0	0	
DB09	HORNOS	36,555	24,390	1.50
DB10	CONTROL FINAL	0	0	
DB11	OFICINAS	5,000	905	5.52
DB12	ALMACEN	0	0	
DB13	SERVICIOS	113,380	36,555	3.10
TOTAL VARIACION FRECUENCIA		356,821	125,566	2.84

1.3. La sustitución de iluminación convencional por LED.

Considerando que la iluminación LED es más eficiente que la fluorescente o la de descarga, se ha calculado el ahorro de consumo eléctrico por diferencia de potencias en el periodo anual frente al incremento de precio en la inversión inicial de lámparas. Tanto el coste como el rendimiento específico para cada tipo de lámparas se encuentran en un rango variable (mayor para la luz LED), se ha definido unos parámetros en este estudio que en la siguiente tabla se muestran:

Características de alumbrados	FLUORESCENCIA		DESCARGA	
	η Lm/W	c €/W	η Lm/W	c €/W
Convencional	80	0.0612	120	0.124
LED	100	0.375	140	0.4333

El ahorro se calcula con la disminución de potencia del LED frente al alumbrado convencional y la inversión con el extra-coste del LED frente a la fluorescencia o descarga convencionales:

$$Luz = P_{con} \cdot \eta_{con} = P_{led} \cdot \eta_{led}$$

$$\Delta P = P_{con} - P_{led} = P_{con} \cdot \left(1 - \frac{\eta_{con}}{\eta_{led}}\right)$$

$$A = \Delta P \cdot N_h \cdot p_{el}$$

$$I = P_{led} \cdot c_{led} - P_{con} \cdot c_{con} = P_{con} \cdot \left(\frac{\eta_{con}}{\eta_{led}} \cdot c_{led} - c_{con}\right)$$

	TECNICAS DE AHORRO DE ENERGIA EN LAS FABRICAS DE SANITARIO	Enero 2019
		CF-0.5M-P-02
		Rev. 02

$$r_s = \frac{I}{A}$$

Con

- r_s : Retorno simple
- P_{n_1} : Potencia iluminación con alumbrado convencional
- P_{n_2} : Potencia iluminación con alumbrado LED
- N_h : Número horas
- p_{el} : Precio electricidad
- I : Inversión. La inversión considerada es la diferencia de precio de luminarias y lámparas

Los resultados e hipótesis de cálculo de ahorros e inversión se pueden ver en el Anexo VIII, cuyo resumen se presenta a continuación:

Ahorro por alumbrado LED	Inversión €	Ahorro €/yr	r_s años
PRIMERAS MATERIAS	626	179	3.50
PREPARACION PASTA	464	133	3.50
PREPARACION ESMALTES	664	218	3.05
MODELERIA Y MOLDES	3,318	1,088	3.05
COLADO	7,669	2,513	3.05
ACONDICIONAMIENTO COLADO	147	48	3.05
SECADO	1,475	483	3.05
ESMALTERIA	3,687	1,208	3.05
HORNOS	1,917	628	3.05
CONTROL FINAL	1,475	483	3.05
OFICINAS	737	242	3.05
ALMACEN	737	242	3.05
SERVICIOS	1,709	503	3.40
TOTAL ALUMBRADO LED=	24,626	7,968	3.09

1.4. La regulación y control de iluminación por presencia y nivel lumínico exterior

Con una adecuada regulación de la intensidad lumínica, puede reducirse el consumo cuando no hay presencia o cuando la iluminación diurna es suficiente para satisfacer las necesidades de iluminación. Para calcular la inversión se asume un extra-coste del 25% del coste de las lámparas y dos factores de ahorro referidos a la presencia por zona y a la iluminación diurna a través de lucernarios y ventanas. A tal efecto se calculará la energía durante el periodo anual como la energía de la potencia media de alumbrado afectada por estos dos factores.

$$C_{reg} = P \cdot N_h \cdot p_{el} \cdot (1 - f_{presencia}) \cdot (1 - f_{exterior})$$

$$A = C - C_{reg} = C \cdot [1 - (1 - f_{presencia}) \cdot (1 - f_{exterior})]$$

$$I = 0.25 \cdot P \cdot c_{esp}$$

	TECNICAS DE AHORRO DE ENERGIA EN LAS FABRICAS DE SANITARIO	Enero 2019
		CF-0.5M-P-02
		Rev. 02

$$r_s = \frac{I}{A} = \frac{0.25 \cdot P \cdot c_{esp}}{P \cdot N_h \cdot p_{el} \cdot [1 - (1 - f_{presencia}) \cdot (1 - f_{exterior})]}$$

Con

- C, C_{reg} : Coste anual sin y con regulación
- P : Potencia
- N_h : Número de horas anuales
- p_{el} : Precio electricidad
- C_{reg} : Coste anual con regulación
- $f_{presencia}$: factor de ahorro por presencia
- $f_{exterior}$: factor de ahorro por iluminación diurna
- c_{esp} : Coste específico de la instalación
- A : Ahorro
- I : Inversión
- r_s : Retorno simple

Los resultados estimados de ahorro obtenidos se presentan en el anexo IX cuyo resumen se presenta en la tabla siguiente:

AHORRO POR REGULACION LUMINICA			
NIVELES ILUMINACION	Inversión €	Ahorro €/yr	r_s años
PRIMERAS MATERIAS	261	85	3.07
PREPARACION PASTA	193	63	3.07
PREPARACION ESMALTES	220	83	2.66
MODELERIA Y MOLDES	1,099	413	2.66
COLADO	2,539	955	2.66
ACONDICIONAMIENTO COLADO	49	18	2.66
SECADO	488	184	2.66
ESMALTERIA	1,221	459	2.66
HORNOS	635	239	2.66
CONTROL FINAL	488	184	2.66
OFICINAS	244	92	2.66
ALMACEN	244	92	2.66
SERVICIOS	656	222	2.95
TOTAL REGULACION=	8,337	3,089	2.70

2. PRIMERAS MATERIAS

2.1. Molinos

Su potencia está generalmente en torno a los 75-100 kW y su tiempo de funcionamiento es elevado. Puede llegar a representar el 75-85% del consumo de la instalación. Las formas de reducir este consumo pueden ser:

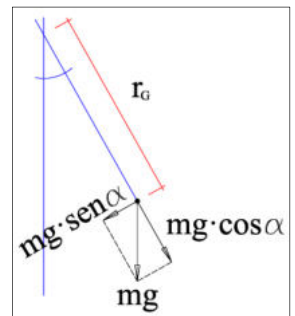
- 2.1.1. Substitución de motor de eficiencia estándar (IE1) por alta eficiencia (IE2 ó IE3). La inversión sería:

Molinos	P kW	Inversión €	Ahorro €/año	r _s años
Eficiencia	110	1,728	766	2.26

2.1.2. Con la aplicación de un variador de frecuencia se puede reducir la velocidad resultando una inversión:

Molinos	P kW	Inversión €	Ahorro €/año	r _s años
Variación f	110	30,000	3,675	8.16

2.1.3. Una racionalización de la carga del molino haciendo menos lotes con el 100% de carga (a veces no es posible, en función de las necesidades de producción) puede disminuir el tiempo de trabajo. Esta operación no tiene coste material tangible. La potencia del molino es proporcional a la distancia radial del centro de gravedad. Cuando el molino no se carga en su óptimo, el centro de gravedad baja y así sube el par resistente como se ve en la figura. La ecuación del par resistente será:



$$M_r = r_g \cdot mg \cdot \text{sen}\alpha$$

Como ejemplo, sea un molino de 2.800 mm de diámetro cuyo centro de gravedad tenga un r_g óptimo de 10 cm. Sea un defecto de carga tal que baje el centro de gravedad 1 cm. El r_g pasará a ser de 11 cm con lo que el par y en consecuencia la potencia y consumo se incrementaran un 10%.

2.1.4. Un adecuado mantenimiento de las partes mecánicas de la transmisión y el motor reduce las fricciones y el consumo. No se puede determinar este ahorro analíticamente, pero sí empíricamente con un analizador o pinza amperimétrica. El coste debe considerarse como el de mantenimiento preventivo y no como una inversión.

3. PREPARACIÓN DE PASTAS

3.1. Desleidores

Su potencia es similar a la de los molinos, por lo que rige todo lo dicho en el apartado correspondiente. Para una potencia de 125 kW resulta una inversión por eficiencia de motor de:

Desleidores	P kW	Inversión €	Ahorro €/año	r _s años
Eficiencia	125	2,122	580	3.66

Y una inversión por variador de frecuencia de:

	TECNICAS DE AHORRO DE ENERGIA EN LAS FABRICAS DE SANITARIO	Enero 2019
		CF-0.5M-P-02
		Rev. 02

Desleidores	P kW	Inversión €	Ahorro €/año	r _s años
Variación f	125	40,000	7,545	5.30

3.2. Tanques de stock

Las acciones son las mismas que en los molinos y desleidores, aunque la potencia suele estar en torno a los 15 kW. Las inversiones de eficiencia y variación frecuencia para esta potencia serían

Tanques	P kW	Inversión €	Ahorro €/año	r _s años
Eficiencia	15	1,547	1,271	1.22
Variación f		17,269	15,844	1.09

3.3. Bombas Breidel

Son potencias similares a las de los tanques, por lo que rige todo lo expuesto en el apartado anterior aunque los periodos de funcionamiento son diferentes y así lo serán los retornos.

Bombas (Bredel)	P kW	Inversión €	Ahorro €/año	r _s años
Eficiencia	15	663	91	7.30
Variación f		7,401	1,132	6.54

4. PREPARACIÓN DE ESMALTE

Los equipos son aproximadamente los mismos que en primeras materias y preparación de pastas aunque escalados inferiormente, por lo que aplica todo lo dicho en los apartados correspondientes. Los ahorros e inversiones desglosados correspondientes pueden verse en el Anexo I. En la siguiente tabla se muestra el resumen de los mismos:

PREPARACION ESMALTES	Inversión €	Ahorro €/año	r _s años
Eficiencia	2,848	699	4.07
Variación f	34,742	8,963	3.88

5. MODELERÍA-YESO

5.1. Secaderos de moldes

En esta sección el consumo predominante está en los secaderos de moldes, tanto eléctrica como térmicamente. Desde el punto de vista eléctrico, cabe aplicar los criterios expuestos en el apartado de molinos por ser de extensión a todos los motores eléctricos, aunque en equipos complejos con motores pequeños de actuación intermitente, la aplicación de variación de frecuencia no resulta relevante. No obstante siempre cabe el criterio del mantenimiento adecuado y la posibilidad de sustitución de nivel de eficiencia del motor, particularmente cuando éste se avería. El detalle de los ahorros eléctricos se puede ver en el Anexo I y en la siguiente tabla el resumen:

	TECNICAS DE AHORRO DE ENERGIA EN LAS FABRICAS DE SANITARIO	Enero 2019
		CF-0.5M-P-02
		Rev. 02

MODELERIA Y MOLDES	Inversión €	Ahorro €/año	r_s años
Eficiencia	3,007	1,541	1.95

En cuanto a la eficiencia térmica, ésta se puede mejorar con diferentes acciones. Un secadero de moldes tiene el fin principal de extraer por evaporación el agua del yeso. Este proceso es el que consume la mayor parte de la potencia térmica. No obstante hay otras potencias no necesarias sobre las que se puede actuar para disminuirlas. Para un secadero de 80 moldes con las condiciones de secado de la siguiente tabla:

Condiciones aire	T^a °C	HR %	e mbar	$x_{\text{saturation}}$ g/kg	X g/kg
Aire ambiente	22	55%	26.45	16.674	9.17
Aire secadero	60	75%	199.37	152.42	114.31

Se pueden calcular las potencias térmicas siguientes:

Potencias térmicas secadero de moldes	Q kW
Pérdidas por conducción	18.1
Calor para evaporar agua	95.7
Calor para calentar el aire de evaporación	13.3
TOTAL=	127

5.1.1. Un aumento en el aislamiento del secadero a fin de reducir las pérdidas por conducción. Dependiendo de la naturaleza y estado del aislamiento existente, la reducción de las pérdidas por conducción e infiltración puede llegar a suponer un 10% y el período de retorno puede estar en torno a los 1.5 años si el aislamiento original no es adecuado, pero a medida que esta calidad sea mejor, va creciendo el retorno de la inversión. El coeficiente global de transmisión térmica del panel de cerramiento del secadero es de $2.83 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{K}$. Bastaría doblar el espesor para bajar las pérdidas a la mitad (9kW), lo que supone un 7% de ahorro.

$$\text{El ahorro sería: } A = 3 \text{ secaderos} \cdot \frac{18.1}{2} \frac{\text{kW}}{\text{secadero}} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{día}} \cdot 232 \frac{\text{días}}{\text{año}} \cdot 0.03 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 4,535 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$\text{La inversión: } I = 132 \frac{\text{m}^2}{\text{secadero}} \cdot 3 \text{ secaderos} \cdot 40 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} = 15,840 \text{€}$$

$$\text{El retorno: } r_s = \frac{15,840 \text{€}}{4,535 \frac{\text{€}}{\text{año}}} = 3.5 \text{ años}$$

5.1.2. Una regulación higrotérmica del ambiente del mismo para minimizar la circulación de aire fresco hacia el interior del mismo. Con un adecuado estudio de la curva de secado, puede optimizarse el consumo reduciendo la circulación de aire hacia el interior de la cámara. El

	TECNICAS DE AHORRO DE ENERGIA EN LAS FABRICAS DE SANITARIO	Enero 2019
		CF-0.5M-P-02
		Rev. 02

ahorro derivado de esta acción puede ser importante dependiendo del ciclo de trabajo actual. Si la regulación no está bien calibrada los periodos de retorno son notablemente cortos y los ahorros pueden llegar a ser de un 30% cuando hay mucho desajuste en la ventilación. En el secadero del modelo, el caudal másico de aire de evaporación es de 1,264 kg/h. Si el ventilador trabaja en un punto de funcionamiento con menor presión en impulsión su caudal aumenta. En consecuencia hay que calentar un exceso de aire innecesario. Un factor 2 de sobre-ventilación trae en consecuencia un 10% extra de potencia calentamiento (la potencia de calentar aire se incrementa 13.3 kW sobre los 127 kW nominales). Otra circunstancia que puede darse es que la carga en el secadero sea menor de la nominal. Si no hay regulación higrotérmica y de velocidad del ventilador no se puede ajustar su caudal a la necesidad, por lo que habrá también exceso de potencia de calentamiento. En este caso la inversión sería:

El ahorro sería:
$$A = 10\% \cdot 2,004,480 \frac{kWh}{año} \cdot \frac{0.03 \text{ €}}{kWh} = 6,013 \frac{\text{€}}{año}$$

La inversión:
$$I \approx 20.000\text{€}$$

El retorno:
$$r_s = \frac{20.000 \text{ €}}{6,013 \frac{\text{€}}{año}} = 3.3 \text{ años}$$

5.1.3. La más inmediata es la recuperación térmica de calores residuales de horno como ya se hace en algunas fábricas. Esta acción puede llegar a eliminar el consumo total de los secaderos en función del resto de equipos térmicos que se quiera añadir a la red de calor recuperado. Considerando que una red de distribución de aires recuperados de horno podría costar 0.75 M€ y considerando que esta red daría servicio a los secaderos y a las centrales, se ha hecho un reparto proporcional del calor recuperado disponible del horno en los 3 procesos:

RECEPTORES DE CALOR RECUPERADO	Calor kW	Energía kWh/año	Ahorro €/año
Secaderos de moldes	360	2,004,480	60,134
Centrales acondicionamiento	560	3,118,080	93,542
Secaderos de piezas	600	3,340,800	100,224
Calderas	105	581,856	17,456
TOTAL=			
	1,625	9,045,216	271,356

Con estos valores proporcionalmente aplicados a la inversión de la red, la inversión imputable a los secaderos resultaría:

$$750.000\text{€} \cdot \frac{60,134 \frac{\text{€}}{\text{año}}}{271,356 \frac{\text{€}}{\text{año}}} = 166,204\text{€}$$

Y el retorno

$$r_s = \frac{166,204\text{€}}{60,134 \frac{\text{€}}{\text{año}}} = 2.76 \text{ años}$$

6. COLADO

6.1. Bancos de colar

El consumo eléctrico en los bancos es representativo aunque muy fraccionado. El valor agregado resulta de la suma de múltiples motores pequeños y alumbrado. Cabe estudiar el conjunto de bancos de la sala para optimizar los consumos unitarios y/o colectivos. El ahorro eléctrico de motores para un banco se muestra en la siguiente tabla:

Bancos	P kW	Inversión €	Ahorro €/año	r_s años
Eficiencia	0.5	34,800	6,682	5.21

6.1.1. Transformador para manipuladores

Normalmente se dota cada línea con un transformador para alimentar los manipuladores. Un transformador mayor reduciría las pérdidas de cada uno individual. Esta solución no resulta económicamente viable en una instalación existente por la poca reducción frente al coste elevado, pero en una instalación nueva hay que comparar el precio de 15 transformadores para dos moldeadores de 3.5 kVA (1 por cada par de bancos) contra el de 1 transformador de $30 \cdot 3.5 \text{ kVA} = 105 \text{ kVA}$. El ahorro esperable es por diferencia de pérdidas en vacío que puede estar en torno a un 1%.

El ahorro sería:

$$A = 1\% \cdot 15 \text{ trafos} \cdot \frac{3.5 \text{ kVA}}{\text{trafo}} \cdot \frac{8 \text{ h}}{\text{día}} \cdot \frac{232 \text{ día}}{\text{año}} \cdot \frac{0.1 \text{ €}}{\text{kVA}} = 97.44 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

La inversión:

$$I = \text{Precio 1 trafo 105 kVA} - \text{Precio 15 trafos de 7 kVA} = 10,000\text{€} - 15 \cdot 1,000\text{€} = -5,000\text{€}$$

En esta inversión el ahorro es despreciable, pero el precio del transformador único es menor que el de 15 transformadores pequeños. Desde el punto de vista energético sería ligeramente más interesante el transformador único, pero las desventajas son que ante una avería se pararía la totalidad de la producción y que al precio del transformador hay que añadir el de la red de suministro de los 30 bancos desde el transformador único. Por todo esto, esta inversión no es aconsejable

6.1.2. Ventiladores de secado de molde

Cada posición de banco suele estar dotada de un ventilador centrífugo para secar el molde. Este ventilador trabaja de forma continuada. Su consumo conjunto es elevado por el número de unidades

que hay aunque cada uno representa menos de 1 kW. Una gestión automática de su funcionamiento podría reducir el consumo. Para esto debe realizarse un estudio previo que determine los tiempos de funcionamiento necesarios del mismo. Un ciclo intermitente de trabajo o una reducción de las horas de funcionamiento puede reducir el consumo notablemente. Suponiendo que de las 16 horas de secado se pueda reducir el funcionamiento de los ventiladores un 50% el retorno de la inversión en una sala con 30 bancos, podría llegar a 1 ó 2 años.

El ahorro sería:
$$A = 50\% \cdot \frac{0.125 \text{ kW}}{\text{vent}} \cdot 40 \frac{\text{vent}}{\text{banco}} \cdot 30 \text{ bancos} \cdot \frac{16 \text{ h}}{\text{dia}} \cdot \frac{232 \text{ dias}}{\text{año}} \cdot \frac{0.1 \text{ €}}{\text{kWh}} = 27,840 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

La inversión:
$$I \approx 20.000 \text{ €}$$

El retorno:
$$r_s = \frac{20.000 \text{ €}}{27,840 \frac{\text{€}}{\text{año}}} = 0.72 \text{ años}$$

Esta es sin duda una interesante inversión, pero requiere establecer empíricamente el factor de parada de ventiladores y el modo de funcionamiento de los mismos sin comprometer el secado de los moldes.

6.1.3. Líneas de alumbrado local

Cada banco suele estar dotado de una línea continua fluorescente. Aquí cabe la sustitución de fluorescencia por LED, cuya amortización estaría en torno a los 6 años. No obstante y debido a la depreciación de la fluorescencia, la sustitución de tubos obsoletos debería hacerse con LED como de hecho ya se hace en la mayoría de las fábricas.

De acuerdo al Anexo VIII el ahorro sería de 2,513 €/año, la inversión de 7,669 € y el retorno correspondiente de 3.05 años.

6.2. Máquinas de presión

En una fábrica de moldes de yeso no es aplicable.

6.3. Tanques de alimentación de pasta

Es de aplicación todo lo expuesto en el apartado de tanques de preparación de pastas en el punto 3.2.

Tanques	P kW	Inversión €	Ahorro €/año	r _s años
Eficiencia	25	564	447	1.26
Variación f		7,858	7,545	1.04

7. ACONDICIONAMIENTO DE COLADO

7.1. Centrales de acondicionamiento

	TECNICAS DE AHORRO DE ENERGIA EN LAS FABRICAS DE SANITARIO	Enero 2019
		CF-0.5M-P-02
		Rev. 02

El consumo eléctrico en la calefacción de las salas proviene casi exclusivamente de los ventiladores, tanto de impulsión y recirculación, como de extracción, y dado su tamaño de hasta 25 kW (2 por central), cabe todo lo expuesto en los apartados de grandes motores.

Centrales acondicionamiento	P kW	Inversión €	Ahorro €/año	r_s años
Eficiencia	25	564	223	2.53
Variación f		7,858	3,772	2.08

En cuanto al consumo térmico se puede buscar su reducción de diferentes formas:

7.1.1. Mediante recuperación de aire caliente del horno de la misma forma que en los secaderos de moldes. La inversión imputable a las centrales resultaría:

$$750.000€ \cdot \frac{93,542 \frac{€}{año}}{271,356 \frac{€}{año}} = 258,540€$$

Y el retorno

$$r_s = \frac{258,540€}{93,542 \frac{€}{año}} = 2.76 \text{ años}$$

7.1.2. Como en el caso de los secaderos, una regulación higrotérmica adecuada puede reducir las necesidades térmicas por la disminución de circulación de aire fresco. La curva de carga del ciclo debe ser estudiada para el óptimo secado de piezas y moldes que en definitiva es el objetivo de la calefacción. La impulsión, recirculación, calefacción y extracción de aire deben estar íntimamente ligadas entre sí y de acuerdo a una curva de carga adaptada a las necesidades específicas de la sala a calentar. Cuando esta regulación no existe y el dimensionamiento de la ventilación no es adecuado puede ocurrir que haya exceso de ventilación y por tanto de consumo térmico. Es preciso realizar un balance energético real para calcular la posible reducción de consumo. El reparto de energía en la sala de colado se puede ver a continuación según cálculo de las necesidades térmicas en la misma.

	TECNICAS DE AHORRO DE ENERGIA EN LAS FABRICAS DE SANITARIO	Enero 2019
		CF-0.5M-P-02
		Rev. 02

NECESIDADES TERMICAS ACONDICIONAMIENTO	kW	%
Perdidas por la cubierta	73	13.27%
Pérdidas por el muro de hormigón	24	4.46%
Pérdidas por la chapa de fachada	18	3.22%
Pérdidas por el suelo	14	2.51%
Calor para evaporar el agua de las piezas	293	53.64%
Calor para calentar el aire de evaporación	125	22.89%
Calor total	547	100%

Los parámetros de funcionamiento de la central son:

COLADO MOLDES YESO						
	t	Aire		P	m _{aire}	m _{agua}
	h	°C	RH(%)	kW	kg/h	kg/h
COLADO	10	25	75%	128	5,583	84
SECADO	14	40	50%	846	28,431	695
Media		34	60%	547	18,911	440

Por lo que el exceso de ventilación en colado respecto a secado si no hay una regulación de velocidad será

$$125kW \cdot \frac{(28,431 - 5,583)}{28,431} \cdot \frac{8 h}{dia} \cdot \frac{232 dias}{año} \cdot \frac{0.03€}{kWh} = 5,593 \frac{€}{año}$$

Este ahorro sería adicional al eléctrico conseguido por incorporación del variador de velocidad.

7.1.3. Un mejor aislamiento de la sala reduciría las pérdidas por conducción pudiendo ahorrar entre un 5 a un 10% que supondría de 3 a 4 años de retorno. En la tabla anterior se ha visto que el total de pérdidas por envolvente es de 129 kW. Estos valores de pérdidas se han calculado con un coeficiente global de transmisión térmica “U” de 0.52 w/m²·K y una superficie de 12,744 m². Una mejora del aislamiento doblando el panel en cubierta y paredes conseguiría reducir las pérdidas por envolvente a la mitad y la inversión consiguiente sería:

$$\text{Ahorro: } A = \frac{(73+24+18+14)}{2} kW \cdot 24 \frac{h}{dia} \cdot 232 \frac{dias}{año} \cdot 0.03 \frac{€}{kWh} = 10,774 \frac{€}{año}$$

$$\text{Inversión: } I = 7,701 m^2 \cdot 40 \frac{€}{m^2} = 308,040€$$

$$\text{Retorno: } r_s = \frac{308,040€}{10,774 \frac{€}{año}} = 28.6 años$$

Esta no es una buena inversión dada la calidad de cerramiento inicial y considerando que las pérdidas por conducción sólo representan un 23% del total del consumo

	TECNICAS DE AHORRO DE ENERGIA EN LAS FABRICAS DE SANITARIO	Enero 2019
		CF-0.5M-P-02
		Rev. 02

En un caso de cerramiento de mala calidad, sí que saldría un retorno interesante pues el ahorro sería mucho mayor.

8. SECADEROS DE PIEZAS

Por la similitud de funcionamiento, cabe decir lo mismo que para los secaderos de moldes como se describe en el apartado 5.1.

8.1. El detalle de los ahorros eléctricos sobre motores se puede ver en el Anexo I y en la siguiente tabla el resumen:

SECADO	Inversión €	Ahorro €/año	r_s años
Eficiencia	780	2,882	0.27
Variación f	52,530	14,938	3.52

Las condiciones de secado del secadero se presentan en la siguiente tabla:

ETAPA	tiempo h	evaporación kg/h	Aire evaporación		Q kW	
			kg/h	°C		
Calentamiento 1	2	171	7,432	37.78	75%	207
Calentamiento 2	3	160	4,710	50.00	50%	184
Calentamiento 3	2	274	2,588	75.00	30%	322
Calentamiento 4	3	229	828	90.00	20%	241
Enfriamiento 5	1	0	0	-	-	0

Las potencias térmicas resultantes se presentan en la siguiente tabla:

Potencias térmicas secadero piezas	Q(kW)
Calentamiento aire	26
Evaporación agua	149
Calentamiento piezas	18
Calentamiento carros	6
Perdidas por cerramientos	34
TOTAL=	234

8.2. Un aumento en el aislamiento del secadero a fin de reducir las pérdidas por conducción. Dependiendo de la naturaleza y estado del aislamiento existente, la reducción de las pérdidas por conducción e infiltración puede llegar a suponer un 10% y el período de retorno puede estar en torno a los 1.5 años si el aislamiento original no es adecuado, pero este retorno crece a medida que lo hace la calidad de aislamiento original. El coeficiente global de transmisión térmica del panel de cerramiento del secadero es de $2.83 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{K}$. Bastaría doblar el espesor para bajar las pérdidas a la mitad (17kW), lo que supone un 7.26% de ahorro.

$$\text{Ahorro: } A = 2 \text{ secaderos} \frac{34}{2} \frac{\text{kW}}{\text{secadero}} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{dia}} \cdot 232 \frac{\text{dias}}{\text{año}} \cdot 0.03 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 5,679 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$\text{Inversión: } I = 2 \text{ secaderos} \cdot 286 \text{ m}^2 \cdot 40 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} = 22,880 \text{€}$$

	TECNICAS DE AHORRO DE ENERGIA EN LAS FABRICAS DE SANITARIO	Enero 2019
		CF-0.5M-P-02
		Rev. 02

Retorno:
$$r_s = \frac{22,880\text{€}}{5,679\frac{\text{€}}{\text{año}}} = 4 \text{ años}$$

8.3. Al igual que en los secaderos de moldes, un desajuste del caudal de ventilación conlleva un exceso de potencia térmica. En este caso está incluso más justificada la variación de velocidad pues el caudal de ventilación es diferente en cada fase de secado. Para el secadero del modelo, los caudales de ventilación y los excesos se muestran en la siguiente tabla:

Fase	EXCESO DE CALOR AIRE EVAPORACION SECADERO PIEZAS			
	Nominal		Exceso	Q
	kg/h	m ³ /h	m ³ /h	kW
1	7,432	6,211	0	0
2	4,710	3,936	2,274	21
3	2,588	2,163	4,047	71
4	828	692	5,518	125

Con estos valores, el ahorro por sobre-ventilación sería:

$$\frac{(0 \cdot 2 + 21 \cdot 3 + 71 \cdot 2 + 125 \cdot 3)}{(2 + 3 + 2 + 3)} \text{ kW} \cdot \frac{10 \text{ h}}{\text{dia}} \cdot \frac{232 \text{ dias}}{\text{año}} \cdot \frac{0.03\text{€}}{\text{kWh}} = 4,037 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

8.4. El ahorro por recuperación de aire de horno supone todo el coste de gas del secadero cuya inversión resultaría:

Ahorro de gas de secaderos:
$$A = 3,340,800 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \cdot 0.03 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 100,224 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Inversión imputable a secaderos:
$$I = 750.000\text{€} \cdot \frac{100,224\frac{\text{€}}{\text{año}}}{271,356\frac{\text{€}}{\text{año}}} = 277,008\text{€}$$

El retorno
$$r_s = \frac{277,008\text{€}}{100,224\frac{\text{€}}{\text{año}}} = 2.76 \text{ años}$$

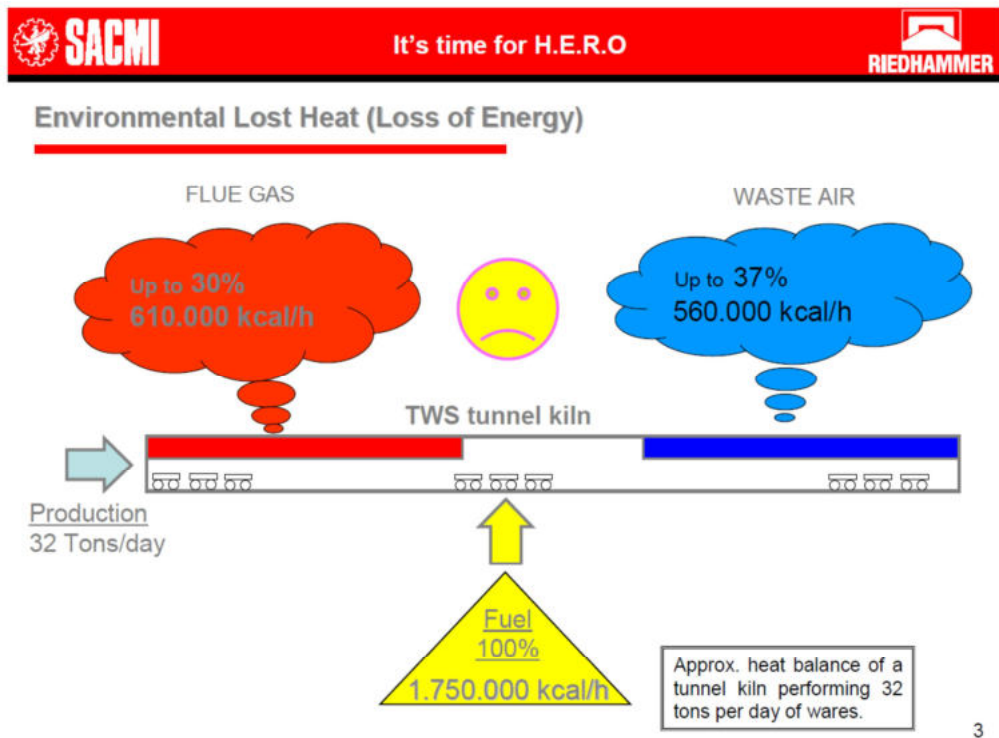
9. ESMALTADO

El consumo de la sección de esmaltado está concentrado en motores, bien en los carruseles o en líneas automáticas y movimentación, por lo que cabe decir todo lo expuesto en cuanto a motores, aumento de la eficiencia, y adecuado mantenimiento de los motores en sí mismos y de todas las transmisiones de la cadena cinemática del conjunto. Respecto a la variación de velocidad no se puede decir que haya margen de ahorro pues la misma está fijada en general por las restricciones de producción en cuanto a movimentación. Los ventiladores de extracción serían susceptibles de reducir la velocidad y caudal pero no es aconsejable por restricciones de prevención laboral. Por lo tanto sólo se consideran ahorros por eficiencia de motores que se muestran a continuación:

ESMALTERIA	P kW	Inversión €	Ahorro €/año	r _s años
Eficiencia	5	2,512	486	5.17
Alumbrado LED	13.02	3,687	1,208	3.05
Regulación lumínica		1,221	459	2.66

10. HORNOS

Los hornos son los responsables de hasta el 75% del consumo térmico, por lo que requieren atención especial, más aun considerando que, aproximadamente, entre el 60 y el 70% del calor generado en los hornos, se va a través de las tres chimeneas como muestra el gráfico siguiente de SACMI.



La siguiente tabla muestra los datos de salidas de humos y aires de SANITANA y SETTAT como hornos túnel estándar de referencia:

			Temperatura	caudal		Calor	
SANITANA			°C	kg/h	kg/s	kW	
SANITANA	HORNO 4	Chimenea humos	201	20,772	5.7701	1,162	
		Chimenea enfriamiento rápido	329	597	0.1658	55	
		Chimenea enfriamiento lento	269	4,779	1.3275	357	
	HORNO 5	Chimenea humos		Parado			
		Chimenea enfriamiento rápido					
		Chimenea enfriamiento lento					
	HORNO 6	Chimenea humos	151	36,215	10.0597	1,519	
		Chimenea enfriamiento rápido	376	2,131	0.5921	223	
		Chimenea enfriamiento lento	173	23,973	6.6591	1,154	
	HORNO 7	Chimenea humos	179	23,695	6.5819	1,178	
		Chimenea enfriamiento rápido	535	3,419	0.9497	508	
		Chimenea enfriamiento lento	70	12,586	3.4962	245	
	HORNO 9	Chimenea humos	138	17,652	4.9034	677	
		Chimenea enfriamiento rápido	380	238	0.0661	25	
		Chimenea enfriamiento lento	144	13,971	3.8807	558	
SETTAT							
SETTAT	HORNO 1S1	Chimenea humos	192	11,431	3.1753	610	
		Chimenea enfriamiento rápido	340	1,725	0.4791	163	
		Chimenea enfriamiento lento	156	12,766	3.5461	551	
	HORNO 2S1	Chimenea humos	199	11,979	3.3276	662	
		Chimenea enfriamiento rápido	326	1,745	0.4847	158	
		Chimenea enfriamiento lento	213	10,213	2.8370	604	
	HORNO 1S2	Chimenea humos	190	19,003	5.2787	1,003	
		Chimenea enfriamiento rápido	460	662	0.1839	85	
		Chimenea enfriamiento lento	130	18,303	5.0843	661	
	CALOR RECUPERADO			°C	kg/h	kg/s	kW
	MEDIA SANITANA- SETTAT	Chimenea humos	179	20,107	5.5852	998	
		Chimenea enfriamiento rápido	392	1,502	0.4173	164	
Chimenea enfriamiento lento		165	13,799	3.8330	632		
TOTAL=			182	35,408	9.8356	1,794	

Los hornos de cocción de primer fuego tienen un consumo medio de 1200 kCal/kg, que para los parámetros de funcionamiento del presente estudio suponen:

$$1,200 \frac{kCal}{kg} \cdot 4.18 \frac{kJ}{kCal} \cdot \frac{500,000 \text{ piezas}}{\text{año}} \cdot \frac{1 \text{ año}}{300 \text{ dias}} \cdot \frac{1 \text{ dia}}{24 \text{ h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3,600 \text{ s}} = 1,935 \text{ kW}$$

El horno de Settatt 2 concretamente tiene 76 quemadores de entre 40, 90 y 140 kW en 8 grupos diferentes de regulación con una potencia nominal total de 2,150 kW. De la tabla se desprende que este horno devuelve 1,749 kW por las tres chimeneas de aire y humos residuales que pueden ser aprovechados dando servicio a secaderos y centrales de acondicionamiento. Es importante puntualizar que este calor está referido a condiciones normales de presión y temperatura, por lo que no es totalmente aprovechable y, a una presión y temperatura de utilización (P,T) sólo se podrían aprovechar:

$$1,794 \text{ kW} \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T + T_0}$$

Considerando que la presión en todo el entorno del horno se puede aproximar a una atmósfera y que la temperatura de utilización de los aires se reduzca hasta 100 °C, sólo serían utilizables:

$$1,794 \text{ kW} \cdot \frac{1}{1} \cdot \frac{273}{100 + 273} = 1,313 \text{ kW}$$

	TECNICAS DE AHORRO DE ENERGIA EN LAS FABRICAS DE SANITARIO	Enero 2019
		CF-0.5M-P-02
		Rev. 02

En Settat 2, por ejemplo, esta inversión se llevó a cabo entre 2009 y 2010 con un valor de 625 k€ y un calor recuperado en dos secaderos de piezas y una central de acondicionamiento de 914 kW con un retorno de 2.07 años.

Se ha hecho aquí mención de esta acción aunque no es de ahorro de consumo en el horno. No obstante es una medida directamente ligada al consumo del horno y su forma de operación. Entre las medidas específicas para reducir el consumo del horno se pueden mencionar:

10.1. Precalentamiento del aire de combustión

El calor residual de los enfriamientos puede aprovecharse para precalentar el aire de combustión y reducir la cantidad de gas proporcionalmente al aumento de entalpía del aire de mezcla. Esto puede hacerse en dos escalones que pueden ser independientes, utilizando el aire de enfriamiento lento, de gran caudal y relativa baja temperatura (entre 100 y 200 °C) y utilizando el aire de enfriamiento rápido de bajo caudal y alta temperatura (del orden de 400°C). Estas medidas proporcionan un ahorro teórico de hasta el 12% de consumo y el retorno simple puede estar en los 5 años. Para el horno estándar de 2 MW de potencia, se necesitan:

$$\dot{m}_g = \frac{2MW}{48,000 \frac{kJ}{kg}} = 0.042 \frac{kg}{s}$$

De gas natural. La combustión estequiométrica de este gas necesita:

$$0.0448 \frac{kg_{CH_4}}{s} \cdot 17.17 \frac{\frac{kg_{aire}}{s}}{\frac{kg_{CH_4}}{s}} = 0.7691 \frac{kg_{aire}}{s}$$

Con los valores medios de aires recuperados se puede precalentar este aire de combustión hasta 295 °C como se ve en la tabla siguiente:

Aire combustión pre-calentado	m_{aire} kg/s	T °C	Q kW
De chimenea combustion	0.3517	179	52
De enfriamiento rápido	0.4173	392	151
TOTAL=	0.7691	295	203

Este pre-calentamiento ahorra la potencia de gas natural necesaria para calentar el aire desde temperatura ambiente de la sala hasta esos 295°C, que se puede aproximar por:

$$0.7211 \frac{kg_{aire}}{s} \cdot 1 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot (295 - 30)K = 203 kW$$

Esta inversión para un horno nuevo supondría menos de 50,000€ y el ahorro sería de

$$203 kW \cdot 24 \frac{h}{día} \cdot 300 \frac{días}{año} \cdot 0.03 \frac{€}{kWh} = 43,848 \frac{€}{año}$$

lo que significa un retorno de 1.14 años. Cuando el horno no es nuevo la inversión es mayor dependiendo de cuántas partes hay que cambiar en la alimentación del aire de combustión.

El aire de techo que se inyecta en los primeros 9 módulos del horno también es susceptible de ser precalentado desde la temperatura de aspiración hasta la temperatura del aire recuperado que es de 295 °C.

	m_{aire} kg/s	T °C	Q kW
Aire techo precalentado	0.3120	295	83

La potencia que se ahorraría con esta acción sería:

$$0.312 \frac{kg}{s} \cdot 1 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot (295 - 30)K = 83 kW$$

La inversión para un horno nuevo sería aproximadamente de 25.000 € y el ahorro de

$$83 kW \cdot 24 \frac{h}{día} \cdot 300 \frac{días}{año} \cdot 0.03 \frac{€}{kWh} = 17,928 \frac{€}{año}$$

que daría un retorno de 1.4 años. Hay que puntualizar que en un horno existente, la modificación puede suponer una inversión notablemente superior.

Análogamente al horno túnel, esta solución se puede adaptar al horno intermitente. En el anexo XI se muestra una curva de un horno intermitente estándar con la distribución de potencias térmicas tanto en la fase de calentamiento como en la de enfriamiento cuando. La potencia térmica media durante la etapa de calentamiento que tiene una duración de 535 minutos es de 1,709 kW distribuidos según la siguiente tabla:

POTENCIA TERMICAS H.I. DURANTE FASE CALENTAMIENTO	Q kW	m kg/s
Pérdidas por el suelo	49	-
Pérdidas por las paredes	268	-
Pérdidas por el techo	46	-
Calor aportado a las piezas	261	-
Calor aportado a soportes de piezas	214	-
Calor aportado a las vagonetas	189	-
PERDIDAS Y CARGAS=	1,026	
Aire de difusión	116	0.309
Aire de inyección	51	0.119
Aire de combustión	515	0.647
AIRES=	682	1.074
Gas natural	1,709	0.036

Si se utiliza el aire de chimenea para precalentar los aires de combustión, difusión e inyección, se pueden ahorrar los 682 kW correspondientes a los aires que entran a temperatura de sala y pasarían a entrar a temperatura de horno media que resulta de 653 °C. Asumiendo que el ciclo de recocido es diario, el ahorro correspondiente sería:

$$682 \text{ kW} \cdot 535 \frac{\text{min}}{\text{ciclo}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \cdot 300 \frac{\text{ciclos}}{\text{año}} \cdot 0.03 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 54,730 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Asumiendo que la inversión para un horno nuevo sea de 100.000€, el retorno resulta de 1.83 años.

Estas reducciones por precalentamiento de aire se han basado en la hipótesis de que el aire es extraído de las chimeneas, en las cuales la temperatura es menor que en el interior del horno por pérdidas en conductos y por mezclas con aire exterior (enfriamiento rápido) para proteger los conductos metálicos. Esto se debe a que en un horno existente sería difícil o imposible realizarlo de otro modo. Pero para un horno nuevo, lo lógico sería utilizar el aire a la temperatura real que tiene dentro del propio horno antes de alcanzar las chimeneas. De hecho, Riedhammer ya ha desarrollado un concepto de recuperación total de energía (Energy Mangement System para horno túnel REKO para horno intermitente) dentro del horno utilizando su calor residual de aires a temperaturas de hasta 700 °C para precalentar los aires de entrada. Mediante la combinación de diferentes técnicas de optimización:

- Quemadores pulsantes en la zona de precalentamiento con aire pre-calentado a 200 °C
- Aire pre-calentado a 400 °C (EMS-400-4.0) ó 700 °C (EMS-700-Cyber) en la zona de calentamiento.
- Sistema controlado de recuperación en la zona de enfriamiento rápido.
- Control electrónico de relación aire/gas
- Control de actuación combinada con los aires de enfriamiento

	TECNICAS DE AHORRO DE ENERGIA EN LAS FABRICAS DE SANITARIO	Enero 2019
		CF-0.5M-P-02
		Rev. 02

consigue reducir el consumo 48% en el caso de EMS-400, 56% en el caso del EMS-700 y 60% en el caso de quemadores recuperativos REKO en el horno intermitente.

Esta reducción de consumo se puede traducir en un ahorro de:

- $0.48 \cdot 2,000 \text{ kw} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{dia}} \cdot 300 \frac{\text{dia}}{\text{año}} \cdot 0.03 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 207,360 \frac{\text{€}}{\text{año}}$ para EMS-400
- $0.56 \cdot 2,000 \text{ kw} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{dia}} \cdot 300 \frac{\text{dia}}{\text{año}} \cdot 0.03 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 241,920 \frac{\text{€}}{\text{año}}$ para EMS-700
- $0.60 \cdot 1.709 \text{ kw} \cdot 535 \frac{\text{min}}{\text{ciclo}} \cdot \frac{1\text{h}}{60 \text{ min}} \cdot 300 \frac{\text{ciclos}}{\text{año}} \cdot 0.03 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 82,288 \frac{\text{€}}{\text{año}}$ para REKO

A falta de datos de precio para estos sistemas, se estima que los sistemas EMS tengan un coste aproximado de 400 k€ con lo que sus retornos son del orden de los 2 años. En el caso del horno intermitente la inversión podría estimarse en los 200 k€ y su retorno en 2.4 años.

El extremo conceptual de pre-calentar el aire de combustión es el quemador de ASTC TECNOLOGIA LTDA. (IMPROVED BURNING SYSTEM, registrado en la Oficina Europea de patentes con el nº 08700465.1. Este quemador utiliza aire de la propia cámara del horno en la misma zona de temperatura. Esto quiere decir que el aire se tomaría ya precalentado a una temperatura ligeramente inferior a la precisa para el proceso, por lo que el ahorro puede alcanzar el 40% desde un punto de vista matemáticamente analítico. En la práctica, este ahorro no es probable. Esta solución aún no está probada en el grupo. Es una posibilidad cierta desde un punto de vista físico químico, pero debería probarse su alcance real en un horno operativo y valorar problemas externos como pueden ser los de mantenimiento de los quemadores. Conceptualmente, esta tecnología es equivalente a la de los quemadores regenerativos aunque más simple en la aplicación. Los quemadores regenerativos son una alternativa cierta a estos quemadores experimentales, dado que ya están ampliamente extendidos en la industria de la combustión. Su principio de funcionamiento es sensiblemente diferente y en consecuencia la inversión resultaría superior. No obstante, hablando de ahorros “teóricos” de hasta el 40%, los periodos de retorno resultan especialmente atractivos. La oferta de ASTC para un horno túnel es de 325.000€ y el ahorro del 40% significa:

$$0.40 \cdot 2,000 \text{ kw} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{dia}} \cdot 300 \frac{\text{dia}}{\text{año}} \cdot 0.03 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 172,800 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Lo que produce un retorno de 1.9 años.

En el horno intermitente los quemadores son 18 de 230 kW cada uno por lo que se puede hacer una estimación orientativa de 150.000 € de inversión y un ahorro aproximadamente igual que en el caso de

	TECNICAS DE AHORRO DE ENERGIA EN LAS FABRICAS DE SANITARIO	Enero 2019
		CF-0.5M-P-02
		Rev. 02

REKO pues la temperatura media del ciclo de calentamiento del intermitente es de 653°C. Así pues, el retorno sería de:

$$r_s = \frac{150,000}{82,288} = 1.82 \text{ años}$$

10.2. Regulación adecuada

Parece trivial esta solución y en realidad lo es, pero lo cierto es que los hornos no se regulan con la frecuencia precisa, por lo que los tiros no son óptimos. Esto produce que los aires y humos se muevan dentro de la cámara del horno de forma inadecuada produciendo calentamientos de flujos de aire innecesarios. Esto sucede particularmente cuando el tiro del extractor de humos de combustión sube por encima de lo necesario arrastrando los aires de enfriamiento hacia la zona de combustión. Esta medida no debería tener más coste que los bonos de trabajo del equipo de mantenimiento preventivo. Pero aún en el caso de que haya que contratarlo su importe puede estimarse en 5,000€. En cambio un horno mal regulado puede estar moviendo un exceso de aire que significa un extra-coste de gas. Tómese por ejemplo un 10% de sobre-ventilación de enfriamiento rápido sobre el nominal. Esto supone un extra-coste de:

$$0.1 \cdot 0.08 \frac{kg}{s} \cdot 1 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot (1,141 - 30)K \cdot 24 \frac{h}{dia} \cdot 300 \frac{dia}{año} \cdot 0.03 \frac{€}{kWh} = 1,920 \frac{€}{año}$$

10.3. Carga del horno

Ésta es otra solución trivial, que todas las fábricas conocen, pero de la que no se aprovecha su total potencial. Una carga de horno adecuada es fundamental para optimizar el rendimiento del horno, pero esto se reduce conceptualmente a dos principios que en general no se observan:

- La carga ha de ser mayoritariamente de producto y no de refractario
- Los soportes deben ser del material menos denso y con menor capacidad calorífica posible, es decir, carburo de silicio mejor que cordierita.

Una organización de la producción que permita agrupar productos de una forma compacta en la vagoneta permitiría reducir la cantidad de refractario. Este simple principio se desestima sometiéndose siempre a las necesidades de la demanda. Cabe pensar hasta qué punto de coste la producción ha de someterse a la demanda para llegar a un umbral en el que el óptimo económico priorice los lotes de producción económicos sobre los de demanda. En la tabla siguiente se presentan las densidades de carga y las eficiencias habituales de garantía de Riedhammer:

	TECNICAS DE AHORRO DE ENERGIA EN LAS FABRICAS DE SANITARIO	Enero 2019
		CF-0.5M-P-02
		Rev. 02

CARGA HORNO	Densidad	Eficiencia	
	kg/m ³	Kcal/kg	kWh/kg
Túnel	150	1,260	1.46
Intermitente	170	1,800	2.09

Por ejemplo, para un túnel que se cargue deficientemente, por ejemplo con 140 kg/m³ la eficiencia pasaría a:

$$1,260 \frac{kCal}{kg} \cdot \frac{150}{140} = 1,350 \frac{kCal}{kg}$$

lo que supone un 7 % de pérdida de eficiencia térmica.

La sustitución de cordierita por SiC genera una disminución de consumo térmico por la conjunción de diferentes factores. La densidad del SiC es mayor que la de la cordierita pero lo es en mayor grado su resistencia mecánica según se desprende de la siguiente tabla:

Refractario	Densidad	MOR	Ce	Coste
	kg/m ³	MPa	kJ/kg·K	€/kg
Cordierita	2.6	200	1.46	5
SiC	3.2	540	0.92	15

Con lo que el ahorro de material teórico se puede estimar como:

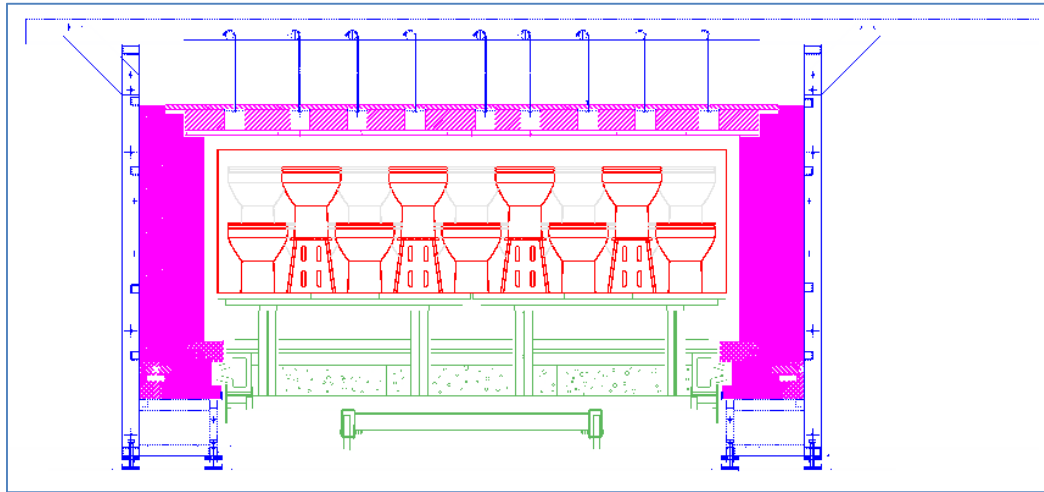
$$\frac{m_{SiC}}{m_{Cordierita}} = \frac{\sigma_{Cordierita}}{\sigma_{SiC}} \cdot \frac{\rho_{SiC}}{\rho_{Cordierita}} = \frac{200}{540} \cdot \frac{3.21}{2.6} = 0.46$$

Y como el calor específico es menor, la relación de consumos térmicos para los soportes resulta:

$$\frac{Q_{SiC}}{Q_{Cordierita}} = \frac{m_{SiC}}{m_{Cordierita}} \cdot \frac{C_{eSiC}}{C_{eCordierita}} = 0.46 \cdot \frac{0.92}{1.46} = 0.29$$

En una vagoneta de un túnel pueden considerarse 125 kg de soportes y placas de cordierita. Considerando que en una vagoneta de túnel vayan 18 piezas (Inodoros standard) según figura adjunta, el ahorro anual de superestructura de SiC vs. cordierita será:

$$\frac{0.5 \text{ Mpiezas}}{\text{año}} \cdot \frac{1 \text{ vagoneta}}{18 \text{ piezas}} \cdot 125 \frac{\text{kg}}{\text{vagoneta}} \cdot 1.46 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (1250 - 30) ^\circ\text{C} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3,600 \text{ s}} \cdot (1 - 0.29) \cdot \frac{0.03 \text{ €}}{\text{kWh}} = 36,668 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$



El número de vagonetas para operar el túnel es de aproximadamente 100. El precio de la cordierita se estima en 5 €/kg y el de SiC en 15 €/kg. Con estos valores, la inversión resulta:

$$100 \text{ vagonetas} \cdot \left(\frac{125 \text{ kg}_{cord} \cdot \frac{0.46 \text{ kg}_{sic}}{\text{kg}_{cord}} \cdot 15 \frac{\text{€}}{\text{kg}_{sic}}}{\text{vagoneta}} - \frac{125 \text{ kg}_{cord} \cdot 5 \frac{\text{€}}{\text{kg}_{cord}}}{\text{vagoneta}} \right) = 23,750\text{€}$$

El retorno resulta:

$$r_s = \frac{23,750\text{€}}{36,668 \frac{\text{€}}{\text{año}}} = 0.65 \text{ años}$$

Para el horno intermitente la masa de superestructura de cordierita en una vagoneta es de unos 450 kg y en cada ciclo hay dentro del horno 9 vagonetas. La cantidad anual de calor para superestructura de cordierita será:

$$\frac{300 \text{ ciclos}}{\text{año}} \cdot \frac{9 \text{ vagonetas}}{\text{ciclo}} \cdot 450 \frac{\text{kg}}{\text{vagoneta}} \cdot 1.46 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (1250 - 30)^\circ\text{C} \cdot \frac{1\text{h}}{3,600\text{s}} \cdot (1 - 0.29) \cdot \frac{0.03\text{€}}{\text{kWh}}$$

$$= 12,804 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

La inversión resulta:

$$2 \cdot 9 \text{ vagonetas} \cdot \left(\frac{450 \text{ kg}_{cord} \cdot \frac{0.46 \text{ kg}_{sic}}{\text{kg}_{cord}} \cdot 15 \frac{\text{€}}{\text{kg}_{sic}}}{\text{vagoneta}} - \frac{450 \text{ kg}_{cord} \cdot 5 \frac{\text{€}}{\text{kg}_{cord}}}{\text{vagoneta}} \right) = 15,390 \text{ €}$$

El retorno resulta:

	TECNICAS DE AHORRO DE ENERGIA EN LAS FABRICAS DE SANITARIO	Enero 2019
		CF-0.5M-P-02
		Rev. 02

$$r_s = \frac{15,390 \text{ €}}{12,804 \frac{\text{€}}{\text{año}}} = 1.2 \text{ años}$$

10.4. Catalizadores moleculares magnéticos para los quemadores de gas. Pueden reducir el consumo de gas hasta un 15% y sus retornos están en la línea del año. Estos catalizadores han de estar inmediatamente antes del quemador, por lo que procede instalar uno para cada quemador de hornos. En el punto 10 se veía que un horno de 2,150 kW tiene 76 quemadores con un consumo medio de 28 kw cada uno. El catalizador adecuado para esta potencia tiene un coste de 950€ que con instalación y puesta en marcha podrá suponer 1,500 €. El ahorro supuesto un 15% de reducción de consumo es:

$$0.15 \cdot 28kW \cdot 24 \frac{h}{\text{dia}} \cdot 300 \frac{\text{dia}}{\text{año}} \cdot 0.03 \frac{\text{€}}{kWh} = 907 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Y el retorno:

$$r_s = \frac{1,500\text{€}}{907 \frac{\text{€}}{\text{año}}} = 1.65 \text{ años}$$

Para el horno intermitente la potencia unitaria sería de:

$$Q_{\text{quemador}} = \frac{1,709 \text{ kW}}{18 \text{ quemadores}} = 95 \frac{\text{kW}}{\text{quemador}}$$

El precio del catalizador correspondiente es de 11,200 € que con la instalación puede redondearse a 12,000€.

El ahorro sería el 15 % del consumo, es decir:

$$0.15 \cdot 11,250,000 \frac{kWh}{\text{año}} \cdot 0.03 \frac{\text{€}}{kWh} = 50,625 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

El retorno resultante es:

$$r_s = \frac{12,000 \frac{\text{€}}{\text{quemador}} \cdot 18 \text{ quemadores}}{50,625 \frac{\text{€}}{\text{año}}} = 4.27 \text{ años}$$

10.5. Aumentar el aislamiento

Aunque conceptualmente un mejor aislamiento disminuye las pérdidas por conducción a través de las paredes que no llegan a representar el 10% del consumo y dada la dificultad de disponer un sobre-aislamiento en los paramentos de cierre del túnel debido a la cantidad de elementos auxiliares existentes, esta medida ni resulta práctica, ni económica.

	TECNICAS DE AHORRO DE ENERGIA EN LAS FABRICAS DE SANITARIO	Enero 2019
		CF-0.5M-P-02
		Rev. 02

11. CONTROL FINAL

El tipo de equipamientos en las líneas de control final es eléctricamente equivalente al de la sección de esmaltado, basado en múltiples pequeños motores de transmisión mecánica o de ventilación, por lo que rige lo expuesto en el apartado 9 cuya posibilidad de inversión sería:

CONTROL FINAL	P kW	Inversión €	Ahorro €/año	r _s años
Eficiencia	1	1,679	336	4.99
Alumbrado LED	5.21	1,475	483	3.05
Regulación lumínica		488	184	2.66

En cuanto al consumo térmico, sólo suele aparecer el horno de retractilar que por representar menos del 2% del consumo de la fábrica y por la dificultad de actuar sobre él no reviste potencial significativo de ahorro y si una gran dificultad de acometer alguna inversión de mejora, por lo que no procede tomar medidas de ahorro térmico en esta sección.

12. OFICINAS

En las oficinas, los consumos importantes están en el alumbrado como ya se ha explicado en el apartado 1 y la climatización cuyas inversiones se resumen en la tabla siguiente:

OFICINAS	P kW	Inversión €	Ahorro €/año	r _s años
Eficiencia	2	1,380	97	14.21
Variación f		5,000	905	5.52
Alumbrado LED	2.60	737	242	3.05
Regulación lumínica		244	92	2.66

13. ALMACEN

El consumo en el almacén es predominantemente de alumbrado cuyo resumen de inversión es:

ALMACEN	P kW	Inversión €	Ahorro €/año	r _s años
Alumbrado LED	2.6	737	242	3.05
Regulación lumínica		244	92	2.66

Según el caso, puede tener relevancia la carga de baterías.

Para la carga de las baterías no hay mucho que decir más allá del mantenimiento sistemático y preventivo de los cargadores y de las baterías que optimicen la carga y consumo de los mismos. Es importante el término DOD (Depth of discharge) en las baterías, pues la descarga completa perjudica la vida de las mismas. Es igual al 100% de la carga nominal de la batería menos la cantidad de carga que le queda a la misma cuando se pone a cargar de nuevo.

La vida de las baterías se puede ver en la tabla:

DOD %	Vida h
70	6,400
80	4,500
90	4,000

14. SERVICIOS

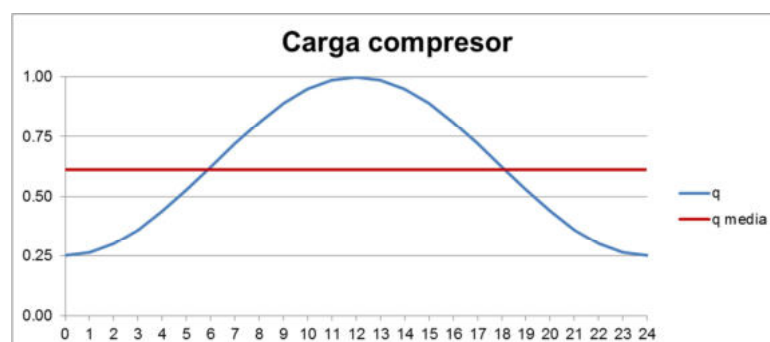
El consumo eléctrico de los servicios generales recae predominantemente sobre los compresores y en segundo lugar los sistemas de bombeo; incendios tratamiento aguas, etc.

Las medidas a adoptar en el caso de los compresores son ampliamente conocidas y extendidas por las diferentes fábricas. A continuación se presentan las de mayor impacto.

14.1. Variación de frecuencia

Dependiendo de la carga del compresor, la variación de frecuencia permite reducir el cubo de la potencia proporcionalmente a la reducción del régimen de operación. Cuando hay una red formada por diferentes compresores, lo que se impone es un sistema de gestión automático que los arranque de forma escalonada y trabaje con alguno de régimen variable para ajustar el nivel de carga. La valoración de esta inversión siempre es positiva si sólo hay que implantar el gestor electrónico. Cuando no existe compresor de régimen variable hay que estudiar el caso de sustitución de alguno de los fijos. En el caso de nueva instalación, la variación de frecuencia será tanto más aconsejable cuanto más variable sea el grado de carga (q) del compresor. En el caso de este estudio, el caudal medio de aire comprimido resulta de $2,168 \text{ Nm}^3/\text{h}$ y un nominal de $3,150 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Para satisfacer la necesidad máxima en cualquier momento lo habitual es seleccionar 2 compresores de 160 kW y $1,641 \text{ Nm}^3/\text{h}$ nominales.

Asumiendo que la carga de aire comprimido es variable y suponiendo que aumenta durante el turno de trabajo, hay que suponer una curva de funcionamiento cuyo grado de variabilidad determinará la conveniencia de dotar algún compresor de capacidad de variación de carga. Sea por ejemplo una curva de variación de aire comprimido de tipo senoidal como la presentada en la figura:



	TECNICAS DE AHORRO DE ENERGIA EN LAS FABRICAS DE SANITARIO	Enero 2019
		CF-0.5M-P-02
		Rev. 02

Durante las horas centrales del turno se presenta el máximo y durante las horas nocturnas el sistema trabajará en mínimos. Lo lógico en un caso como este sería equipar un compresor de régimen constante con el 25% de la potencia máxima necesaria y otro de régimen variable con el 75% de la potencia máxima o quizá 2 del 37.5% de potencia máxima.

La energía consumida por los compresores de régimen variable es aproximadamente la del área bajo la senoide, mientras que la de los de régimen variable sería aproximadamente la nominal. Ambas energías son aproximadas pues el sistema de trabajo de los compresores está determinado por el automatismo de control de presión en el circuito. El de régimen fijo trabaja todo/nada con unas potencias correspondientes del 100% y 50% nominal arrancando y parando en función del control de presión. En cambio, los de régimen variable regulan su potencia al nivel de tensión trabajando por debajo de la potencia nominal. Como la potencia es función del cubo de la velocidad, el resultado es que el consumo cae con la velocidad a razón del cubo. Por eso, el compresor variable trabaja más tiempo que el fijo, pero a menor régimen y el consumo final es menor ajustándose a la curva de carga. En el ejemplo la diferencia de energías es del 100% del fijo contra el 62.5% del variable. El ahorro correspondiente sería:

$$0.375 \cdot 712,704 \frac{kWh}{año} \cdot 0.1 \frac{€}{kWh} = 26,726 \frac{€}{año}$$

Estimando que un compresor de 160 kW fijo pueda costar 90.000€ y uno variable 130.000€, el retorno sería de 1.5 años para un solo compresor variable ó 3 años para los dos.

14.2. Recuperación térmica del calor de refrigeración

Esta posibilidad depende fuertemente de la ubicación y necesidades térmicas del destino del calor. Es decir, cuando sólo hay que conducirlo e impulsarlo, resulta interesante. Cuando hay que complicar el sistema con algún tipo de automatismo de control de temperatura y/o caudal, la inversión puede volverse negativa.

Cuando se comprime el aire en un compresor, su temperatura se incrementa de acuerdo a un proceso adiabático según:

$$P^{1-\gamma} \cdot (nRT)^\gamma = k$$

Si la presión final es de 8 bar, la temperatura adiabática del aire aumenta hasta 276 °C. Esto exige una adecuada refrigeración que debidamente reconducida puede devolver como calor hasta el 80% de la potencia introducida como trabajo dependiendo de si la refrigeración es por aire o por agua. En cualquier

	TECNICAS DE AHORRO DE ENERGIA EN LAS FABRICAS DE SANITARIO	Enero 2019
		CF-0.5M-P-02
		Rev. 02

caso hasta 128 kW térmicos pueden ser obtenidos de la refrigeración de un compresor. El ahorro correspondiente anual (para 2,225 h) es de:

$$128 \text{ kW} \cdot 2,225 \frac{\text{h}}{\text{año}} \cdot 0.03 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 8,544 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Una inversión de 15,000€ capaz de reutilizar el calor daría un retorno de 1.75 años

14.3. Mantenimiento red de distribución

Resulta obvio que un adecuado mantenimiento de la red que elimine las fugas produce notables ahorros. Este factor es difícil de evaluar, pero solamente imaginar una red de aire de 300 kW que tenga un 10% de pérdidas sin corregir, supone anualmente unos 8.500 €/año. La inversión parece obvia. Un buen mantenimiento preventivo dedicado a evitar y reparar fugas cuesta menos que el ahorro.

La energía térmica de las calderas de vestuarios puede ser substituida por aire recuperado del horno de la misma forma que los secaderos y centrales. Su inversión proporcional sería de 52,500 y el ahorro:

$$105 \text{ kW} \cdot \frac{24 \text{ dias}}{\text{año}} \cdot 232 \frac{\text{dias}}{\text{año}} \cdot 0.03 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 17,539 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Por lo que el retorno resulta:

$$r_s = \frac{52,500\text{€}}{17,539 \frac{\text{€}}{\text{año}}} = 3 \text{ años}$$

Para los consumos de bombeo es aplicable todo expuesto anteriormente para reducción de motores y particularmente el control de frecuencia de trabajo, pues el bombeo permite grandes cambios de régimen de trabajo que redundan en grandes reducciones de potencia. Los ahorros por eficiencia y variación de f se resumen en la siguiente tabla:

SERVICIOS	P kW	Inversión €	Ahorro €/año	r _s años
Eficiencia		7,602	1,959	3.88
Variación f		113,380	36,555	3.10
Alumbrado LED		1,709	503	3.40
Regulación lumínica		656	222	2.95

15. OTRAS MEDIDAS

Existen medidas no especificadas en secciones independientes de la fábrica que pueden ser adoptadas en diferentes áreas o en la totalidad de la fábrica como son:

15.1. Energías alternativas (fotovoltaica)

	TECNICAS DE AHORRO DE ENERGIA EN LAS FABRICAS DE SANITARIO	Enero 2019
		CF-0.5M-P-02
		Rev. 02

Los techos de las fábricas son susceptibles de instalar placas fotovoltaicas que permitan generar electricidad para la fábrica durante las horas de sol. De cualquier manera ha de haber suministro de red para las horas de sombra. Dependiendo del país, las condiciones de autogenerador son variables. Por eso aquí se simplifica el estudio considerando que durante las horas de sol se consume la energía generada y se vierte a la red el exceso o se toma de ella el defecto a precio de compra. En las horas de sombra se compra toda la energía de la red. En el Anexo XII se pueden ver las características de una planta fotovoltaica adaptada al tejado de la nave del estudio. La energía producida es de 2 GWh/año. El estado actual del arte para las plantas fotovoltaicas permite estimar costes de construcción de 1 k€/kW_p instalado, por lo que en este caso el coste sería de 1.63 M€, por lo que el retorno sería de:

$$r_s = \frac{1.63 \text{ M€} \cdot \frac{10^6 \text{ €}}{\text{M€}}}{2 \frac{\text{GWh}}{\text{año}} \cdot \frac{10^6 \text{ kWh}}{\text{GWh}} \cdot 0.1 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}} = 8.15 \text{ años}$$

15.2. Cogeneración de electricidad y calor. El retorno es función del grado de aprovechamiento del calor cogenerado. En plantas con muchas necesidades térmicas (cerámica plana) será muy rápido y puede estar en torno a los 3 ó 4 años. En una planta de cerámica sanitaria, el calor de la turbina se iría a secaderos, centrales de acondicionamiento y en su caso a destilación o condensación de agua para reutilización.

Esta solución permite precalentar los aires de hornos a la temperatura de los gases de escape de la turbina que son más altos que los de chimenea del horno por lo que el consumo global del horno baja respecto al precalentamiento hecho con sus propios aires residuales vistos en el apartado 10. Por otro lado el calor residual de la turbina permite alimentar todos los receptores térmicos. Aún quedará calor residual que sería posible aprovechar para una destilación o para condensación con absorción según se explica en los apartados 15.5 y 15.6.

Con los datos del estudio presente se ha elaborado la siguiente tabla donde se ven los consumos eléctricos y térmicos de una planta convencional sin medidas de ahorro energético versus otra con planta de cogeneración dimensionada de acuerdo a la potencia máxima eléctrica.

		CONVENCIONAL			kW	TG Pmax	
		kW	kWh	€/año		kWh	€/año
ELECTRICIDAD	Electricidad generada				1,673	12,043,253	
	Electricidad consumida	1,307	7,277,798	727,780	1,307	7,277,798	
	Electricidad vendida				366	4,765,455	476,545
	Electricidad comprada=	1,307	7,277,798	727,780	-366	-4,765,455	-476,545
GAS	TG				5,576	40,144,178	1,204,325
	Horno tunel	2,150	15,480,000	464,400	1,605	11,556,587	346,698
	Horno intermitente	1,709	10,254,000	307,620	1,026	2,745,822	82,375
	Secadero moldes	360	2,004,480	60,134			
	Secadero piezas	600	3,340,800	100,224			
	Central acondicionamiento	560	3,118,080	93,542			
	Calderas	105	581,856	17,456			
	Gas comprado	5,483	34,779,216	1,043,376	8,207	54,446,587	1,633,398
TOTAL ENERGIA	6,791	42,057,014	1,771,156	7,842	49,681,132	1,156,852	
	Calor residual de la cogeneración				828	5,961,701	178,851

De la tabla se desprende que el ahorro con la planta de cogeneración es de 614,304 €/año. Una planta de cogeneración de esta potencia puede rondar los 4 M€, por lo que el retorno será de 6.5 años. El retorno no es especialmente bueno porque hay calor residual que no se utiliza. Si este calor se utilizase efectivamente en climatización, condensación, destilación de agua, etc., el retorno bajaría a:

$$r_s = \frac{4 \text{ M€}}{[1,771,156 - (1,156,852 - 178,851)] \frac{\text{€}}{\text{año}}} = 5 \text{ años}$$

15.3. Generación eléctrica con calor de bajo grado exergético (recuperación de hornos) mediante ciclos Rankine orgánicos. Periodos de retorno de entre 1 y 2 años. Un ciclo generador orgánico LT3 de la firma RANK puede generar 50 kW eléctricos con las salidas de aires y humos de un horno túnel. Esto significa un ahorro de:

$$50 \text{ kW} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{dia}} \cdot 300 \frac{\text{dia}}{\text{año}} \cdot 0.1 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 36,000 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Con un precio de 198,000 € el retorno sería de:

$$r_s = \frac{198,000 \text{€}}{36,000 \frac{\text{€}}{\text{año}}} = 5.5 \text{ años}$$

En cuanto a medidas de ahorro de agua cabe decir que actualmente no están extendidas por el relativo bajo coste del agua en las fábricas que generalmente no justifica inversiones de reducción por los elevados periodos de retorno. De cualquier manera, a medida que el coste de obtención de agua se vaya incrementando la viabilidad de estas inversiones se ira revirtiendo.

En este estudio se ha considerado un consumo diario de agua de 133 m³. Dependiendo del origen del agua ésta puede tener diferente coste. Si es de la red, variará entre 1 a 2 €/m³. Cuando se bombea de pozo el coste será aproximadamente el de electricidad de bombeo que para los 133 m³/día con un salto hidráulico de 150 necesita una bomba de potencia:

	TECNICAS DE AHORRO DE ENERGIA EN LAS FABRICAS DE SANITARIO	Enero 2019
		CF-0.5M-P-02
		Rev. 02

$$P = \frac{\rho g H Q}{\eta} = \frac{1,000 \frac{kg}{m^3} \cdot 9.81 \frac{N}{kg} \cdot 150m \cdot 133 \frac{m^3}{día} \cdot \frac{1día}{24h} \cdot \frac{1h}{3,600s}}{0.8} = 2.8 kW$$

Esta electricidad supone un coste de:

$$2.8kW \cdot \frac{24h}{133m^3} \cdot 0.1 \frac{€}{kWh} = 0.051 \frac{€}{m^3}$$

Cuando el agua ha de ser osmotizada, hay que añadir este coste al del agua. Una planta de ósmosis tiene aproximadamente un ratio de potencia de 5.3 kWh/m³. Con este valor el coste a añadir al agua es de

$$C_{OI} = 5.35 \frac{kWh}{m^3} \cdot 0.1 \frac{€}{kWh} = 0.54 \frac{€}{m^3}$$

15.4. El agua residual se puede tratar previa filtración con una destilación multi-efecto (MED) con calor residual del horno o la turbina de una cogeneración, para ser reutilizada. Esta tecnología suple a la de ósmosis inversa. Su amortización depende fuertemente del precio del agua, que actualmente no es elevado y no ofrece retornos rápidos.

Una planta MED puede costar en torno a los 150-200 k€ y su coste de operación estará en torno a los 2 €/m³. Los ahorros serán pues:

En el caso de agua de red osmotizada:

$$\text{Ahorro:} \quad (2 + 0.54 - 2) \frac{€}{m^3} \cdot 133 \frac{m^3}{día} \cdot 232 \frac{días}{año} = 16,662 \frac{€}{año}$$

$$\text{Retorno:} \quad r_s = \frac{200.000€}{16,662 \frac{€}{año}} = 12 \text{ años}$$

En el caso de agua de pozo osmotizada:

$$\text{Ahorro:} \quad (0.051 + 0.54 - 2) \frac{€}{m^3} \cdot 133 \frac{m^3}{día} \cdot 232 \frac{días}{año} = -43,476 \frac{€}{año}$$

No hay retorno pues cuesta más la producción con destilación que la extracción de pozo con ósmosis.

Como se establecía anteriormente, esta tecnología necesita de un coste superior del agua para empezar a ser rentable.

15.5. De los 133 m³/día consumidos, 21.52 m³/día corresponden a la preparación de pasta, 2.39 a la de esmalte y 8.93 a la de los moldes de yeso. Esta agua en su totalidad se termina evaporando a lo largo del proceso y mayoritariamente tiene lugar en los secaderos de moldes y piezas y en la sala de colado mediante la calefacción para acabar siendo expulsada a la atmósfera. Una importante

fracción de esta agua podría ser recuperada por condensación en los puntos de extracción; chimeneas de secaderos y extractores de la sala de colado.

En los secaderos de moldes se evaporan:

$$145 \frac{kg}{h} \cdot 3 \text{ secaderos} = 435 \frac{kg}{h}$$

Que suponen:

$$435 \frac{kg}{h} \cdot \frac{1h}{3,600s} \cdot 2,400 \frac{kJ}{kg} = 290 \text{ kW}$$

En los secaderos de piezas se evaporan:

$$205 \frac{kg}{h} \cdot 2 \text{ secaderos} = 410 \frac{kg}{h}$$

Que suponen:

$$410 \frac{kg}{h} \cdot \frac{1h}{3,600s} \cdot 2,400 \frac{kJ}{kg} = 273 \text{ kW}$$

En la central de acondicionamiento de la sala de colado se evaporan:

$$694 \frac{kg}{h} \cdot 1 \text{ central} = 694 \frac{kg}{h}$$

Que suponen:

$$694 \frac{kg}{h} \cdot \frac{1h}{3,600s} \cdot 2,400 \frac{kJ}{kg} = 463 \text{ kW}$$

En total, el agua evaporada es 1,539 kg/h con un calor latente de evaporación de 1,026 kW. Esta agua puede condensarse para ser reutilizada con un equipo enfriador de absorción de rendimiento 0.7 para el cuál harían falta 1,466 kW de calor residual del horno o de la turbina de cogeneración en su caso. El coste de una planta enfriadora de estas características se estima en 150,000 € y los retornos serían:

En el caso de agua de red:

$$\text{Ahorro: } 1,539 \frac{kg}{h} \cdot \frac{1 m^3}{10^3 kg} \cdot \frac{24h}{dia} \cdot 232 \frac{dia}{año} \cdot 2.54 \frac{€}{m^3} = 21,765 \frac{€}{año}$$

$$\text{Retorno: } r_s = \frac{150,000€}{21,765 \frac{€}{año}} = 6.89 \text{ años}$$

	TECNICAS DE AHORRO DE ENERGIA EN LAS FABRICAS DE SANITARIO	Enero 2019
		CF-0.5M-P-02
		Rev. 02

En el caso de agua de pozo:

$$\text{Ahorro: } 1,539 \frac{kg}{h} \cdot \frac{1 m^3}{10^3 kg} \cdot \frac{24h}{dia} \cdot 232 \frac{dia}{año} \cdot 0.591 \frac{€}{m^3} = 5,064 \frac{€}{año}$$

$$\text{Retorno: } r_s = \frac{150,000€}{5,064 \frac{€}{año}} = 29.6 \text{ años}$$

16. OPTIMIZACION

Todas las medidas de ahorro vistas hasta aquí se han considerado individualmente, es decir los ahorros calculados parten de la fábrica convencional en la que no hubiese implantada previamente ninguna medida. Algunas de las medidas son independientes de las demás y constituyen en sí mismas el ahorro establecido. En cambio, hay otras que dependen de lo que se haya hecho previamente y del resultado de esas acciones anteriores. Por ejemplo, para recuperar aire residual del horno la disponibilidad depende proporcionalmente del consumo del mismo. Por eso cuando al horno se le han aplicado medidas de reducción de consumo, el calor disponible en chimeneas es proporcionalmente menor a la reducción del consumo. Debido a este efecto, la manera de optimizar la fábrica es por cálculo de ahorros en diferentes configuraciones de implementación de medidas de reducción. No obstante, la primera fase obvia es la aplicación de las medidas independientes para tener una primera etapa de optimización a partir de la cual se irán haciendo ensayos para encontrar la mejor solución final. Por otro lado, la optimización no ha de ser sólo energética, pues siempre habrá un coste de inversión. Es frecuente que la mejor solución energética no sea la mejor económica, por lo que el problema se vuelve más complejo considerando además que la amortización depende fuertemente de la incierta evolución de los precios de los recursos.

En este estudio se han hecho una primera etapa independiente y a continuación algunos ensayos con los resultados siguientes. Se parte de los consumos de la fábrica convencional sin ninguna medida de ahorro cuyos consumos serían:

FABRICA CONVENCIONAL Consumos	Electricidad kWh/año	Gas kWh/año	Agua m ³ /año	TOTAL kWh/año	m ³ /año
PRIMERAS MATERIAS	429,664	0	46	429,664	46
PREPARACION PASTA	916,493	0	5,108	916,493	5,108
PREPARACION ESMALTES	345,866	0	671	345,866	671
MODELERIA Y MOLDES	547,520	2,004,480	2,141	2,552,000	2,141
COLADO	1,625,856	0	6,714	1,625,856	6,714
ACONDICIONAMIENTO COLADO	182,074	3,118,080	0	3,300,154	0
SECADO	551,232	3,340,800	0	3,892,032	0
ESMALTERIA	202,304	0	464	202,304	464
HORNOS	916,800	25,734,000	0	26,650,800	0
Horno tunel	540,000	15,480,000		16,020,000	0
Horno intermitente	360,000	10,254,000		10,614,000	0
CONTROL FINAL	82,800	240,000	46	322,800	46
OFICINAS	112,288	0	110	112,288	110
ALMACEN	28,304	0	58	28,304	58
SERVICIOS	1,336,598	600,416	15,480	1,937,014	15,480
TOTAL	7,277,798	35,037,776	30,838	42,315,574	30,838

16.1. Optimización OP-01

En esta etapa se han considerado las inversiones independientes:

INVERSIONES INDEPENDIENTES ELECTRICAS				
Energía	Tipo	Descripción	€/año	Ahorro kWh/año
Electricidad	Alumbrado LED	Substitución de alumbrado convencional por LED	7,968	79,680
Electricidad	Eficiencia IE	Substitución de motor de eficiencia IEE1 ó IEE2 a IEE3	19,879	198,792
Electricidad	Regulación alumbrado	Control de iluminación por presencia e intensidad	3,089	30,886
Electricidad	Variación de frecuencia	Reducción del par motor-resistente por variación de frecuencia	125,566	1,255,655
Electricidad	Control de ventilación	Control de ventilación de secado de moldes en los bancos	31,250	312,500
Total eléctricas=			187,751	1,877,513

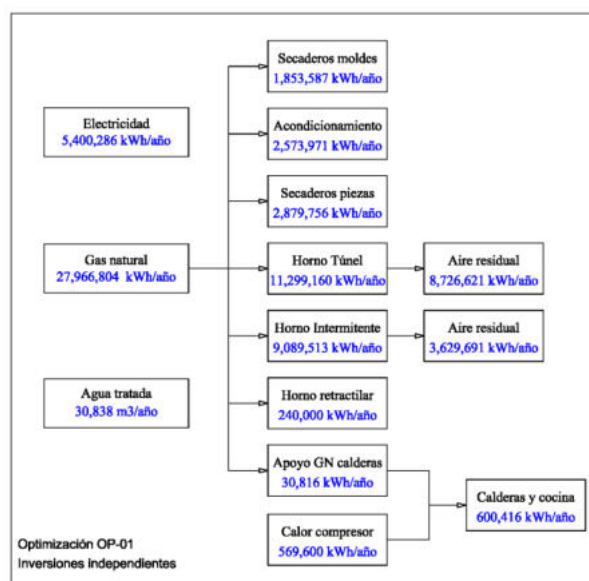
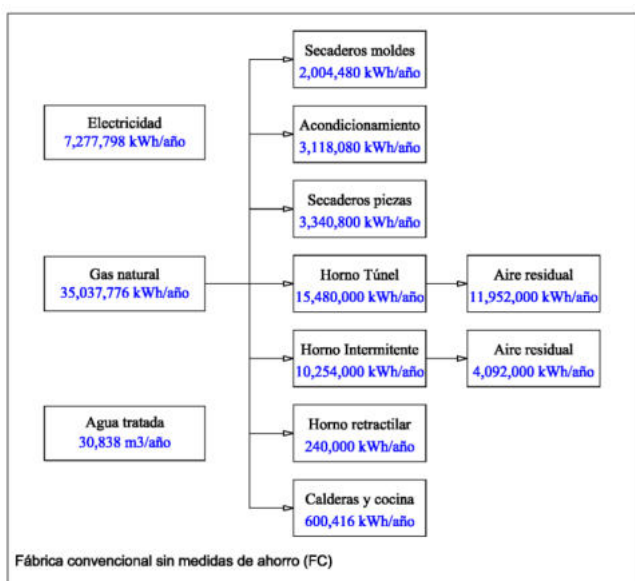
INVERSIONES INDEPENDIENTES GAS				
Energía	Tipo	Descripción	€/año	Ahorro kWh/año
Gas	Aislamiento térmico	Incremento de aislamiento térmico cerramientos secaderos y colado	21,001	700,021
Gas	Regulación higrótérmica	Control de Temperatura y humedad en HVU y secaderos piezas	13,681	456,024
Gas	Eficiencia combustión	Mejora de la eficiencia de combustión mediante catalizadores magnéticos	90,232	3,007,736
Gas	Regulación térmica	Regulación adecuada del horno para minimizar caudales excesivos de aires	20,538	684,609
Gas	SiC	Aligeramiento de superestructura HT con SiC	49,589	1,652,981
Gas	Recuperación térmica	Recuperación térmica del calor de compresor para calentar agua calderas	17,088	569,600
Total gas=			212,129	7,070,972

Cuyos ahorros son los siguientes:

OP-01 Ahorros	Electricidad kWh/año	Gas kWh/año	Agua m3/año	TOTAL kWh/año	m3/año
PRIMERAS MATERIAS	48,706	0	0	48,706	0
PREPARACION PASTA	266,918	0	0	266,918	0
PREPARACION ESMALTES	99,623	0	0	99,623	0
MODELERIA Y MOLDES	30,413	150,893	0	181,306	0
COLADO	497,254	0	0	497,254	0
ACONDICIONAMIENTO COLADO	41,587	544,109	0	585,696	0
SECADO	184,876	461,044	0	645,920	0
ESMALTERIA	21,532	0	0	21,532	0
HORNOS	267,481	5,345,326	0	5,612,808	0
Horno tunel		4,180,840	0	4,180,840	0
Horno intermitente		1,164,487	0	1,164,487	0
CONTROL FINAL	10,033	0	0	10,033	0
OFICINAS	13,360	0	0	13,360	0
ALMACEN	3,335	0	0	3,335	0
SERVICIOS	392,394	569,600	0	961,994	0
TOTAL	1,877,513	7,070,972	0	8,948,484	0

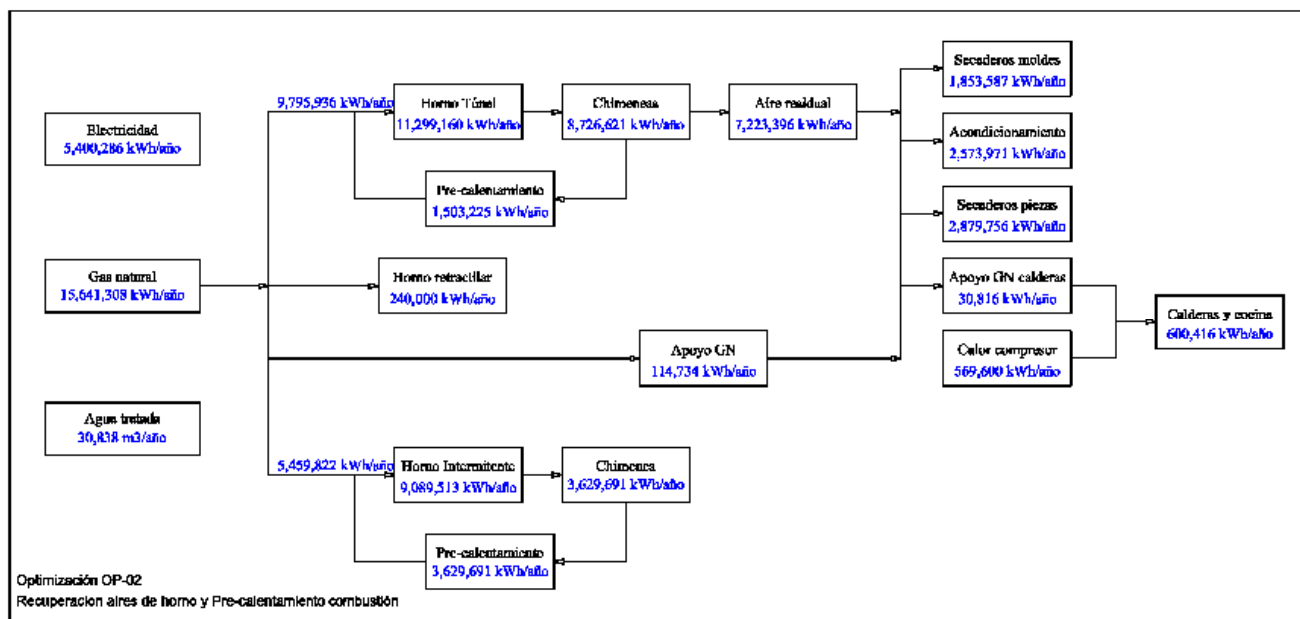
Se ha reducido el consumo eléctrico un 26% y el térmico un 20%.

En las figuras siguientes se pueden ver los esquemas correspondientes a la fábrica convencional (FC) y a la optimización OP-01.



16.2. Optimización OP-02

En esta optimización, se ensaya sobre OP-01 la recuperación de aire de horno para precalentar aires de combustión, techo, difusión e inyección en ambos hornos además de suministrar aire caliente a secaderos y HVU's, según el esquema siguiente:



Puesto que el horno se ha optimizado en la fase anterior, los caudales de aires a precalentar son menores que en la fábrica convencional y consecuentemente los calores necesarios, así como los calores residuales.

De acuerdo a los valores de calor residuales y a al esquema de distribución de los mismos, la optimización OP-02 se puede resumir como sigue:

OP-02 Consumos	Electricidad kWh/año	Gas kWh/año	Agua m3/año	TOTAL kWh/año	m3/año
PRIMERAS MATERIAS	380,958	0	46	380,958	46.40
PREPARACION PASTA	649,575	0	5,108	649,575	5,107.99
PREPARACION ESMALTES	246,242	0	671	246,242	670.67
MODELERIA Y MOLDES	517,107	0	2,141	517,107	2,140.82
COLADO	1,128,602	0	6,714	1,128,602	6,714.00
ACONDICIONAMIENTO COLADO	140,487	0	0	140,487	0.00
SECADO	366,356	0	0	366,356	0.00
ESMALTERIA	180,772	0	464	180,772	464.00
HORNOS	649,319	15,255,758	0	15,905,076	0.00
Horno tunel	540,000	9,795,936	0	10,335,936	0.00
Horno intermitente	360,000	5,459,822	0	5,819,822	0.00
CONTROL FINAL	72,767	240,000	46	312,767	46.40
OFICINAS	98,928	0	110	98,928	110.20
ALMACEN	24,969	0	58	24,969	58.00
SERVICIOS	944,204	145,550	15,480	1,089,755	15,479.65
TOTAL	5,400,286	15,641,308	30,838	21,041,594	30,838

Es una acción sobre el consumo de gas natural que ha conseguido reducir un 44% de gas sobre la OP-01.

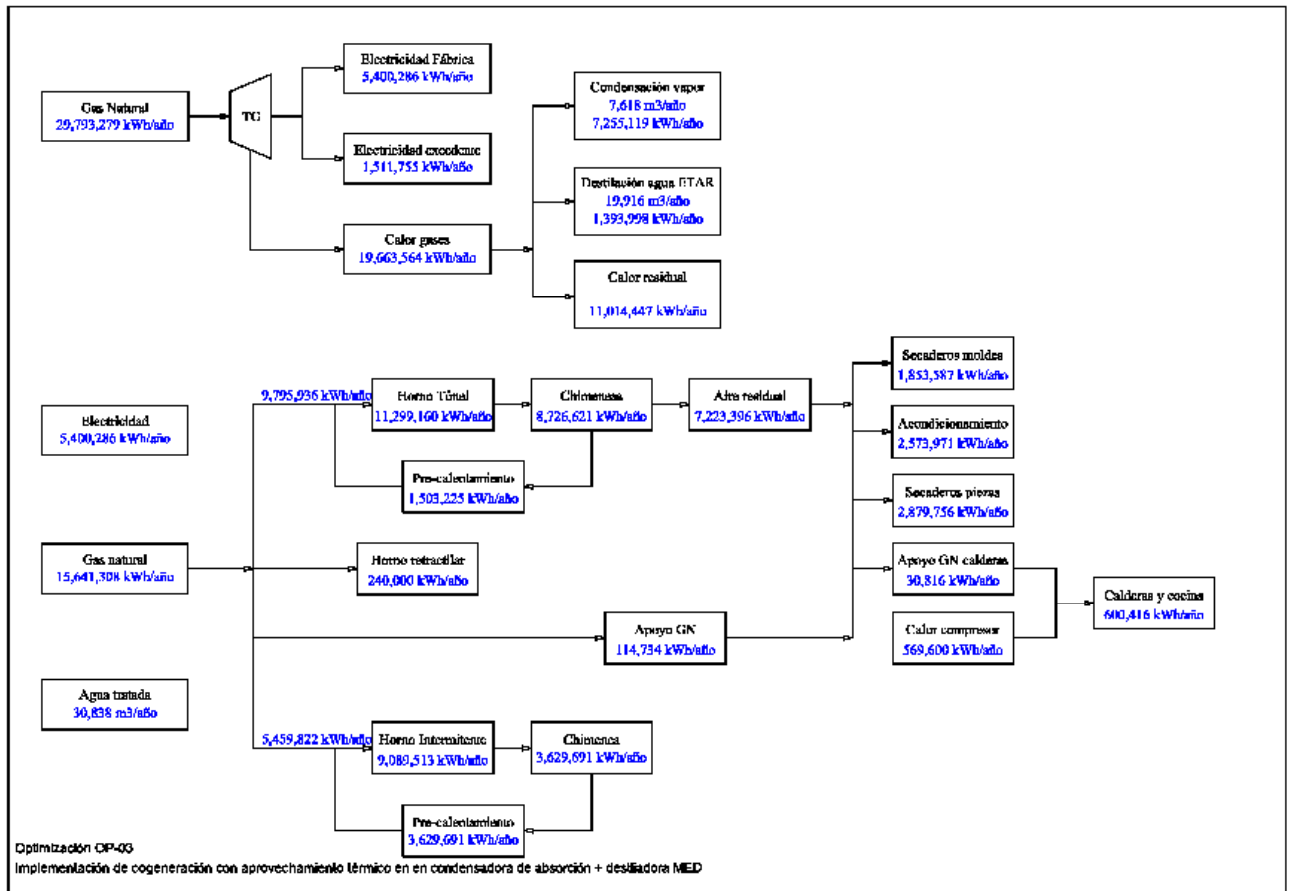
	TECNICAS DE AHORRO DE ENERGIA EN LAS FABRICAS DE SANITARIO	Enero 2019
		CF-0.5M-P-02
		Rev. 02

Esta reducción de gas se ha conseguido mediante el pre-calentamiento de aires de horno con recuperación de calor a partir de las chimeneas y utilizar el resto para suministrar a los diferentes receptores térmicos con un pequeño excedente. Esto mismo podría realizarse con mayor eficiencia en el precalentamiento de los aires de horno mediante los sistemas EMS y REKO de Riedhammer, lo que mejoraría el rendimiento de los hornos pero disminuiría calor residual para receptores térmicos que posiblemente necesitarían aporte de gas natural. Habría que hacer un análisis similar al descrito anteriormente para ver cuál de las dos inversiones resulta globalmente más interesante.

16.3. Optimización OP-03

Una vez optimizado el consumo térmico de la fábrica ya sólo queda ensayar implementaciones de las diferentes inversiones globales que no sean excluyentes entre sí. Por ejemplo, añadir una planta de cogeneración produciría un exceso de calor que para rentabilizar la inversión se puede utilizar como fuente de energía para destilar o condensar agua. Por otro lado se incrementa el coste de gas para alimentar la turbina. En este caso, no tendría sentido plantear una planta de energía fotovoltaica, que no tendría coste de gas, pero no permitiría reutilización de agua por vía térmica. Del mismo modo, si la inversión eléctrica elegida fuera una planta fotovoltaica, no habría calor residual para la reutilización del agua. Por eso, y en aras de optimizar el consumo de agua, en este estudio se opta por la cogeneración con reutilización de agua.

Para dimensionar la cogeneración se toma el consumo eléctrico ya reducido que ha pasado de 7,277,798 kWh/año eléctricos a 5,400,286 kWh/año. La turbina, con rendimiento eléctrico de 0.3, requiere 4.14 MW de gas natural y se obtienen 2.73 MW de calor residual a 514°C. Este calor puede suministrar una planta de destilación MED en la ETAR para reutilizar el agua residual líquida y además a una planta de enfriamiento de absorción que permita recuperar el agua de evaporación en secaderos y en la sala de colado proveniente de las piezas y moldes. El esquema correspondiente sería:



La planta de cogeneración es menor que la diseñada para una fábrica convencional, dado que la potencia eléctrica es menor. Los valores correspondientes son:

		OP-02 sin cogeneración			OP-02 con cogeneración		
		kW	kWh	€/año	kW	kWh	€/año
ELECTRICIDAD	Electricidad generada				1,241	6,912,041	
	Electricidad consumida	970	5,400,286	540,029	970	5,400,286	
	Electricidad excedente				272	1,511,755	151,175
	Electricidad comprada=	970	5,400,286	540,029	-272	-1,511,755	-151,175
GAS	TG				4,138	29,793,279	893,798
	Horno tunel	1,361	9,795,936	293,878	1,361	9,795,936	293,878
	Horno intermitente	910	5,459,822	163,795	910	5,459,822	163,795
	Control final	100	240,000	7,200	100	240,000	
	Servicios	19	114,734	3,442	19	114,734	
	Gas comprado	2,390	15,610,492	468,315	6,528	45,403,771	1,351,471
TOTAL ENERGIA		3,360	21,010,778	1,008,343	6,256	43,892,016	1,200,296
Calor residual de la cogeneración					2,731	19,663,564	589,907

El ahorro que se obtiene de esta acción consiste los costes evitados de electricidad y de agua. Por el contrario se incrementa el coste de gas para alimentar la turbina pero no se contabiliza energía de destilación ni de condensación, dado que se utiliza el calor residual de TG.

El resultado de los consumos es:

OP-03 Consumos	Electricidad kWh/año	Gas kWh/año	Agua m3/año	TOTAL kWh/año	m3/año
PRIMERAS MATERIAS	0	0	46	0	46
PREPARACION PASTA	0	0	116	0	116
PREPARACION ESMALTES	0	0	116	0	116
MODELERIA Y MOLDES	0	0	70	0	70
COLADO	0	0	6,714	0	6,714
ACONDICIONAMIENTO COLADO	0	0	0	0	0
SECADO	0	0	0	0	0
ESMALTERIA	0	0	464	0	464
HORNOS	0	15,255,758	0	15,255,758	0
Horno tunel	0	9,795,936	0	9,795,936	0
Horno intermitente	0	5,459,822	0	5,459,822	0
CONTROL FINAL	0	240,000	46	240,000	46
OFICINAS	0	0	110	0	110
ALMACEN	0	0	58	0	58
SERVICIOS	-1,511,755	29,908,013	-4,435	28,396,258	-4,435
TOTAL	-1,511,755	45,403,771	3,306	43,892,016	3,306

Respecto a la OP-02;

- se ha mejorado la electricidad eliminado todo el consumo y resultando un excedente que puede ser vendido a la red.
- Se ha incrementado el consumo de gas debido a la TG
- Se ha implementado la destilación de agua de ETAR y la condensación de agua de piezas y esmalte evaporada sin consumo de gas.

Se puede resumir todo el proceso en la siguiente tabla a modo de síntesis:

RESUMEN		CONSUMO			COSTE	AHORRO	INVERSION RETORNO	
Aprovechamiento parcial calor		Electricidad kWh/año	Gas kWh/año	Agua m3/año	€/año	€/año	€	años
Fábrica convencional	FC	7,277,798	35,037,776	30,838	1,840,589			
Optimización 01	OP-01	5,400,286	27,966,804	30,838	1,440,709	399,880	1,293,361	3.23
Optimización 02	OP-02	5,400,286	15,610,492	30,838	1,070,020	370,689	925,000	2.50
Optimización 03	OP-03	-1,511,755	45,403,771	3,306	1,217,550	-147,530	3,350,000	-22.71
Inversión global=		-1,511,755	45,403,771	3,306	1,217,550	623,040	5,568,361	8.94

Puede apreciarse que el coste de inversión para recuperar el agua no resulta interesante pues a pesar de tener retorno por venta eléctrica de excedente, el exceso de gas no compensa el ahorro de agua al precio supuesto de 2 €/m3. Se necesitaría un incremento en el precio del agua para justificar la inversión. No obstante, existe un calor residual de la cogeneración que no ha sido considerado (19,663,564 kWh/año), que adecuadamente utilizado y valorizado con el precio del gas, obtendría beneficio y un retorno de 7.57 años, que en función de la evolución del precio del agua, podría llegar a ser interesante:

RESUMEN		CONSUMO			COSTE	AHORRO	INVERSION RETORNO	
Aprovechamiento total calor		Electricidad kWh/año	Gas kWh/año	Agua m3/año	€/año	€/año	€	años
Fábrica convencional	FC	7,277,798	35,037,776	30,838	1,840,589			
Optimización 01	OP-01	5,400,286	27,966,804	30,838	1,440,709	399,880	1,293,361	3.23
Optimización 02	OP-02	5,400,286	15,610,492	30,838	1,070,020	370,689	925,000	2.50
Optimización 03	OP-03	-1,511,755	25,740,207	3,306	627,643	442,377	3,350,000	7.57
Inversión global=		-1,511,755	25,740,207	3,306	627,643	1,212,947	5,568,361	4.59

	TECNICAS DE AHORRO DE ENERGIA EN LAS FABRICAS DE SANITARIO	Enero 2019
		CF-0.5M-P-02
		Rev. 02

Como resumen cabe decir que las inversiones para la configuración OP-01 & OP-02 son indiscutibles. Sobre este punto de partida se debe hacer un análisis según el estado de los precios de energía y agua para ver qué combinación de inversiones dependientes resulta más ventajosa. De cualquier manera, no hay que perder de vista el hecho de que los precios son muy variables, aunque la tendencia es siempre al alza, por lo que cuando se diseñe la configuración de técnicas de ahorro hay que realizar un análisis de evolución de precios en medio o largo plazo para no incurrir en costes posteriores.

ANEXO I (Consumos eléctricos)

Electricidad		COLADO MOLDES YESO										
500,000		pcs/año										
INSTALACION		Num. Equipos	P	P _{nom}	RUN	STOP	Coef. Uso	P _{media}	W _{dia}	W _{año}	Emissiones	
		(kw)	(kw)	(h)	(h)	f _u	(kw)	(kwh/día)	(kwh/año)	t _{CO2} /año		
DB01 PRIMERAS MATERIAS												
DB01-A	Molinos	2	110	220	8	16	0.90	198	1,584	367,488	217	
DB01-B	Cintas	7	5	35	8	16	0.70	25	196	45,472	27	
DB01-C	Bombas (Wilden)	3										
DB01-D	Tolvas	6	3	15	8	16	0.60	9	72	16,704	10	
Sub-total primeras materias=				270				232	1,852	429,664	253	
DB02 PREPARACION PASTA												
DB02-A	Desleidores	2	125	250	8	16	0.60	150	1,200	278,400	164	
DB02-B	Tamices	6	2	9	8	16	0.70	6	50	11,693	7	
DB02-C	Bombas (Bredel)	3	15	45	8	16	0.50	23	180	41,760	25	
DB02-D	Tanques	7	15	105	24	0	1.00	105	2,520	584,640	345	
Sub-total preparación pastas=				409				284	3,950	916,493	540	
DB03 PREPARACION ESMALTES												
DB03-A	Molinos	2	25	50	8	16	0.90	45	360	83,520	49	
DB03-B	Cintas	2	5	10	8	16	0.50	5	40	9,280	5	
DB03-C	Desleidores	2	30	60	8	16	0.60	36	288	66,816	39	
DB03-D	Tamices	3	2	5	8	16	0.70	3	25	5,846	3	
DB03-E	Bombas (Wilden)	2										
DB03-F	Tanques	18	3	54	24	0	0.60	32	778	180,403	106	
Sub-total preparación esmaltes=				179				122	1,491	345,866	204	
DB04 MODELERIA Y MOLDES												
DB04-A	Secaderos de moldes	3	35	105	24	0	0.90	95	2,268	526,176	310	
DB04-B	Polipastos	10	2	18	8	16	0.40	7	56	12,992	8	
DB04-C	Preparación yeso	1	5	5	8	16	0.90	5	36	8,352	5	
DB04-D	Bombas (Wilden)	3										
Sub-total modelería y moldes=				128				106	2,360	547,520	323	
DB05 COLADO												
DB05-A	Bancos	30	20	600	16	8	0.60	360	5,760	1,336,320	787	
DB05-C	Balsas	2	5	10	8	16	0.60	6	48	11,136	7	
DB05-D	Tanques	2	25	50	24	0	1.00	50	1,200	278,400	164	
DB05-E	Bombas (Wilden)	4										
Sub-total colado=				660				416	7,008	1,625,856	958	
DB06 ACONDICIONAMIENTO COLADO												
DB06-A	Centrales acondicionamiento	1	50	50	24	0	0.50	25	600	139,200	82	
DB06-B	Ventiladores extractores	6	6	33	8	16	0.70	23	185	42,874	25	
Sub-total acondicionamiento colado=				83				48	785	182,074	107	
DB07 SECADO												
DB07-A	Secaderos de piezas	2	55	110	24	0	0.90	99	2,376	551,232	325	
Sub-total secaderos=				110				99	2,376	551,232	325	
DB08 ESMALTERIA												
DB08-A	Carruseles	2	45	90	8	16	0.90	81	648	150,336	89	
DB08-B	Cabinas esmaltado	8	5	40	8	16	0.70	28	224	51,968	31	
Sub-total esmaltería=				130				109	872	202,304	119	
DB09 HORNOS												
DB09-A	Horno tunel	1	125	125	24	0	0.60	75	1,800	540,000	318	
DB09-B	Horno intermitente	1	100	100	20	4	0.60	60	1,200	360,000	212	
DB09-C	Cabinas 2º fuego	2	5	10	8	16	0.70	7	56	16,800	10	
Sub-total hornos=				235				142	3,056	916,800	540	
DB10 CONTROL FINAL												
DB10-A	Líneas control final	4	5	20	8	16	0.90	18	144	43,200	25	
DB10-B	Horno retractilado	1	10	10	8	16	0.70	7	56	16,800	10	
DB10-C	Mesas elevadoras	4	5	19	8	16	0.50	10	76	22,800	13	
Sub-total control final=				49				35	276	82,800	49	
DB11 OFICINAS												
DB11-A	Puestos de trabajo	15	1	15	8	16	0.70	11	84	19,488	11	
DB11-B	NIC-servidor	1	10	10	24	0	0.60	6	144	33,408	20	
DB11-C	Aire acondicionado	10	5	45	8	16	0.40	18	144	33,408	20	
DB11-D	Otros	1	20	20	8	16	0.70	14	112	25,984	15	
Sub-total oficinas=				90				49	484	112,288	66	
DB12 ALMACEN												
DB12-A	Oficina	1	3	3	8	16	0.70	2	14	3,248	2	
DB12-B	Carga baterías	5	1	5	24	0	0.90	5	108	25,056	15	
Sub-total almacén=				8				6	122	28,304	17	
DB13 SERVICIOS												
DB13-A	Compresores	2	160	320	24	0	0.40	128	3,072	712,704	420	
DB13-B	Calderas	1	5	5	24	0	0.60	3	72	16,704	10	
DB13-C	Taller mantenimiento	1	45	45	8	16	0.50	23	180	41,760	25	
DB13-D	Tolva pérdidas u machacadora	1	50	50	8	16	0.50	25	200	46,400	27	
DB13-E	Sala bombas y OI	10	5	50	24	0	0.60	30	720	167,040	98	
DB13-F	ETAR	1	75	75	24	0	0.40	30	720	167,040	98	
DB13-G	Caseta guardia	1	5	5	24	0	0.50	3	60	13,920	8	
DB13-H	Tratamiento de residuos	1	5	5	8	16	0.40	2	16	3,712	2	
DB13-I	Comedor	1	5	5	8	16	0.30	1	11	2,506	1	
DB13-J	Cocina	1	10	10	8	16	0.30	3	24	5,568	3	
DB13-K	Alumbrado exterior	1	10	10	12	12	1.00	10	120	27,840	16	
DB13-L	Circuitos de toma corriente	1	32	32	24	0	0.70	22	538	124,723	73	
DB13-M	Regadío	1										
DB13-N	Estación eléctrica	1	2	2	24	0	0.30	1	14	3,341	2	
DB13-O	ERM Gas	1	1	1	24	0	0.30	0	7	1,670	1	
DB13-P	Generador	1	1	1	24	0	0.30	0	7	1,670	1	
DB13-Q	Depósito reserva agua	1										
Sub-total servicios=				616				281	5,761	1,336,598	788	
TOTAL ELECTRICIDAD				2,965			0.65	1,927	30,393	7,277,798	4,289	

ANEXO II (Niveles de iluminación)

NIVELES ILUMINACION	%	ALUMBRADO CONVENCIONAL				
		S m2	lux	Tipo luz	eficiencia lm/W	P _{convencional} kW
PRIMERAS MATERIAS	4.15%	1,350	200	Vapor Na AP	100	3.38
PREPARACION PASTA	3.07%	1,000	200	Vapor Na AP	100	2.50
PREPARACION ESMALTES	2.31%	750	300	Fluorescencia	80	3.52
MODELERIA Y MOLDES	6.92%	2,250	500	Fluorescencia	80	17.58
COLADO	19.98%	6,500	400	Fluorescencia	80	40.63
ACONDICIONAMIENTO COLADO	0.77%	250	200	Fluorescencia	80	0.78
SECADO	7.69%	2,500	200	Fluorescencia	80	7.81
ESMALTERIA	7.69%	2,500	500	Fluorescencia	80	19.53
HORNOS	9.99%	3,250	200	Fluorescencia	80	10.16
CONTROL FINAL	3.07%	1,000	500	Fluorescencia	80	7.81
OFICINAS	1.54%	500	500	Fluorescencia	80	3.91
ALMACEN	3.84%	1,250	200	Fluorescencia	80	3.91
SERVICIOS	28.98%	9,425	98.36		98	9.02
Compresores	0.31%	100	200	Fluorescencia	80	0.31
Calderas	0.08%	25	200	Fluorescencia	80	0.08
Taller mantenimiento	0.77%	250	300	Fluorescencia	80	1.17
Tolva pérdidas u machacadora	1.54%	500	100	Vapor Na AP	100	0.63
Sala bombas y OI	0.31%	100	200	Fluorescencia	80	0.31
ETAR	1.08%	350	100	Vapor Na AP	100	0.44
Caseta guardia	0.06%	20	300	Fluorescencia	80	0.09
Tratamiento de residuos	0.03%	10	100	Fluorescencia	80	0.02
Comedor	0.15%	50	200	Fluorescencia	80	0.16
Cocina	0.06%	20	200	Fluorescencia	80	0.06
Alumbrado exterior	23.06%	7,500	50	Vapor Na AP	100	4.69
Circuitos de toma corriente	0.00%					
Regadío	0.00%					
Estación eléctrica	0.46%	150	200	Fluorescencia	80	0.47
ERM Gas	0.15%	50	200	Vapor Na AP	100	0.13
Generador	0.15%	50	200	Fluorescencia	80	0.16
Depósito reserva agua	0.77%	250	100	Vapor Na AP	100	0.31
TOTAL ALUMBRADO=	100.00%	32,525				130.52

ANEXO III (Consumos térmicos)

GAS		COLADO EN MOLDES DE YESO											
500,000		pcs/año											
INSTALACION	Num. Equipos	P	P _{nom}	RUN	STOP	Coef. Uso	P _{media}	W _{dia}	W _{año}	Emissiones	C _{año}		
		(kw)	(kw)	(h)	(h)	f _u	(kw)	(kwh/día)	(kwh/año)	t _{CO2} /año		(€/año)	
DB01 PRIMERAS MATERIAS													
DB01-A	Molinos	2											
DB01-B	Cintas	7											
DB01-C	Bombas (Wilden)	3											
DB01-D	Tolvas	6											
	Sub-total primeras materias=		0				0	0	0	0	0		
DB02 PREPARACION PASTA													
DB02-A	Desleidores	2											
DB02-B	Tamices	6											
DB02-C	Bombas (Bredel)	3											
DB02-D	Tanques	7											
	Sub-total preparación pastas=		0				0	0	0	0	0		
DB03 PREPARACION ESMALTES													
DB03-A	Molinos	2											
DB03-B	Cintas	2											
DB03-C	Desleidores	2											
DB03-D	Tamices	3											
DB03-E	Bombas (Wilden)	2											
DB03-F	Tanques	18											
	Sub-total preparación esmaltes=		0				0	0	0	0	0		
DB04 MODELERIA Y MOLDES													
DB04-A	Secaderos de moldes	3	150	450	24	0.80	360	8,640	2,004,480	413	60,134		
DB04-B	Polipastos												
DB04-C	Preparación yeso												
DB04-D	Bombas (Wilden)												
	Sub-total modelería y moldes=		450				360	8,640	2,004,480	413	60,134		
DB05 COLADO													
DB05-A	Bancos												
DB05-C	Balsas												
DB05-D	Tanques												
DB05-E	Bombas (Wilden)												
	Sub-total colado=		0				0	0	0	0	0		
DB06 ACONDICIONAMIENTO COLADO													
DB06-A	Centrales acondicionamiento	1	800	800	24	0.70	560	13,440	3,118,080	643	93,542		
DB06-B	Ventiladores extractores												
	Sub-total acondicionamiento colado=		800				560	13,440	3,118,080	643	93,542		
DB07 SECADO													
DB07-A	Secaderos de piezas	2	400	800	24	0.75	600	14,400	3,340,800	689	100,224		
	Sub-total secaderos=		800				600	14,400	3,340,800	689	100,224		
DB08 ESMALTERIA													
DB08-A	Carruseles												
DB08-B	Cabinas esmaltado												
	Sub-total esmaltería=		0				0	0	0	0	0		
DB09 HORNOS													
DB09-A	Horno tunel	1	2150	2,150	24	1.00	2,150	51,600	15,480,000	3,193	464,400		
DB09-B	Horno intermitente	1	2500	2,500	20	0.68	1,709	34,180	10,254,000	2,115	307,620		
DB09-C	Cabinas 2º fuego												
	Sub-total hornos		4,650				3,859	85,780	25,734,000	5,308	772,020		
DB10 CONTROL FINAL													
DB10-A	Lineas control final												
DB10-B	Horno retractilado	1	400	400	8	16	0.25	100	800	240,000	50	7,200	
DB10-C	Mesas elevadoras												
	Sub-total control final=		400				100	800	240,000	50	7,200		
DB11 OFICINAS													
DB11-A	Puestos de trabajo												
DB11-B	NIC-servidor												
DB11-C	Aire acondicionado												
DB11-D	Otros												
	Sub-total oficinas=		0				0	0	0	0	0		
DB12 ALMACEN													
DB12-A	Oficina												
DB12-B	Carga baterías												
	Sub-total almacén=		0				0	0	0	0	0		
DB13 SERVICIOS													
DB13-A	Compresores												
DB13-B	Calderas	1	110	110	24	0.95	105	2,508	581,856	120	17,456		
DB13-C	Taller mantenimiento												
DB13-D	Tolva pérdidas u machacadora												
DB13-E	Sala bombas y Ol												
DB13-F	ETAR												
DB13-G	Caseta guardia												
DB13-H	Tratamiento de residuos												
DB13-I	Comedor												
DB13-J	Cocina	1	20	20	8	16	0.50	10	80	18,560	4	557	
DB13-K	Alumbrado exterior												
DB13-L	Circuitos de toma corriente												
DB13-M	Regadio												
DB13-N	Estación eléctrica												
DB13-O	ERM Gas												
DB13-P	Generador												
DB13-Q	Depósito reserva agua												
	Sub-total servicios=		130				115	2,588	600,416	124	18,012		
	TOTAL GAS		7,230				5,594	125,648	35,037,776	7,227	1,051,133		

ANEXO IV (Consumo aire comprimido)

	INSTALACION	AIRE COMPRIMIDO	COLADO EN MOLDES DE YESO				Coef. Uso	Q _{medio}	P _{media}	W _{dia}	W _{año}	Emisiones	
		500,000	pcs/año	Q _{aire}	Q _{nom}	RUN							STOP
		Num. Equipos	Nm ³ /h	Nm ³ /h	(h)	(h)							f _u
DB01	PRIMERAS MATERIAS												
DB01-A	Molinos	2	13	27	8	16	0.90	24	2	19	4,343	3	
DB01-B	Cintas	7											
DB01-C	Bombas (Wilden)	3	67	200	8	16	0.75	150	15	117	27,144	16	
DB01-D	Tolvas	6	13	80	8	16	0.60	48	5	37	8,686	5	
	Sub-total primeras materias=			307				222		173	40,174	24	
DB02	PREPARACION PASTA												
DB02-A	Desleidores	2	7	13	8	16	0.60	8	1	6	1,448	1	
DB02-B	Tamices	6	3	20	8	16	0.70	14	1	11	2,533	1	
DB02-C	Bombas (Bredel)	3											
DB02-D	Tanques	7	10	70	24	0	1.00	70	7	164	38,002	22	
	Sub-total preparación pastas=			103				92		181	41,983	25	
DB03	PREPARACION ESMALTES												
DB03-A	Molinos	2	7	13	8	16	0.90	12	1	9	2,172	1	
DB03-B	Cintas	2	3	7	8	16	0.50	3	0	3	603	0	
DB03-C	Desleidores	2	3	7	8	16	0.60	4	0	3	724	0	
DB03-D	Tamices	3	3	10	8	16	0.70	7	1	5	1,267	1	
DB03-E	Bombas (Wilden)	2	50	100	8	16	0.75	75	7	59	13,572	8	
DB03-F	Tanques	18	10	180	24	0	0.60	108	11	253	58,632	35	
	Sub-total preparación esmaltes=			317				209		332	76,970	45	
DB04	MODELERIA Y MOLDES												
DB04-A	Secaderos de moldes	3	7	20	24	0	0.90	18	2	42	9,772	6	
DB04-B	Polipastos	10	7	67	8	16	0.40	27	3	21	4,826	3	
DB04-C	Preparación yeso	1	17	17	8	16	0.90	15	1	12	2,714	2	
DB04-D	Bombas (Wilden)	3	50	150	8	16	0.75	113	11	88	20,358	12	
	Sub-total modelería y moldes=			253				172		162	37,670	22	
DB05	COLADO												
DB05-A	Bancos	30	33	1,000	8	16	0.60	600	59	468	108,578	64	
DB05-C	Balsas	2	7	13	8	16	0.60	8	1	6	1,448	1	
DB05-D	Tanques	2	10	20	24	0	1.00	20	2	47	10,858	6	
DB05-E	Bombas (Wilden)	4	67	267	8	16	0.75	200	20	156	36,193	21	
	Sub-total colado=			1,300				828		677	157,076	93	
DB06	ACONDICIONAMIENTO COLADO												
DB06-A	Centrales acondicionamiento	1	7	7	24	0	0.50	3	0	8	1,810	1	
DB06-B	Ventiladores extractores	6											
	Sub-total acondicionamiento colado=			7				3		8	1,810	1	
DB07	SECADO												
DB07-A	Secaderos de piezas	2	7	13	24	0	0.90	12	1	28	6,515	4	
	Sub-total secaderos=			13				12		28	6,515	4	
DB08	ESMALTERIA												
DB08-A	Carruseles	2	100	200	8	16	0.90	180	18	140	32,573	19	
DB08-B	Cabinas esmaltado	8	50	400	8	16	0.70	280	27	218	50,670	30	
	Sub-total esmallería=			600				460		359	83,243	49	
DB09	HORNOS												
DB09-A	Horno tunel	1	33	33	24	0	0.60	20	2	47	14,040	8	
DB09-B	Horno intermitente	1	17	17	20	4	0.60	10	1	20	5,850	3	
DB09-C	Cabinas 2° fuego	2	7	13	8	16	0.70	9	1	7	2,184	1	

ANEXO V (Consumo de agua)

CONSUMO AGUA Nº Piezas	COLADO MOLDES YESO 500,000 pcs/año			
	Proceso m3/día	Lavado m3/día	Total día m3/día	%
PRIMERAS MATERIAS		0	0.20	0.15%
PASTAS	21.52	0.50	22.02	16.56%
PREPARACION ESMALTE	2.39	0.50	2.89	2.17%
YESO	8.93	0.30	9.23	6.94%
COLADO	26.94	2.00	28.94	21.77%
ACONDICIONAMIENTO			0.00	0.00%
SECADO			0.00	0.00%
ESMALTERIA		2.00	2.00	1.50%
HORNOS			0.00	0.00%
CONTROL FINAL		0.20	0.20	0.15%
OFICINAS	0.38	0.10	0.48	0.36%
ALMACEN		0.25	0.25	0.19%
SERVICIOS	64.72	2.00	66.72	50.20%
TOTALES DIARIOS	124.87	8.05	132.92	100.00%
CONSUMO ANUAL	28,971	1,868	30,838 m³/año	

ANEXO VI (Ahorro por eficiencia de motores)

Ahorro eléctrico por eficiencia motores INSTALACION		Num. Equipos	Nº motores por equipo	Potencia motor -	AHORRO POR MEJORA EFICIENCIA MOTOR			Ahorro €/año	Precio _{E3} €	Precio _{E2} €	Inversión €	r _s años
ε _{E3} %	ε _{E2} %				Δε %							
DB01	PRIMERAS MATERIAS											
DB01-A	Molinos	2	1	110.0	0.96	0.94	0.02	766	11,514	10,650	1,728	2.26
DB01-B	Cintas	7	1	5.0	0.89	0.87	0.03	128	834	725	763	5.97
DB01-C	Bombas (Wilden)	3										
DB01-D	Tolvas	6	1	2.5	0.87	0.85	0.02	38	534	465	414	10.78
	Sub-total primeras materias=		3					932	12,882	11,840	2,905	3.12
DB02	PREPARACION PASTA											
DB02-A	Desleidores	2	1	125.0	0.96	0.94	0.02	580	13,931	12,870	2,122	3.66
DB02-B	Tamicas	6	1	1.5	0.85	0.83	0.03	34	452	394	348	10.12
DB02-C	Bombas (Bredel)	3	1	15.0	0.92	0.90	0.02	91	1,974	1,753	663	7.30
DB02-D	Tanques	7	1	15.0	0.92	0.90	0.02	1,271	1,974	1,753	1,547	1.22
	Sub-total preparación pastas=		4					1,976	18,331	16,770	4,680	2.37
DB03	PREPARACION ESMALTES											
DB03-A	Molinos	2	1	25.0	0.94	0.92	0.02	134	2,690	2,408	564	4.21
DB03-B	Cintas	2	1	5.0	0.89	0.87	0.03	26	834	725	218	8.36
DB03-C	Desleidores	2	1	30.0	0.94	0.92	0.02	107	3,341	3,016	650	6.06
DB03-D	Tamicas	3	1	1.5	0.85	0.83	0.03	17	452	394	174	10.12
DB03-E	Bombas (Wilden)	2										
DB03-F	Tanques	18	1	3.0	0.87	0.85	0.02	415	534	465	1,242	2.99
	Sub-total preparación esmaltes=		3					699	7,851	7,008	2,848	4.07
DB04	MODELERIA Y MOLDES											
DB04-A	Secaderos	3	7	5.0	0.89	0.87	0.03	1,478	834	725	2,289	1.55
DB04-B	Polipastos	10	1	1.8	0.85	0.83	0.03	38	452	394	580	15.18
DB04-C	Preparación yeso	1	2	2.5	0.86	0.84	0.03	24	534	465	138	5.68
DB04-D	Bombas (Wilden)	3										
	Sub-total modelería y moldes=							1,541	7,358	6,399	3,007	1.95
DB05	COLADO											
DB05-A	Bancos	30	40	0.5	0.80	0.76	0.05	6,682	230	201	34,800	5.21
DB05-C	Balsas	2	2	2.5	0.86	0.84	0.03	32	534	465	276	8.53
DB05-D	Tanques	2	1	25.0	0.94	0.92	0.02	447	2,690	2,408	564	1.26
DB05-E	Bombas (Wilden)	4										
	Sub-total colado=							7,161	12,958	11,378	35,640	4.98
DB06	ACONDICIONAMIENTO COLADO											
DB06-A	Centrales acondicionamiento	1	2	25.0	0.94	0.92	0.02	223	2,690	2,408	564	2.53
DB06-B	Ventiladores extractores	6	1	5.5	0.89	0.87	0.02	96	834	725	654	6.79
	Sub-total acondicionamiento colado=							320	6,214	5,541	1,218	3.81
DB07	SECADO											
DB07-A	Secaderos	2	15	3.7	0.77	0.73	0.05	2,882	204	178	780	0.27
	Sub-total secaderos=							2,882	3,060	2,670	780	0.27
DB08	ESMALTERIA											
DB08-A	Carruseles	2	10	4.5	0.89	0.87	0.02	340	639	557	1,640	4.83
DB08-B	Cabinas esmaltado	8	1	5.0	0.89	0.87	0.03	146	834	725	872	5.97
	Sub-total esmaltería=							486	7,224	6,295	2,512	5.17
DB09	HORNOS											
DB09-A	Horno tunel	1	5	25.0	0.94	0.92	0.02	866	2,690	2,408	1,410	1.63
DB09-B	Horno intermitente	1	5	20.0	0.94	0.92	0.02	578	2,690	2,408	1,410	2.44
DB09-C	Cabinas 2º fuego	2	1	5.0	0.89	0.87	0.03	47	834	725	218	4.62
	Sub-total hornos							1,491	27,734	24,805	3,038	2.04

ANEXO VII (Ahorro por variación de frecuencia)

INSTALACION	Num. Equipos	Nº motores por equipo	AHORRO POR VARIACION FRECUENCIA				Inversión €	r _s años
			Potencia motor -	Δn %	Ahorro €/año	Precio _{variador} €		
DB01 PRIMERAS MATERIAS								
DB01-A Molinos	2	1	110.0	10.00%	3,675	15,000	30,000	8.16
DB01-B Cintas	7							
DB01-C Bombas (Wilden)	3							
DB01-D Tolvas	6							
Sub-total primeras materias=		1			3,675	15,000	30,000	8.16
DB02 PREPARACION PASTA								
DB02-A Desleidores	2	1	125.0	10.00%	7,545	20,000	40,000	5.30
DB02-B Tamices	6							
DB02-C Bombas (Bredel)	3	1	15.0	10.00%	1,132	2,467	7,401	6.54
DB02-D Tanques	7	1	15.0	10.00%	15,844	2,467	17,269	1.09
Sub-total preparación pastas=		3			24,520	24,934	64,670	2.64
DB03 PREPARACION ESMALTES								
DB03-A Molinos	2	1	25.0	10.00%	2,263	3,929	7,858	3.47
DB03-B Cintas	2							
DB03-C Desleidores	2	1	30.0	10.00%	1,811	3,929	7,858	4.34
DB03-D Tamices	3							
DB03-E Bombas (Wilden)	2							
DB03-F Tanques	18	1	3.0	10.00%	4,889	1,057	19,026	3.89
Sub-total preparación esmaltes=		3			8,963	8,915	34,742	3.88
DB04 MODELERIA Y MOLDES								
DB04-A Secaderos	3							
DB04-B Polipastos	10							
DB04-C Preparación yeso	1							
DB04-D Bombas (Wilden)	3							
Sub-total modelería y moldes=		0			0	0	0	#DIV/0!
DB05 COLADO								
DB05-A Bancos	30							
DB05-C Balsas	2	2	2.5	10.00%	302	1,057	4,228	14.01
DB05-D Tanques	2	1	25.0	10.00%	7,545	3,929	7,858	1.04
DB05-E Bombas (Wilden)	4							
Sub-total colado=		3			7,846	6,043	12,086	1.54
DB06 ACONDICIONAMIENTO COLADO								
DB06-A Centrales acondicionamiento	1	2	25.0	10.00%	3,772	3,929	7,858	2.08
DB06-B Ventiladores extractores	6							
Sub-total acondicionamiento colado=		2			3,772	7,858	7,858	2.08
DB07 SECADO								
DB07-A Secaderos	2	15	4	10.00%	14,938	1,751	52,530	3.52
Sub-total secaderos=		15			14,938		52,530	3.52
DB08 ESMALTERIA								
DB08-A Carruseles	2							
DB08-B Cabinas esmaltado	8							
Sub-total esmalteria=		0			0	0	0	#DIV/0!
DB09 HORNOS								
DB09-A Horno tunel	1	5	25.0	10.00%	14,634	3,929	19,645	1.34
DB09-B Horno intermitente	1	5	20.0	10.00%	9,756	3,382	16,910	1.73
DB09-C Cabinas 2º fuego	2							
Sub-total hornos		10			24,390	36,555	36,555	1.50

ANEXO VIII (Ahorro por alumbrado LED)

NIVELES ILUMINACION	ALUMBRADO LED								
	P CONVENCIONAL kW	C convencional €/w	C convencional €	eficiencia lm/W	P LED kW	C LED €/w	C LED €	Ahorro €/yr	r _s años
PRIMERAS MATERIAS	3.38	0.1240	419	140	2.41	0.4333	1,045	178.97	3.50
PREPARACION PASTA	2.50	0.1240	310	140	1.79	0.4333	774	132.57	3.50
PREPARACION ESMALTES	3.52	0.0612	215	120	2.34	0.3750	879	217.50	3.05
MODELERIA Y MOLDES	17.58	0.0612	1,076	120	11.72	0.3750	4,395	1,087.50	3.05
COLADO	40.63	0.0612	2,487	120	27.08	0.3750	10,156	2,513.33	3.05
ACONDICIONAMIENTO COLADO	0.78	0.0612	48	120	0.52	0.3750	195	48.33	3.05
SECADO	7.81	0.0612	478	120	5.21	0.3750	1,953	483.33	3.05
ESMALTERIA	19.53	0.0612	1,196	120	13.02	0.3750	4,883	1,208.33	3.05
HORNOS	10.16	0.0612	622	120	6.77	0.3750	2,539	628.33	3.05
CONTROL FINAL	7.81	0.0612	478	120	5.21	0.3750	1,953	483.33	3.05
OFICINAS	3.91	0.0612	239	120	2.60	0.3750	977	241.67	3.05
ALMACEN	3.91	0.0612	239	120	2.60	0.3750	977	241.67	3.05
SERVICIOS	9.02	0.1013	913	134	6.31	0.4159	2,622	503	3.40
Compresores	0.31	0.0612	19	120	0.21	0.3750	78	19.33	3.05
Calderas	0.08	0.0612	5	120	0.05	0.3750	20	4.83	3.05
Taller mantenimiento	1.17	0.0612	72	120	0.78	0.3750	293	72.50	3.05
Tolva pérdidas u machacadora	0.63	0.1240	78	140	0.45	0.4333	193	33.14	3.50
Sala bombas y OI	0.31	0.0612	19	120	0.21	0.3750	78	19.33	3.05
ETAR	0.44	0.0612	27	140	0.31	0.4333	135	23.20	4.68
Caseta guardia	0.09	0.0612	6	120	0.06	0.3750	23	5.80	3.05
Tratamiento de residuos	0.02	0.0612	1	120	0.01	0.3750	4	0.97	3.05
Comedor	0.16	0.0612	10	120	0.10	0.3750	39	9.67	3.05
Cocina	0.06	0.0612	4	120	0.04	0.3750	16	3.87	3.05
Alumbrado exterior	4.69	0.1240	581	140	3.35	0.4333	1,451	248.57	3.50
Circuitos de toma corriente									
Regadio									
Estación eléctrica	0.47	0.0612	29	120	0.31	0.3750	117	29.00	3.05
ERM Gas	0.13	0.1240	16	140	0.09	0.4333	39	6.63	3.50
Generador	0.16	0.0612	10	120	0.10	0.3750	39	9.67	3.05
Depósito reserva agua	0.31	0.1240	39	140	0.22	0.4333	97	16.57	3.50
TOTAL ALUMBRADO=	130.52		8,721		87.58	0.3807	33,347	7,968	3.09

ANEXO IX (Ahorro por regulación lumínica)

AHORRO POR REGULACION LUMINICA					
NIVELES ILUMINACION	C _{regulacion} €	f _{presencia} -	f _{exterior} -	Ahorro €/yr	r _s años
PRIMERAS MATERIAS	261	0.10	0.10	85.01	3.07
PREPARACION PASTA	193	0.10	0.10	62.97	3.07
PREPARACION ESMALTES	220	0.10	0.10	82.65	2.66
MODELERIA Y MOLDES	1,099	0.10	0.10	413.25	2.66
COLADO	2,539	0.10	0.10	955.07	2.66
ACONDICIONAMIENTO COLADO	49	0.10	0.10	18.37	2.66
SECADO	488	0.10	0.10	183.67	2.66
ESMALTERIA	1,221	0.10	0.10	459.17	2.66
HORNOS	635	0.10	0.10	238.77	2.66
CONTROL FINAL	488	0.10	0.10	183.67	2.66
OFICINAS	244	0.10	0.10	91.83	2.66
ALMACEN	244	0.10	0.10	91.83	2.66
SERVICIOS	656	0.10	0.10	222	2.95
Compresores	20	0.10	0.10	7.35	2.66
Calderas	5	0.10	0.10	1.84	2.66
Taller mantenimiento	73	0.10	0.10	27.55	2.66
Tolva pérdidas u machacadora	48	0.10	0.10	15.74	3.07
Sala bombas y OI	20	0.10	0.10	7.35	2.66
ETAR	34	0.10	0.10	11.02	3.07
Caseta guardia	6	0.10	0.10	2.20	2.66
Tratamiento de residuos	1	0.10	0.10	0.37	2.66
Comedor	10	0.10	0.10	3.67	2.66
Cocina	4	0.10	0.10	1.47	2.66
Alumbrado exterior	363	0.10	0.10	118.07	3.07
Circuitos de toma corriente					
Regadío					
Estación eléctrica	29	0.10	0.10	11.02	2.66
ERM Gas	10	0.10	0.10	3.15	3.07
Generador	10	0.10	0.10	3.67	2.66
Depósito reserva agua	24	0.10	0.10	7.87	3.07
TOTAL ALUMBRADO=	8,337			3,089	2.70

	TECNICAS DE AHORRO DE ENERGIA EN LAS FABRICAS DE SANITARIO	Enero 2019
		CF-0.5M-P-02
		Rev. 02

ANEXO X (Cálculo secadero moldes)



HUMEDAD A ELIMINAR		
Contenido agua barbotina	0.2854	Kg _a /Kg _b
Peso medio pieza	20	kg
Humedad barbotina	40%	
Humedad desmoldeo	23%	
Agua que absorbe el molde	3.4	kg/pieza
Densidad real yeso	2,600	kg/m ³
Densidad molde	991	kg/m ³
Porosidad	61.88%	
PERDIDAS POR CONDUCCION		
Largo secadero	6	
Ancho secadero	6	
Alto secadero	4	
"U" coeficiente de transmisión térmica del panel	2.83	w/m ² °C
T ^a Ambiente	22	°C
T ^a Secadero	60	°C
Ciclo	7	dias
Energía pérdidas	10,926,752	kJ
Potencia pérdidas por transmisión térmica	18	kW
POTENCIA PARA EVAPORAR		
N ^a moldes en el secadero	80	moldes
Volumen molde	0.231	m ³
Densidad del molde	991	kg/m ³
Ce molde	0.8	kJ/kg/k
Masa molde	229	kg
Relación agua/yeso en el molde	1.3256	
Masa de agua a evaporar	24,276	kg
Caudal masico de agua evaporada	145	kg/h
Calor vaporización	2,384	KJ/kg
Energía para vaporizar el agua	57,868,810	kJ
Potencia vaporizar agua	96	kW
POTENCIA PARA CALENTAR EL AIRE		
Aire necesario para evaporar el agua	212,370	kg
Caudal másico aire	1,264	kg/h
Energía para calentar el aire de evaporación	8,070,048	kJ
Potencia calentar aire evaporación	13	kW
Potencia térmica total	127	kW

ANEXO XI (Curva horno intermitente)

		CURVA HORNO INTERMITENTE																									
	Etapa	t _{in}	t _{fin}	t _{etapa}	t _{acumulado}	T _{in}	T _{fin}	T _{media}	Q _{ng}		Q _{suelo}	Q _{paredes}	Q _{techo}	Q _{piezas}	Q _{superestructura}	Q _{vagonetas}	Q _{difusion}		Q _{inyeccion}		Q _{enfriamiento}		Q _{combustion}				
		min	min	min	min	°C	°C	°C	kW	kg/s	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kg/s	kg/s	kg/s	kg/s	kW	kg/s	kW	kg/s		
CALENTAMIENTO	1	0	39	39	39	30	150	90	1,109	0.023	5	26	4	366	299	276	77	0.856	17	0.191					38	0.397	
	2	39	103	64	103	150	290	220	1,031	0.021	15	82	14	260	213	191	126	0.567	42	0.191					87	0.369	
	3	103	168	65	168	290	480	385	1,560	0.033	28	153	26	348	284	224	189	0.477	75	0.191					234	0.558	
	4	168	193	25	193	480	520	500	1,532	0.032	37	202	35	190	155	278	234	0.450	99	0.191					301	0.548	
	5	193	318	125	318	520	650	585	1,292	0.027	43	239	41	124	101	79	249	0.405	117	0.191					300	0.462	
	6	318	333	15	333	650	700	675	2,278	0.047	50	278	48	396	324	302	129	0.180	136	0.191					616	0.815	
	7	333	361	28	361	700	830	765	2,611	0.054	57	316	54	552	451	373									807	0.934	
	8	361	393	32	393	830	960	895	2,677	0.056	68	372	64	483	395	315										980	0.958
	9	393	414	21	414	960	1,035	998	2,802	0.058	76	416	72	425	347	313										1,154	1.002
	10	414	449	35	449	1,035	1,130	1,083	2,580	0.054	83	453	78	323	264	219										1,161	0.923
	11	449	473	24	473	1,130	1,180	1,155	2,483	0.052	88	484	83	248	202	178										1,199	0.888
	12	473	493	20	493	1,180	1,200	1,190	1,983	0.041	91	499	86	119	97	102										990	0.709
	13	493	511	18	511	1,200	1,205	1,203	1,629	0.034	92	505	87	33	27	63										822	0.582
	14	511	535	24	535	1,205	1,206	1,206	1,383	0.029	92	506	87	5	4	-11										700	0.494
ENFRIAMIENTO	15	535	545	10	545	1,206	1,100	1,153			87	483	83	-1,261	-1,030	-807	287	0.225	243	0.191	1,926	1.549					
	16	545	557	12	557	1,100	1,010	1,055			79	441	76	-892	-729	-567	573	0.495	220	0.191	819	0.727					
	17	557	566	9	566	1,010	960	985			74	411	71	-661	-540	-545	580	0.540	205	0.191	427	0.410					
	18	566	605	39	605	960	750	855			63	355	61	-640	-523	-423	498	0.540	176	0.191	457	0.513					
	19	605	645	40	645	750	630	690			50	284	49	-357	-292	-291	198	0.270	139	0.191	234	0.333					
	20	645	735	90	735	630	500	565			41	230	40	-172	-140	-112	27	0.045	113	0.191	-19	-0.034					
	21	735	755	20	755	500	450	475			33	191	33	-297	-243	-230	155	0.315	94	0.191	279	0.603					
	22	755	785	30	785	450	310	380			26	151	26	-555	-453	-398	246	0.630	74	0.191	908	2.524					
	23	785	840	55	840	310	205	258			16	98	17	-227	-186	-180	188	0.721	50	0.191	251	1.083					
	24	840	910	70	910	205	120	163			9	57	10	-144	-118	-118	118	0.721	31	0.191	182	1.361					

ANEXO XII (Planta fotovoltaica)

PLANTA FOTOVOLTAICA		
Superficie techos	m ²	23,100
Consumo		
Energia anual	kWh/año	7,277,798
Coste anual	€/año	727,780
P_max global	kW	2,466
Planta		
a_placa	m	1.956
b_placa	m	0.992
S_placa	m ²	1.940
P_placa	W	300
peso placa	kg/placa	26
peso estructura	kg/placa	29
Sobrecarga cubierta	kg/m ²	37
Latitud	º	39.81
a_proyectada		1.503
S_proyectada	m ²	1.490
rendimiento		17.89%
Factor ocupacion		0.35
Nº de placas teórico		15,499
Nº de placas real		5,425
Potencia	kW	1,628
Radiacion	kWh/m ² ·dia	4.60
Energía generada	kWh/año	2,009,724

Tesis Doctoral		 
Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales		
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuviella Suárez	10/03/2021	Página 230 de 231

ANEXO XXV: “Optimización de los consumos de agua y energía en la Industria Cerámica Sanitaria y la Reducción de Emisiones de CO₂” COPIA DEL DOCUMENTO

INTRODUCCION

- Fábrica tipo
 - Modelización
 - Comparación
- Oportunidades ahorro
 - Electricidad
 - Gas (caracterización)
 - Otras (agua)
- Optimización fábrica

MODELO FABRICA PARA EL ESTUDIO

- **Parámetros operación**
- **Equipos necesarios**
- **Consumos calculados por análisis**
- **Comparación con datos reales**
- **Comparativa para equipos de nueva adquisición.**

MODELO FABRICA PARA EL ESTUDIO

PARAMETROS PRODUCCION	
Días laborables=	232 días/año
Días horno=	300 días/año
Turnos=	1 turnos/día
Horas/turno=	8 h/turno
Peso medio pieza=	20 kg
Producción=	500,000 pcs/año
Rendimiento global=	80.0%
Rendimiento colado=	95.0%
Rendimiento horno=	84.2%
Precio electricidad=	0.10 €/kWh
Precio gas=	0.03 €/kWh
Precio agua=	2.00 €/m ³

MODELO FABRICA PARA EL ESTUDIO

(Equipos necesarios)

PRIMERAS MATERIAS

- 2 Molinos
- 7 Cintas
- 3 Bombas (Neumáticas)
- 6 Tolvas

PREPARACION PASTA

- 2 Desleidores
- 6 Tamices
- 3 Bombas (Eléctricas)
- 7 Tanques

PREPARACION ESMALTES

- 2 Molinos
- 2 Cintas
- 2 Desleidores
- 3 Tamices
- 3 Bombas (Neumáticas)
- 18 Tanques

MODELERIA Y MOLDES

- 3 Secadero de moldes
- 10 Polipastos
- 1 Preparación yeso
- 3 Bombas (Neumáticas)

MODELO FABRICA PARA EL ESTUDIO

(Equipos necesarios)

COLADO

- 30 Bancos
- 2 Balsas
- 2 Tanques
- 4 Bombas (Neumáticas)

ESMALTADO

- 2 Carruseles
- 8 Cabinas esmaltado

CONTROL FINAL

- 4 Líneas control final
- 1 Horno retractilado
- 4 Mesas elevadoras

ACONDICIONAMIENTO

- 1 Central acondicionamiento
- 6 Ventiladores extractores

SECADO

- 2 Secaderos piezas

HORNOS

- 1 Horno túnel
- 1 Horno intermitente
- 2 Cabinas 2º fuego

MODELO FABRICA PARA EL ESTUDIO

(Equipos necesarios)

OFICINAS

- 15 Puestos de trabajo
- 1 NIC Servidor
- 10 Unidades aire acondicionado
- Otros

ALMACEN

- 1 Oficina (PC, Printer, etc)
- 5 Cargadores baterías

SERVICIOS

- 2 Compresores
- 1 Caldera
- Taller mantenimiento
- Tolva pérdidas + machacadora
- Sala bombas y O.I.
- ETAR (Depuradora)
- Caseta seguridad
- Tratamiento residuos
- Comedor + cocina
- Alumbrado exterior
- Circuitos toma corriente
- Regadío
- Estación eléctrica
- ERM gas
- 1 Generador
- 1 Depósito reserva agua

MODELO FABRICA PARA EL ESTUDIO

(Consumos calculados por análisis)

CONSUMOS					
Nº Piezas	COLADO MOLDES YESO 500,000 pcs/año				
	ELECTRICIDAD kWh/año	GAS kWh/año	AIRE COMPRESIDO kWh/año	AGUA m3/año	
PRIMERAS MATERIAS	429,664		40,174	46	
PREPARACION PASTA	916,493		41,983	5,108	
PREPARACION ESMALTES	345,866		76,970	671	
MODELERIA Y MOLDES	547,520	2,004,480	37,670	2,141	
COLADO	1,625,856		157,076	6,714	
ACONDICIONAMIENTO COLADO	182,074	3,118,080	1,810		
SECADO	551,232	3,340,800	6,515		
ESMALTERIA	202,304		83,243	464	
HORNOS	916,800	25,734,000	22,074		
CONTROL FINAL	82,800	240,000	24,882	46	
OFICINAS	112,288		0	110	
ALMACEN	28,304		0	58	
SERVICIOS	1,336,598	600,416	6,454	15,480	
TOTAL ENERGIA=	7,277,798	35,037,776	498,851	30,838	

MODELO FABRICA PARA EL ESTUDIO

(Comparación del análisis vs. datos Settat 2)

	ELECTRICIDAD kWh/año	GAS kWh/año	AIRE COMPRIMIDO kWh/año	AGUA m3/año
Estimación analítica=	7,277,798	35,037,776	498,851	30,838
Datos Settat 2 ^(*) =	6,371,404	39,772,230	2,547,046	15,157

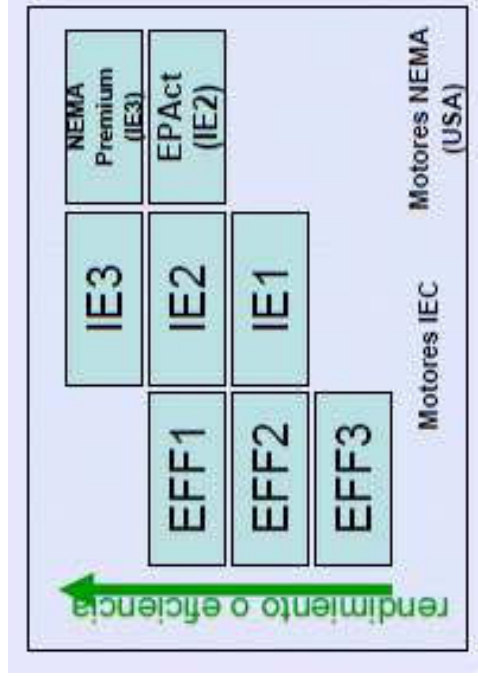
(*) Valores 2017. Sin considerar agua de ósmosis ni de fórmulas

OPORTUNIDADES REDUCCION ENERGIA/AGUA

- **Reducción electricidad**
 - Mejora eficiencia motores
 - Variación de frecuencia
 - Iluminación LED
 - Regulación y control
- **Reducción gas**
 - Mejora de aislamientos
 - Regulación higro-térmica
 - Recuperación térmica de aire residual de hornos
 - Precalentamiento aires de horno
 - Quemadores pulsantes
 - Control de la regulación óptima
 - Carga adecuada
 - Soportes SiC vs. Cordierita
 - Catalizadores magnéticos
 - Recuperación térmica en compresores
- **Otras**
 - Mantenimiento preventivo redes
 - Energías alternativas (fotovoltaica)
 - Cogeneración convencional
 - Cogeneración con COR
- **Reducción agua**
 - Reutilización via O.I. o M.E.D.
 - Condensación con enfriadora de absorción

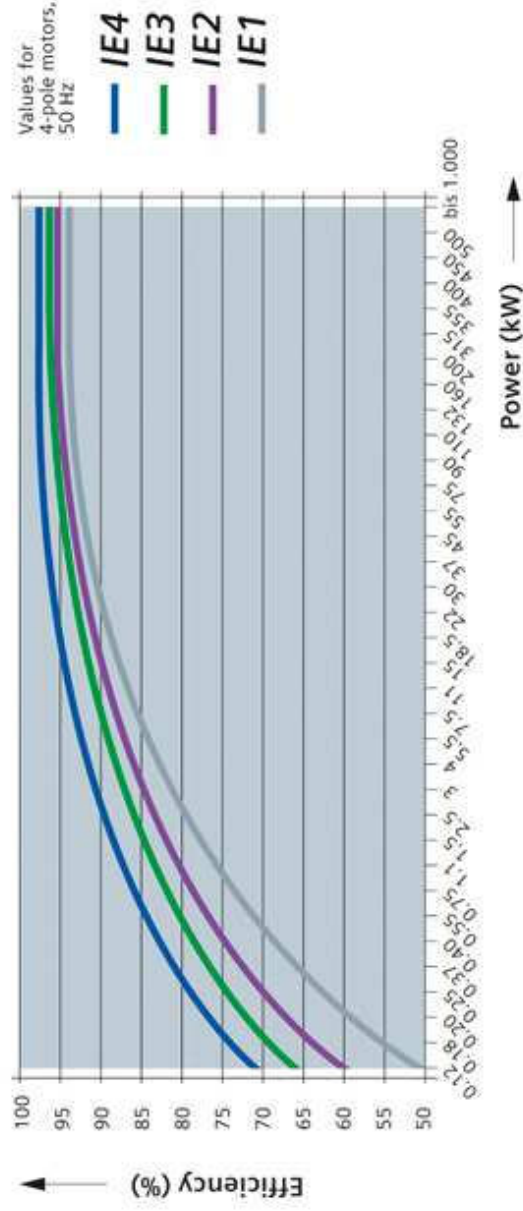
REDUCCION ELECTRICIDAD

MEJORA EFICIENCIA MOTORES



- **NORMATIVA**

Desde 2017 la norma IEC 60034-30 establece que los motores todos los motores entre 0.75 y 375 kW deben ser de eficiencia IE3 ó IE2 dotados de variador de frecuencia.



$$P = P_{IE2} \cdot \eta_{IE2} = P_{IE3} \cdot \eta_{IE3}$$

$$\Delta P = P_{IE2} - P_{IE3} = P_{IE2} \cdot \left(1 - \frac{\eta_{IE2}}{\eta_{IE3}} \right)$$

- P : Potencia necesaria
- P_{IE2} : Potencia motor IE2
- P_{IE3} : Potencia motor IE3
- η_{IE2} : Rendimiento motor IE2
- η_{IE3} : Rendimiento motor IE3
- ΔP : Disminución potencia

REDUCCION ELECTRICIDAD

MEJORA EFICIENCIA MOTORES

IE3 vs. IE2

Ahorro eléctrico por eficiencia motores		Inversión	Ahorro	r_s
		€	€/año	años
INSTALACION				
DB01	PRIMERAS MATERIAS	2,905	932	3.12
DB02	PREPARACION PASTA	4,680	1,976	2.37
DB03	PREPARACION ESMALTES	2,848	699	4.07
DB04	MODELERIA Y MOLDES	3,007	1,541	1.95
DB05	COLADO	35,640	7,161	4.98
DB06	ACONDICIONAMIENTO COLADO	1,218	320	3.81
DB07	SECADO	780	2,882	0.27
DB08	ESMALTERIA	2,512	486	5.17
DB09	HORNOS	3,038	1,491	2.04
DB10	CONTROL FINAL	1,679	336	4.99
DB11	OFICINAS	1,380	97	14.21
DB12	ALMACEN	0	0	
DB13	SERVICIOS	7,602	1,959	3.88
TOTAL EFICIENCIA MOTOR		67,289	19,879	3.38

$$A = \Delta P \cdot N_h \cdot p_{el}$$

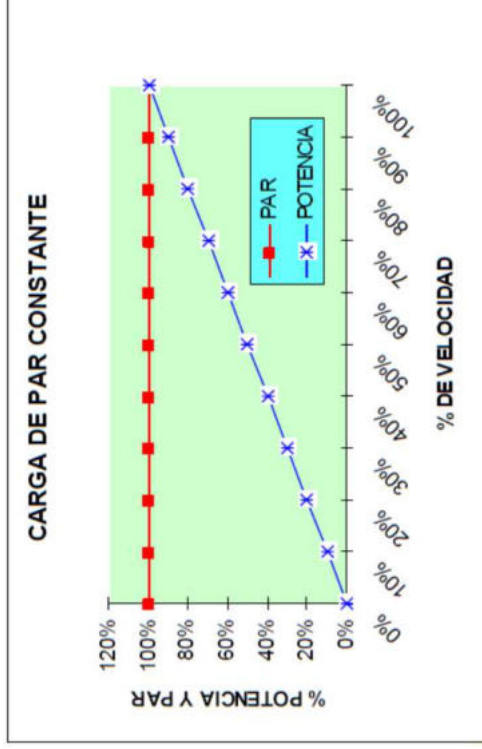
$$I = N_m \cdot (C_{IE3} - C_{IE2})$$

$$r_s = \frac{I}{A}$$

- A : Ahorro
- ΔP : Disminución potencia
- N_h : Número de horas anuales
- p_{el} : Precio electricidad
- I : Inversión
- N_m : Número de motores
- C_{IE3} : Coste motor IE3
- C_{IE2} : Coste motor IE2
- r_s : Retorno simple

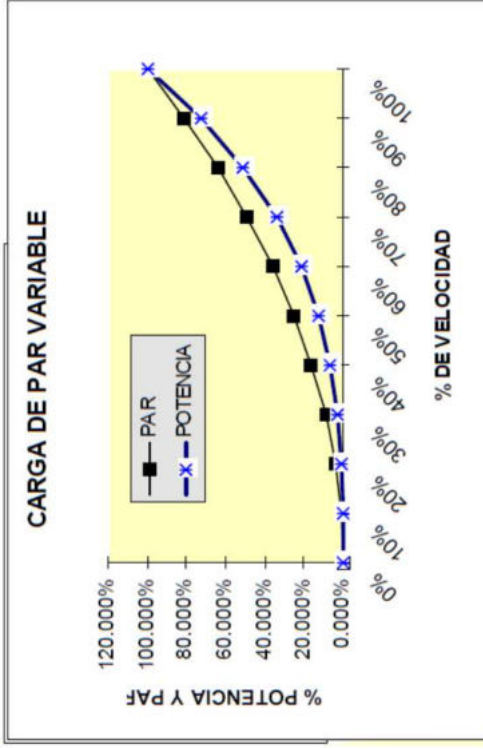
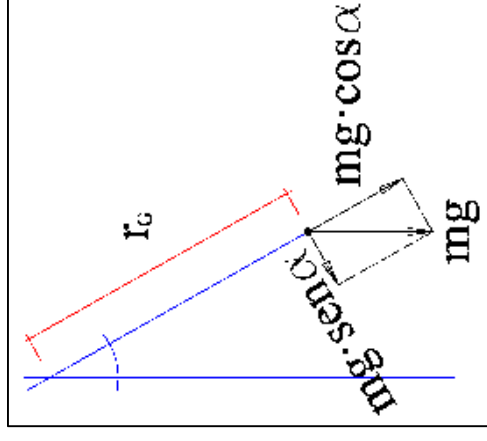
REDUCCION ELECTRICIDAD

VARIACION DE FRECUENCIA



Para el molino, el par es constante por lo que la potencia es función lineal de la velocidad. Bajando la velocidad baja linealmente la potencia, pero no se puede pasar por debajo de la velocidad mínima de molienda.

$$\Delta P = P \cdot (1 - (1 - \Delta n)^3)$$



Para el bombas y ventiladores, el par es cuadrático respecto a la velocidad por lo que la potencia es función cúbica de la velocidad. Bajando la velocidad baja linealmente la potencia, pero no se puede pasar por debajo de la velocidad mínima de molienda.

$$\Delta P = P \cdot (1 - (1 - \Delta n)^3)$$

$$A = \Delta P \cdot W_{\text{año}} \cdot p_{el}$$

- ΔP : Variación potencia
- Δn : Variación velocidad
- $W_{\text{año}}$: Energía anual
- p_{el} : Precio electricidad

REDUCCION ELECTRICIDAD

VARIACION DE FRECUENCIA

Ahorros para un 10% de disminución de velocidad

AHORRO POR VARIACION f		Inversion	Ahorro	r_s
		€	€/año	años
INSTALACION				
DB01	PRIMERAS MATERIAS	30,000	3,675	8.16
DB02	PREPARACION PASTA	64,670	24,520	2.64
DB03	PREPARACION ESMALTES	34,742	8,963	3.88
DB04	MODELERIA Y MOLDES	0	0	
DB05	COLADO	12,086	7,846	1.54
DB06	ACONDICIONAMIENTO COLADO	7,858	3,772	2.08
DB07	SECADO	52,530	14,938	3.52
DB08	ESMALTERIA	0	0	
DB09	HORNOS	36,555	24,390	1.50
DB10	CONTROL FINAL	0	0	
DB11	OFICINAS	5,000	905	5.52
DB12	ALMACEN	0	0	
DB13	SERVICIOS	113,380	36,555	3.10
TOTAL VARIACION FRECUENCIA		356,821	125,566	2.84

$$A = \Delta P \cdot N_h \cdot p_{el}$$

$$I = N_v \cdot C_v$$

$$r_s = \frac{I}{A}$$

- A : Ahorro
- ΔP : Disminución potencia
- N_h : Número de horas anuales
- p_{el} : Precio electricidad
- I : Inversión
- N_v : Número de variadores
- C_v : Coste variador
- r_s : Retorno simple

REDUCCION ELECTRICIDAD

SUBSTITUCION CONVENCIONAL POR LED

ILUMINACION NECESARIA

NIVELES ILUMINACION	ALUMBRADO CONVENCIONAL				ALUMBRADO CONVENCIONAL P _{convencional} KW	
	%	S m ²	lux	eficiencia lm/W		
PRIMERAS MATERIAS	4.15%	1,350	200	Vapor Na AP	100	3.38
PREPARACION PASTA	3.07%	1,000	200	Vapor Na AP	100	2.50
PREPARACION ESMALTES	2.31%	750	300	Fluorescencia	80	3.52
MODELERIA Y MOLDES	6.92%	2,250	500	Fluorescencia	80	17.58
COLADO	19.98%	6,500	400	Fluorescencia	80	40.63
ACONDICIONAMIENTO COLADO	0.77%	250	200	Fluorescencia	80	0.78
SECADO	7.69%	2,500	200	Fluorescencia	80	7.81
ESMALTERIA	7.69%	2,500	500	Fluorescencia	80	19.53
HORNOS	9.99%	3,250	200	Fluorescencia	80	10.16
CONTROL FINAL	3.07%	1,000	500	Fluorescencia	80	7.81
OFICINAS	1.54%	500	500	Fluorescencia	80	3.91
ALMACEN	3.84%	1,250	200	Fluorescencia	80	3.91
SERVICIOS	28.98%	9,425	98.36		98	9.02
Compresores	0.31%	100	200	Fluorescencia	80	0.31
Calderas	0.08%	25	200	Fluorescencia	80	0.08
Taller mantenimiento	0.77%	250	300	Fluorescencia	80	1.17
Tolva pérdidas u machacadora	1.54%	500	100	Vapor Na AP	100	0.63
Sala bombas y OI	0.31%	100	200	Fluorescencia	80	0.31
ETAR	1.08%	350	100	Vapor Na AP	100	0.44
Caseta guardia	0.06%	20	300	Fluorescencia	80	0.09
Tratamiento de residuos	0.03%	10	100	Fluorescencia	80	0.02
Comedor	0.15%	50	200	Fluorescencia	80	0.16
Cocina	0.06%	20	200	Fluorescencia	80	0.06
Alumbrado exterior	23.06%	7,500	50	Vapor Na AP	100	4.69
Circuitos de toma corriente	0.00%					
Regadío	0.00%					
Estación eléctrica	0.46%	150	200	Fluorescencia	80	0.47
ERM Gas	0.15%	50	200	Vapor Na AP	100	0.13
Generador	0.15%	50	200	Fluorescencia	80	0.16
Depósito reserva agua	0.77%	250	100	Vapor Na AP	100	0.31
TOTAL ALUMBRADO=	100.00%	32,525				130.52

Características	FLUORESCENCIA			DESCARGA		
	η	c	η	c	η	c
de alumbrados	Lm/W	€/W	Lm/W	€/W	Lm/W	€/W
Convencional	80	0.0612	120	0.124		
LED	100	0.375	140	0.4333		

$$Luz = P_{con} \cdot \eta_{con} = P_{led} \cdot \eta_{led}$$

$$\Delta P = P_{con} - P_{led} = P_{con} - P_{con} \cdot \frac{\eta_{con}}{\eta_{led}} = P_{con} \cdot \left(1 - \frac{\eta_{con}}{\eta_{led}}\right)$$

$$A = \Delta P \cdot N_h \cdot p_{el}$$

$$I = P_{led} \cdot C_{led} - P_{con} \cdot C_{con} = P_{con} \cdot \left(\frac{\eta_{con}}{\eta_{led}} \cdot C_{led} - C_{con}\right)$$

- P_{con} , P_{led} : Potencias
- η_{con} , η_{led} : Rendimientos
- A : Ahorr \square
- ΔP : Disminución potencia
- N_h : Númer \square de h \square ras anuales
- p_{el} : Precio electricidad
- I : Inversión
- C_{con} , C_{led} : costes
- r_s : Retorno simple

REDUCCION ELECTRICIDAD

SUBSTITUCION CONVENCIONAL POR LED

RESULTADOS GLOBALES

$$r_s = \frac{I}{A}$$

NIVELES ILUMINACION	ALUMBRADO CONVENCIONAL					ALUMBRADO LED					r _s años
	P kW	C _{convencional} €/W	C _{convencional} €	eficiencia lm/W	P _{LED} kW	C _{LED} €/W	C _{LED} €	Ahorro €/yr	r _s años		
PRIMERAS MATERIAS	3.38	0.1240	419	140	2.41	0.4333	1,045	178.97	3.50		
PREPARACION PASTA	2.50	0.1240	310	140	1.79	0.4333	774	132.57	3.50		
PREPARACION ESMALTES	3.52	0.0612	215	120	2.34	0.3750	879	217.50	3.05		
MODELERIA Y MOLDES	17.58	0.0612	1,076	120	11.72	0.3750	4,395	1,087.50	3.05		
COLADO	40.63	0.0612	2,487	120	27.08	0.3750	10,156	2,513.33	3.05		
ACONDICIONAMIENTO COLADO	0.78	0.0612	48	120	0.52	0.3750	195	48.33	3.05		
SECADO	7.81	0.0612	478	120	5.21	0.3750	1,953	483.33	3.05		
ESMALTERIA	19.53	0.0612	1,196	120	13.02	0.3750	4,883	1,208.33	3.05		
HORNOS	10.16	0.0612	622	120	6.77	0.3750	2,539	628.33	3.05		
CONTROL FINAL	7.81	0.0612	478	120	5.21	0.3750	1,953	483.33	3.05		
OFICINAS	3.91	0.0612	239	120	2.60	0.3750	977	241.67	3.05		
ALMACEN	3.91	0.0612	239	120	2.60	0.3750	977	241.67	3.05		
SERVICIOS	9.02	0.1013	913	134	6.31	0.4159	2,622	503	3.40		
Compresores	0.31	0.0612	19	120	0.21	0.3750	78	19.33	3.05		
Calderas	0.08	0.0612	5	120	0.05	0.3750	20	4.83	3.05		
Taller mantenimiento	1.17	0.0612	72	120	0.78	0.3750	293	72.50	3.05		
Tolva pérdidas u machacadora	0.63	0.1240	78	140	0.45	0.4333	193	33.14	3.50		
Sala bombas y OI	0.31	0.0612	19	120	0.21	0.3750	78	19.33	3.05		
ETAR	0.44	0.0612	27	140	0.31	0.4333	135	23.20	4.68		
Caseta guardia	0.09	0.0612	6	120	0.06	0.3750	23	5.80	3.05		
Tratamiento de residuos	0.02	0.0612	1	120	0.01	0.3750	4	0.97	3.05		
Comedor	0.16	0.0612	10	120	0.10	0.3750	39	9.67	3.05		
Cocina	0.06	0.0612	4	120	0.04	0.3750	16	3.87	3.05		
Alumbrado exterior	4.69	0.1240	581	140	3.35	0.4333	1,451	248.57	3.50		
Circuitos de toma corriente											
Regadío											
Estación eléctrica	0.47	0.0612	29	120	0.31	0.3750	117	29.00	3.05		
ERIM Gas	0.13	0.1240	16	140	0.09	0.4333	39	6.63	3.50		
Generador	0.16	0.0612	10	120	0.10	0.3750	39	9.67	3.05		
Depósito reserva agua	0.31	0.1240	39	140	0.22	0.4333	97	16.57	3.50		
TOTAL ALUMBRADO=	130.52		8,721		87.58	0.3807	33,347	7,968	3.09		

REDUCCION ELECTRICIDAD

REGULACION INTENSIDAD Y PRESENCIA

Factor de reducción por presencia = 0.1

Factor de reducción por iluminación exterior = 0.1

$$C_{reg} = P \cdot N_h \cdot p_{el} (1 - f_p) \cdot (1 - f_e)$$

$$A = C - C_{reg} = C \cdot [1 - (1 - f_{pre}) \cdot (1 - f_{ext})]$$

$$I = 0.25 \cdot P \cdot c_{esp}$$

$$r_s = \frac{I}{A}$$

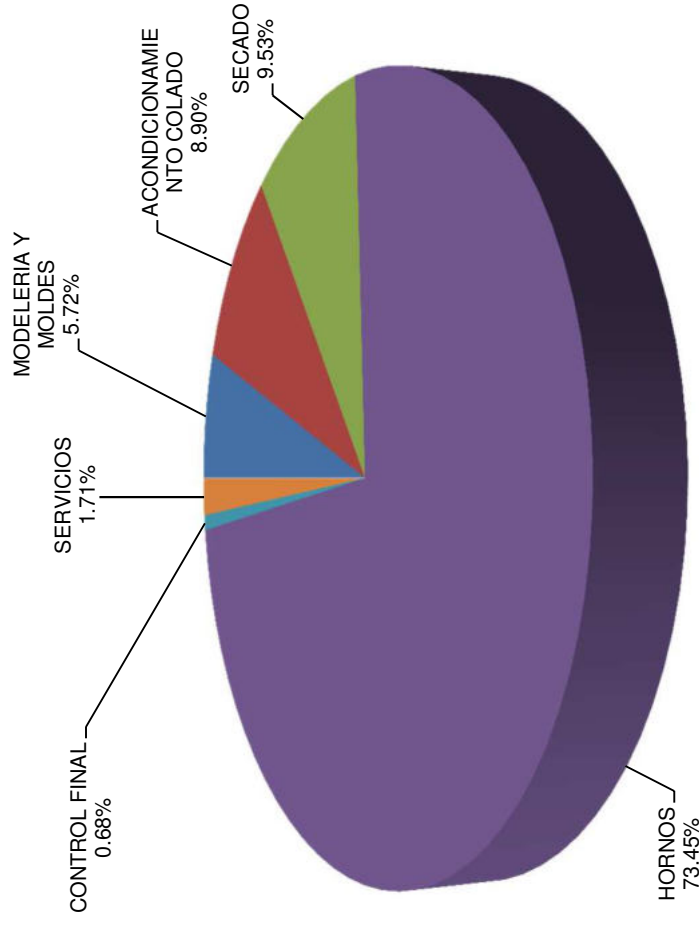
AHORRO POR REGULACION LUMINICA				
NIVELES ILUMINACION	Inversión €	Ahorro €/yr	r _s	r _s años
PRIMERAS MATERIAS	261	85		3.07
PREPARACION PASTA	193	63		3.07
PREPARACION ESMALTES	220	83		2.66
MODELERIA Y MOLDES	1,099	413		2.66
COLADO	2,539	955		2.66
ACONDICIONAMIENTO COLADO	49	18		2.66
SECADO	488	184		2.66
ESMALTERIA	1,221	459		2.66
HORNOS	635	239		2.66
CONTROL FINAL	488	184		2.66
OFICINAS	244	92		2.66
ALMACEN	244	92		2.66
SERVICIOS	656	222		2.95
TOTAL REGULACION=	8,337	3,089		2.70

- C, C_{reg} : Costes anuales sin y con regulación
- f_p : Factor reducción por presencia
- f_e : Factor reducción por luz exterior
- A : Ahorro
- P : Potencia
- N_h : Número de horas anuales
- p_{el} : Precio electricidad
- I : Inversión
- c_{esp} : Coste específico de la instalación
- r_s : Retorno simple

REDUCCION GAS

PUNTOS POSIBLES DE AHORRO

GAS



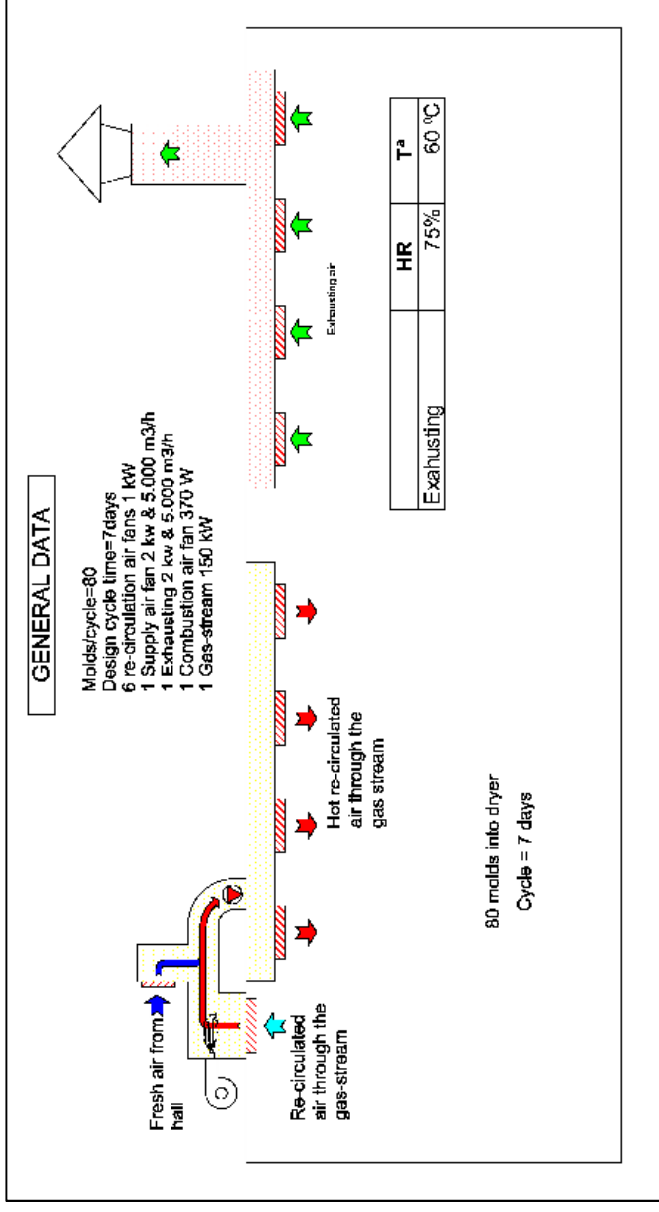
- El 98% del consumo de gas está localizado en secaderos, centrales de acondicionamiento y hornos
- La caracterización de estos equipos permite calcular las posibilidades de ahorro.
- El consumo de control final corresponde al horno de retráctil y el de servicios a las calderas de A.C.S. No caben modificaciones importantes en estos equipos y su impacto no es representativo, por lo que no se considera en ellos posibilidad de ahorro

REDUCCION GAS

CARACTERIZACION SECADERO MOLDES

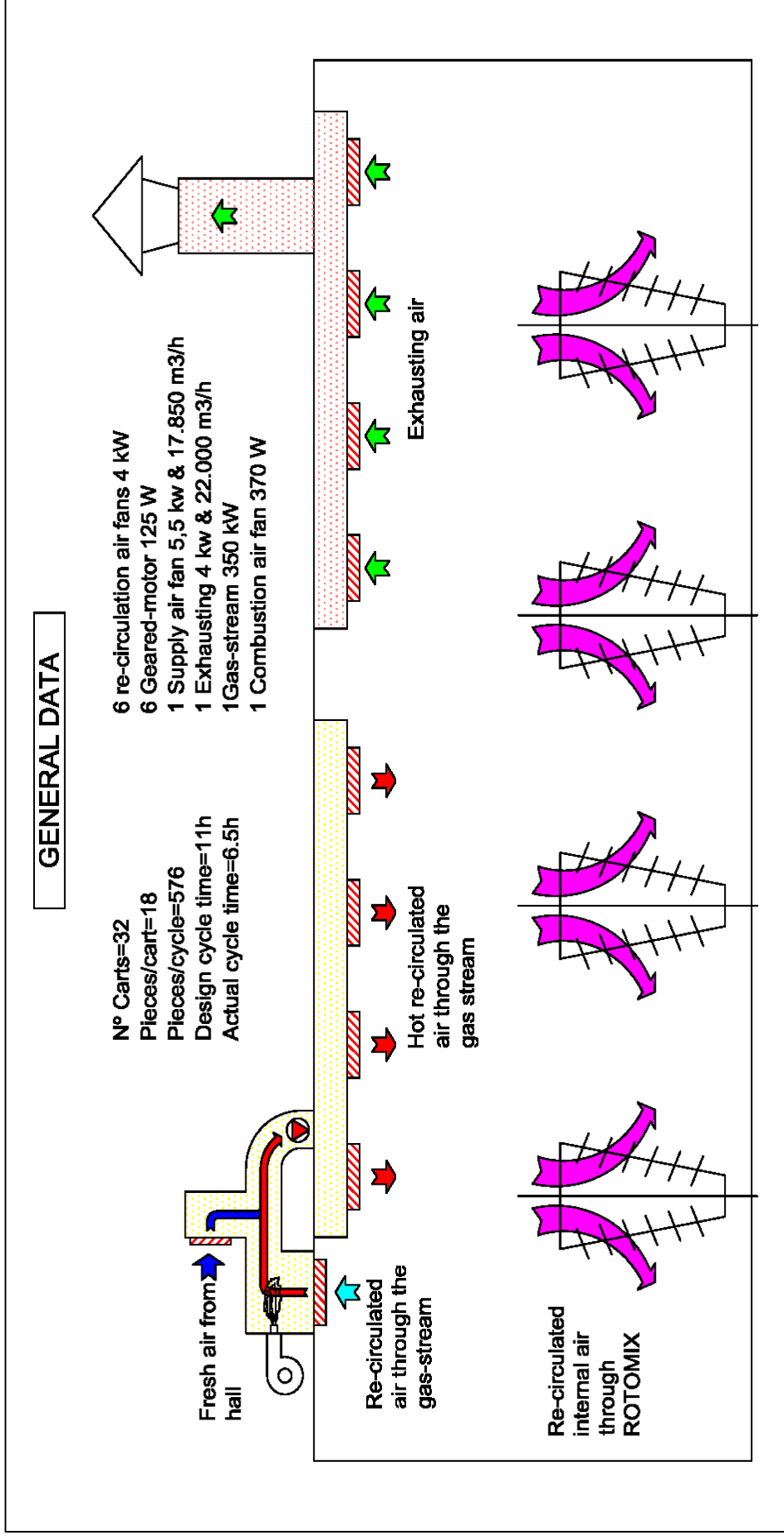
Condiciones aire	T ^a °C	HR %	e mbar	X _{saturation} g/kg	X g/kg
Aire ambiente	22	55%	26.45	16.674	9.17
Aire secadero	60	75%	199.37	152.42	114.31

- La curva de secado se considera constante con:
 - una temperatura de 60°C
 - HR de 75%
 - Ciclo de 7 días



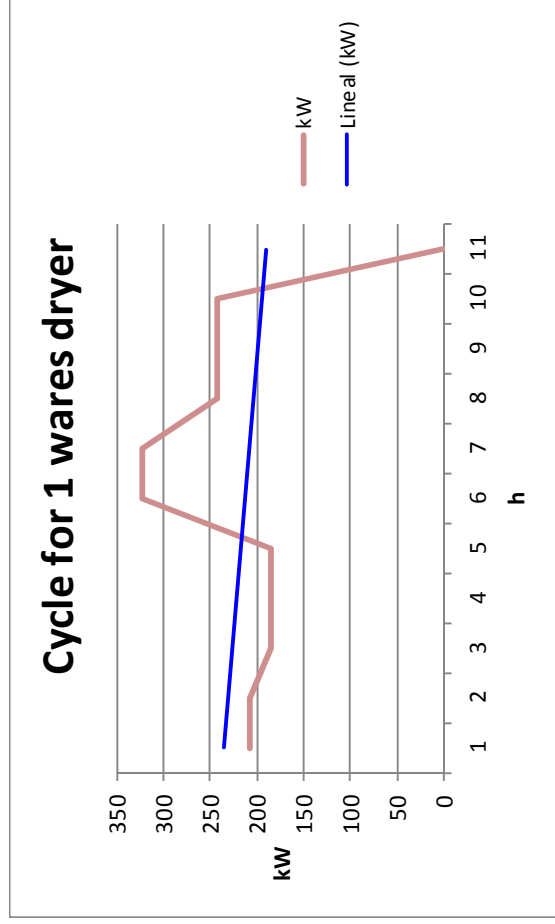
REDUCCION GAS

CARACTERIZACION SECADERO PIEZAS



REDUCCION GAS

CARACTERIZACION SECADERO PIEZAS

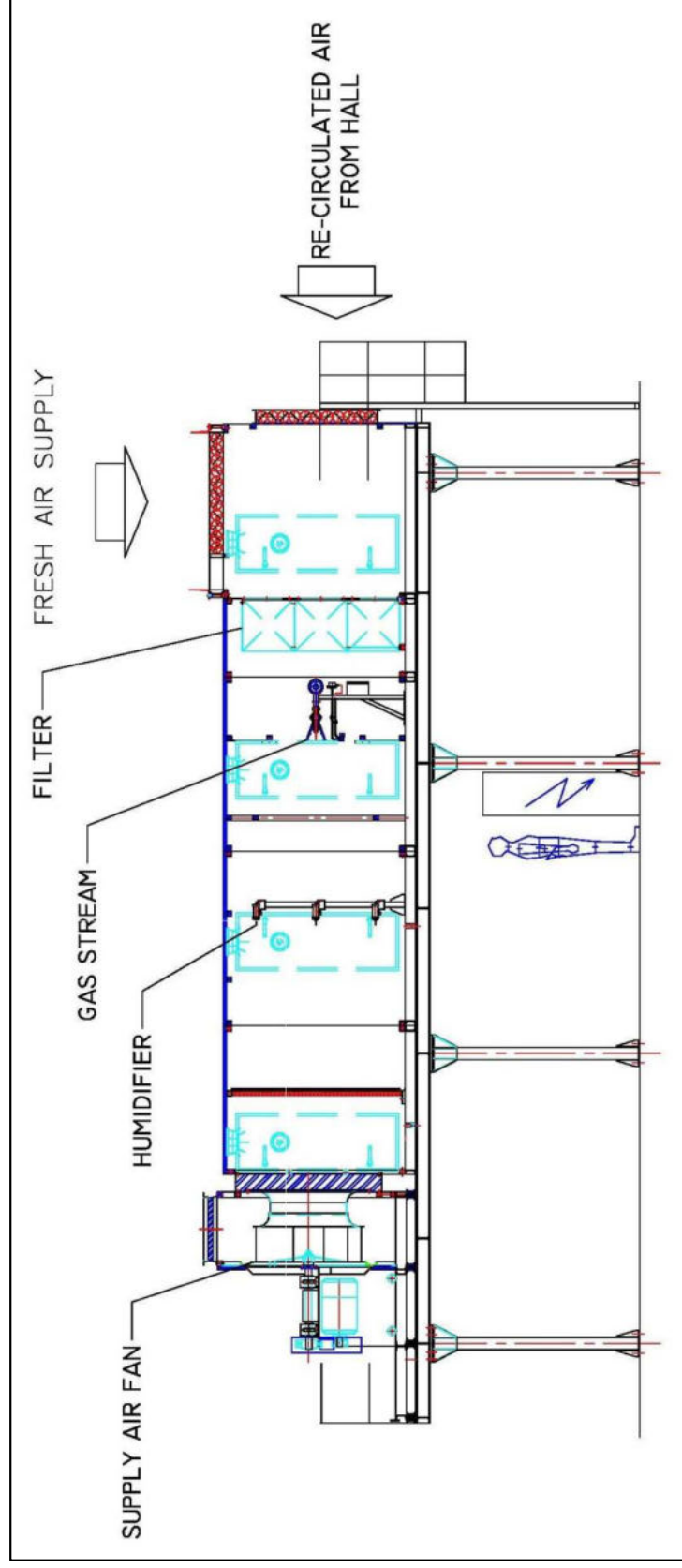


- La curva de secado es variable según:
 - Rango temperatura: (30-90) °C
 - Rango de HR: (20-75)%
 - Ciclo: 10 h + 1 de enfriamiento

ETAPA	tiempo evaporación		Aire evaporación		Q	
	h	kg/h	kg/h	°C	HR(%)	kW
Calentamiento 1	2	171	7,432	37.78	75%	207
Calentamiento 2	3	160	4,710	50.00	50%	184
Calentamiento 3	2	274	2,588	75.00	30%	322
Calentamiento 4	3	229	828	90.00	20%	241
Enfriamiento 5	1	0	0	-	-	0
Media		187	3,332	64.56	42%	212

REDUCCION GAS

CARACTERIZACION HVU

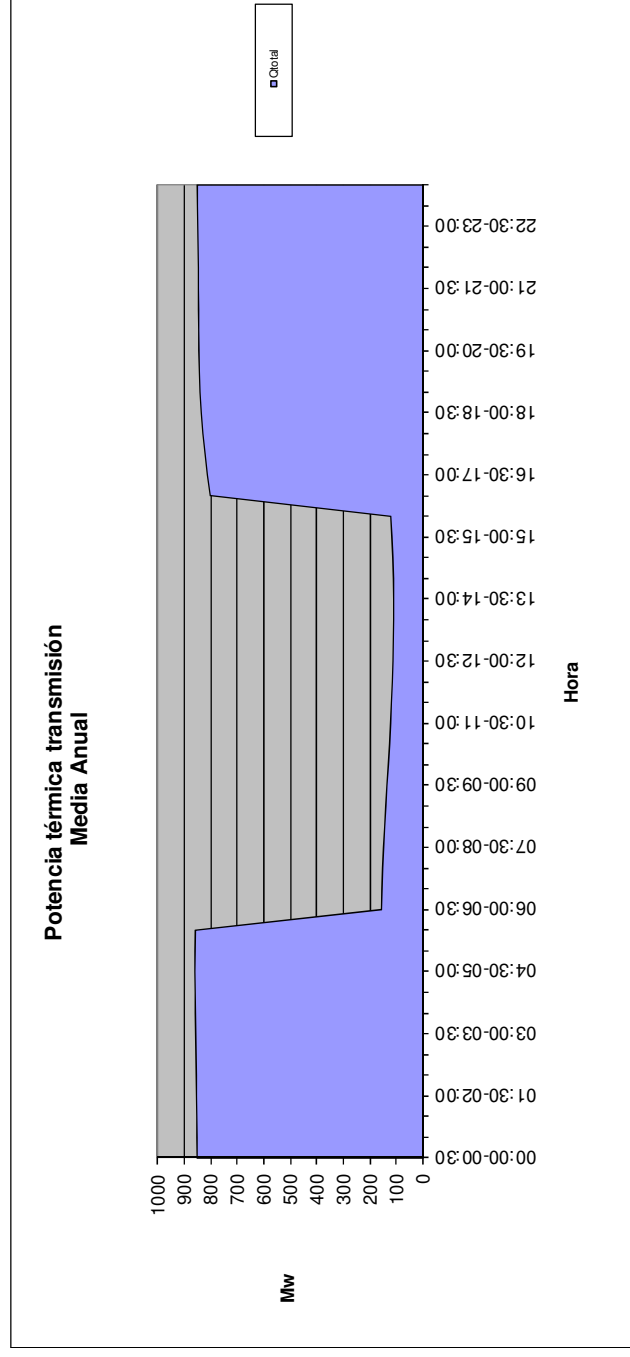


REDUCCION GAS

CARACTERIZACION HVU

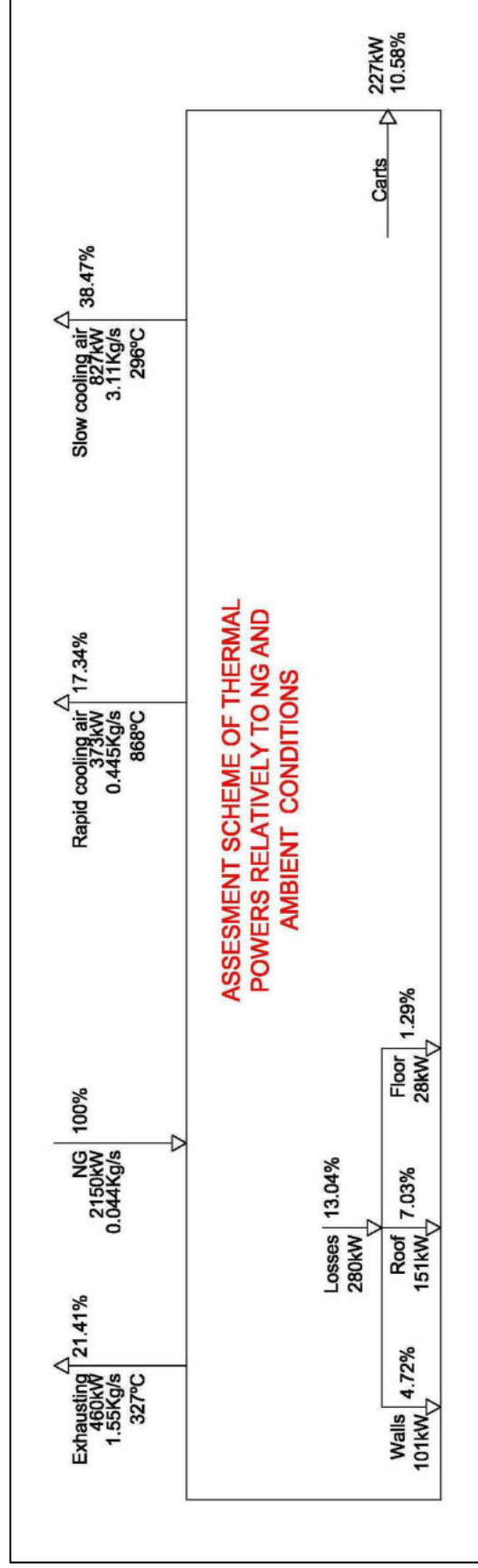
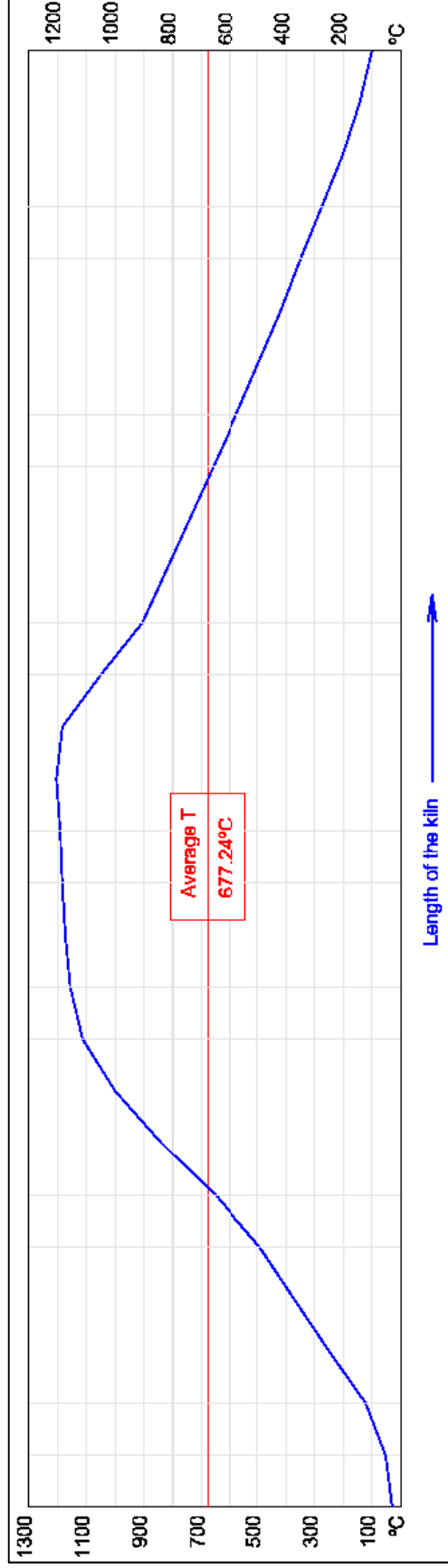
COLADO MOLDES YESO						
t	Aire	P	m _{aire}	m _{agua}		
h	°C	RH(%)	kW	kg/h	kg/h	
COLADO	10	25	75%	128	5,583	84
SECADO	14	40	50%	846	28,431	695
Media	34	60%	547	18,911	440	

- La curva de trabajo tiene dos estados correspondientes a:
 - Ciclo de colado dónde hay que suministrar calor para extraer humedad de las piezas coladas en la sala
 - Ciclo de secado de moldes: además hay que extraer el agua de los moldes



REDUCCION GAS

CARACTERIZACION HORNO TUNEL (CURVA y ESQUEMA)

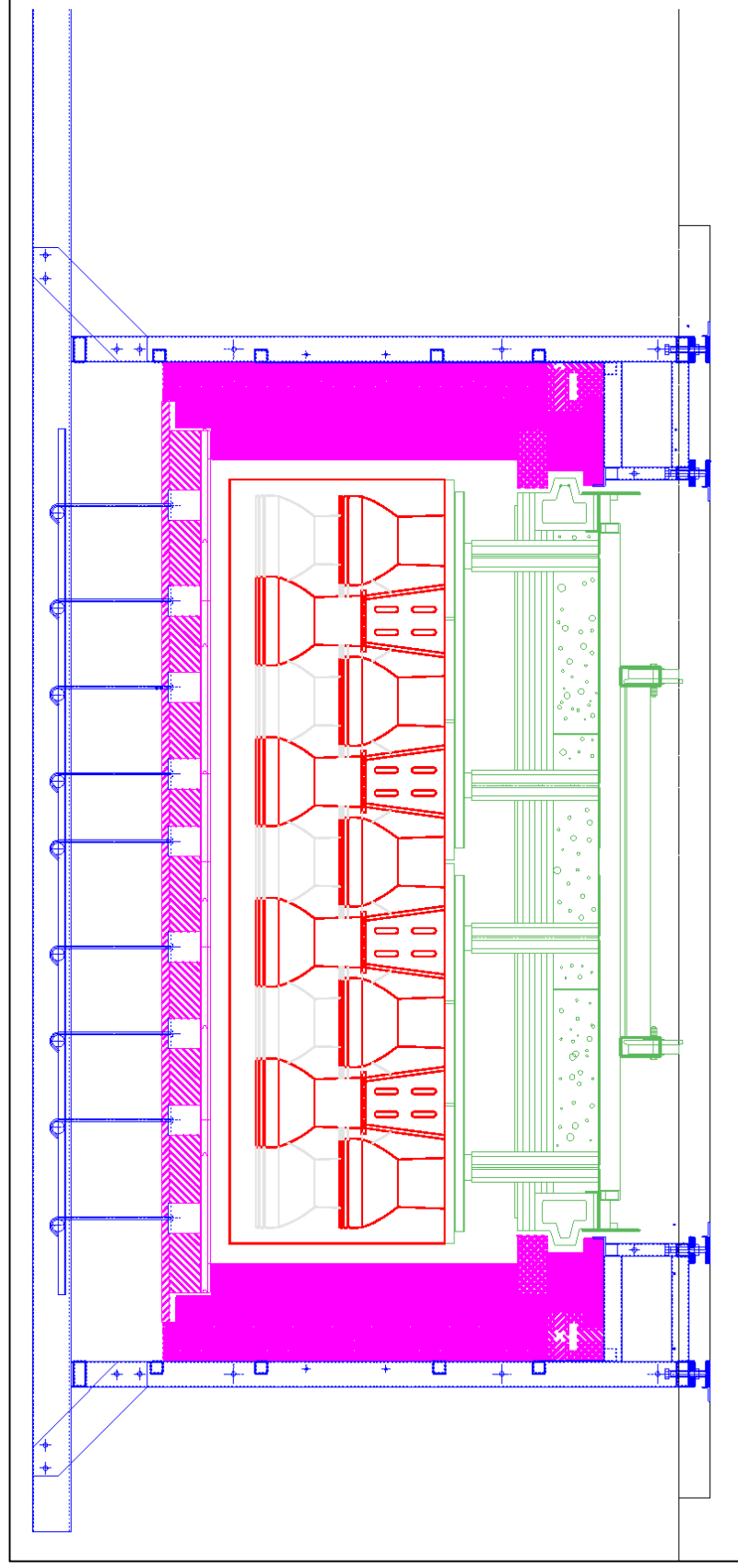


REDUCCION GAS

CARACTERIZACION HORNO TUNEL (BALANCE TERMICO)

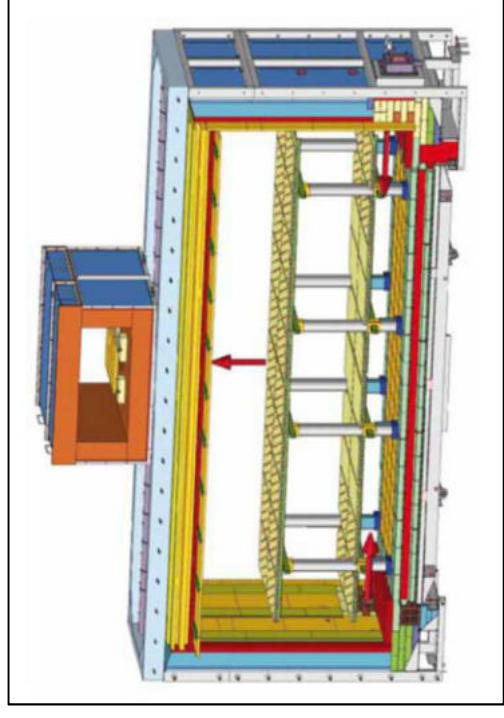
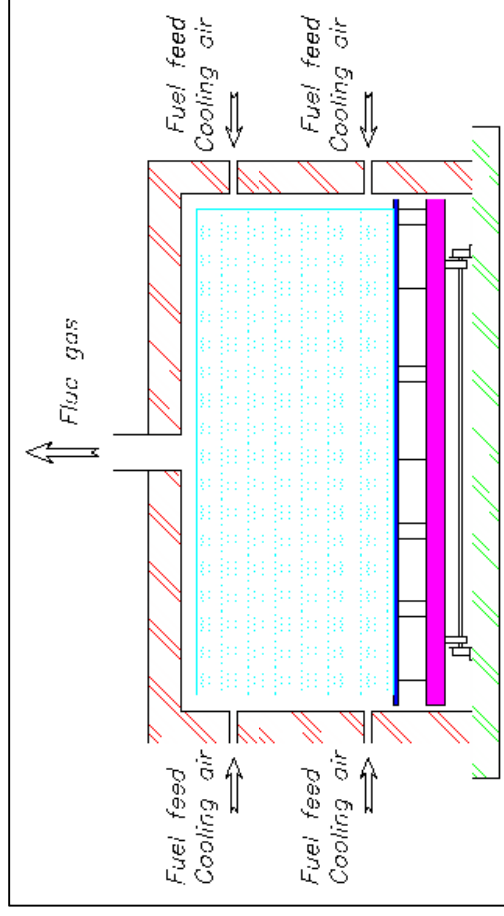
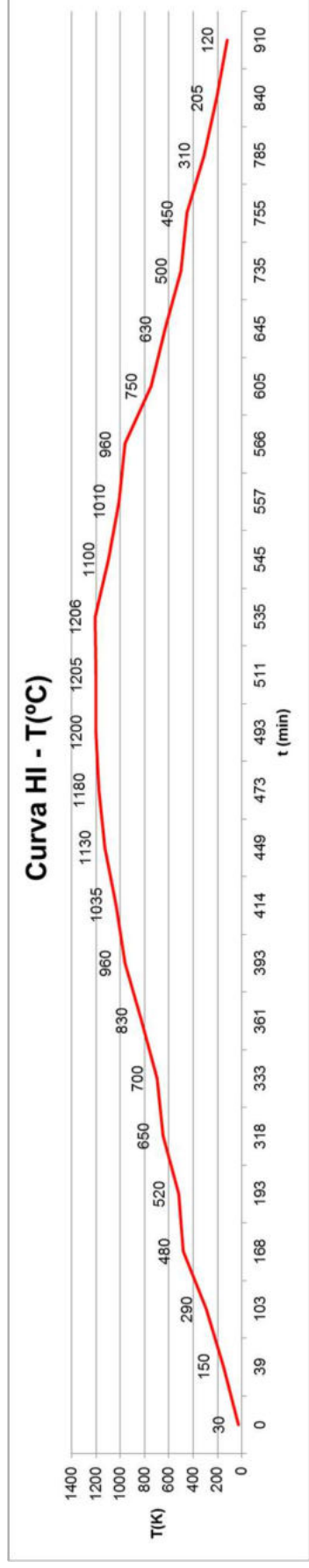
	INPUTS				OUTPUTS				% respecto a gas									
	Ref=Condiciones Normales				Ref=Condic. Ambientales				Ref=Conc. Ambientales									
	kg/s	Tª	kw	%	kg/s	Tª	kw	%	kg/s	Tª	kw	%	kg	kw	%gas			
COMBUSTION																		
GN	0.0448	30.00	2,150.22	89.77%					1.5500	327.00	506.85	20.67%	1.5500	327.00	30.00	460.35	21.41%	
Aire de techo	0.3120	30.00	9.36	0.39%														
Aire combustion	0.7690	30.00	23.07	0.96%														
Aire de exceso	0.0769	30.00	2.31	0.10%														
Subtotal combustion=	1.2027	30.00	2,184.95	91.22%					1.5500	327.00	506.85	20.67%			30.00	460.35	21.41%	
ENFRIAMIENTOS																		
Enfriamiento rápido	0.7930	30.00	23.79	0.99%					0.4450	868.00	386.26	15.75%	0.4450	868.00	30.00	372.91	17.34%	
Enfriamiento lento	1.6760	30.00	50.28	2.10%					3.1099	296.00	920.54	37.54%	3.1099	296.00	30.00	827.24	38.47%	
Contravec	1.4339	30.00	43.02	1.80%													0.00%	
Subtotal enfriamientos=	3.9029	30.00	117.09	4.89%					3.5549	367.60	1,306.80	53.29%			30.00	1,200.15	55.82%	
SUPERESTRUCTURA																		
Refractario placas soporte	0.1401	30.00	6.14	0.26%					0.1401	100.00	20.46	0.83%	0.1401	100.00	30.00	14.32	0.67%	
Pilares cordierita	0.0199	30.00	0.87	0.04%					0.0199	100.00	2.91	0.12%	0.0199	100.00	30.00	2.04	0.09%	
Castilletes	0.1260	30.00	5.52	0.23%					0.1260	100.00	18.40	0.75%	0.1260	100.00	30.00	12.88	0.60%	
Piezas	0.4644	30.00	15.74	0.66%					0.4366	100.00	49.33	2.01%	0.4104	100.00	30.00	41.94	1.95%	
Subtotal carga superestructura=	0.7505	30.00	28.27	1.16%					0.7226	100.00	91.09	3.72%			30.00	71.17	3.31%	
VAGONETAS																		
Plataforma vagoneta capa 1	0.2013	30.00	5.31	0.22%					0.2013	121.46	21.51	0.88%	0.2013	100.00	30.00	12.40	0.58%	
Plataforma vagoneta capa 2	0.0298	30.00	0.75	0.03%					0.0298	121.15	3.03	0.12%	0.0298	95.00	30.00	1.70	0.08%	
Plataforma vagoneta capa 3	0.0280	30.00	0.92	0.04%					0.0280	120.28	3.70	0.15%	0.0280	90.00	30.00	1.48	0.07%	
Plataforma vagoneta capa 4	1.3781	30.00	36.38	1.52%					1.3781	117.66	142.69	5.82%	1.3781	85.00	30.00	66.70	3.10%	
Plataforma vagoneta capa 5	0.2494	30.00	6.58	0.27%					0.2494	115.32	25.31	1.03%	0.2494	80.00	30.00	10.97	0.51%	
Plataforma vagoneta capa 6	0.1030	30.00	1.42	0.06%					0.1030	115.02	5.45	0.22%	0.1030	75.00	30.00	4.08	0.19%	
Soporte vagoneta y ruedas (80kg)	0.9872	30.00	13.62	0.57%					0.9872	115.02	52.23	2.13%	0.9872	75.00	30.00	39.09	1.82%	
Subtotal vagonetas=	2.9767	30.00	65.00	2.71%					2.9767	116.81	253.92	10.36%			30.00	136.42	6.34%	
PERDIDAS																		
Paredes laterales																		
Techo																		
Suelo																		
Subtotal pérdidas=																		
POTENCIA TERMICA																		
			2,395.31	100%							2,452.05	100%					2,148.49	100%

REDUCCION GAS CARACTERIZACION HORNO TUNEL (SECCION)



REDUCCION GAS

CARACTERIZACION HORNO INTERMITENTE (CURVA Y ESQUEMA)



REDUCCION GAS

CARACTERIZACION HORNO INTERMITENTE (BALANCE TERMICO)

CURVA HORNO INTERMITENTE																							
Etapa	t _{in} min	t _{fin} min	t _{etapa} min	t _{acumulado} min	T _{in} °C	T _{fin} °C	T _{media} °C	Q _{ing} kW	Q _{ing} kg/s	Q _{suelo} kW	Q _{paredes} kW	Q _{techo} kW	Q _{piezas} kW	Q _{superestructura} kW	Q _{agonetas} kW	Q _{difusion} kW	Q _{inyeccion} kW	Q _{entramiento} kW	Q _{combustion} kW	Q _{recuperado} kW			
1	0	39	39	39	150	90	1,109	0.023	5	26	4	366	299	276	77	0.856	17	0.191	38	0.397	133	1.466	
2	39	103	64	103	150	290	220	1,031	0.021	15	82	14	260	213	191	126	0.567	42	0.191	87	0.369	256	1.148
3	103	168	65	168	290	480	385	1,560	0.033	28	153	26	348	284	224	189	0.477	75	0.191	234	0.558	498	1.259
4	168	193	25	193	480	520	500	1,532	0.032	37	202	35	190	155	278	234	0.450	99	0.191	301	0.548	634	1.221
5	193	318	125	318	520	650	585	1,292	0.027	43	239	41	124	101	79	249	0.405	117	0.191	300	0.462	665	1.085
6	318	333	15	333	650	700	675	2,278	0.047	50	278	48	396	324	302	129	0.180	136	0.191	616	0.815	880	1.233
7	333	361	28	361	700	830	765	2,611	0.054	57	316	54	552	451	373				807	0.934	807	0.988	
8	361	393	32	393	830	960	895	2,677	0.056	68	372	64	483	395	315				980	0.958	980	1.013	
9	393	414	21	414	960	1,035	998	2,802	0.058	76	416	72	425	347	313				1,154	1.002	1,154	1.061	
10	414	449	35	449	1,035	1,130	1,083	2,580	0.054	83	453	78	323	264	219				1,161	0.923	1,161	0.976	
11	449	473	24	473	1,130	1,180	1,155	2,483	0.052	88	484	83	248	202	178				1,199	0.888	1,199	0.940	
12	473	493	20	493	1,180	1,200	1,190	1,983	0.041	91	499	86	119	97	102				990	0.709	990	0.751	
13	493	511	18	511	1,200	1,205	1,203	1,629	0.034	92	505	87	33	27	63				822	0.582	822	0.616	
14	511	535	24	535	1,205	1,206	1,206	1,383	0.029	92	506	87	5	4	-11				700	0.494	700	0.523	
15	535	545	10	545	1,206	1,100	1,153			87	483	83	-1,261	-1,030	-807	287	0.225	243	0.191	1,926	1.549	2,502	1.965
16	545	557	12	557	1,100	1,010	1,055			79	441	76	-892	-729	-567	573	0.495	220	0.191	819	0.727	1,634	1.413
17	557	566	9	566	1,010	960	985			74	411	71	-661	-540	-545	580	0.540	205	0.191	427	0.410	1,224	1.141
18	566	605	39	605	960	750	855			63	355	61	-640	-523	-423	498	0.540	176	0.191	457	0.513	1,145	1.244
19	605	645	40	645	750	630	690			50	284	49	-357	-292	-291	198	0.270	139	0.191	234	0.333	581	0.794
20	645	735	90	735	630	500	565			41	230	40	-172	-140	-112	27	0.045	113	0.191	-19	-0.034	119	0.202
21	735	755	20	755	500	450	475			33	191	33	-297	-243	-230	155	0.315	94	0.191	279	0.603	546	1.109
22	755	785	30	785	450	310	380			26	151	26	-555	-453	-398	246	0.630	74	0.191	908	2.524	1,305	3.345
23	785	840	55	840	310	205	258			16	98	17	-227	-186	-180	188	0.721	50	0.191	251	1.083	521	1.994
24	840	910	70	910	205	120	163			9	57	10	-144	-118	-118	118	0.721	31	0.191	182	1.361	373	2.272

REDUCCION GAS

MEJORA AISLAMIENTO

- Un mejor aislamiento disminuye las pérdidas a través de los cerramientos de secaderos, sala colado y hornos.
- Generalmente representan menos del 10 % del consumo
- En casos de volúmenes grandes, la inversión es alta
- La implementación de nuevo aislamiento en equipos existentes puede ser complicada, como en hornos o techos de secaderos.

$$Q_{conduccion} = S \cdot U_g \cdot \Delta T$$

$$\Delta Q_{conduccion} = S \cdot (U_g - U'_g) \cdot \Delta T$$

$$A = \Delta Q_{conduccion} \cdot N_h \cdot p_g$$

$$I = S \cdot c_{aislamiento}$$

$$r_s = \frac{I}{A}$$

- $Q_{conduccion}$: Pérdidas térmicas conducción
- S : Superficie transmisión
- U_g, U'_g : Coeficientes globales transmisión
- ΔT : Salto térmico
- A : $Ah \cdot r \cdot r \cdot r$
- N_h : Número de horas anuales
- p_g : Precio del gas
- I : Inversión
- $c_{aislamiento}$: Coste aislamiento
- r_s : Retorno simple

REDUCCION GAS

MEJORA AISLAMIENTO

Potencias térmicas secadero de moldes	Q kW
Pérdidas por conducción	18.1
Calor para evaporar agua	95.7
Calor para calentar el aire de evaporación	13.3
TOTAL=	127

- Superficie cerramientos = 132 m²/secadero
- Coste específico del aislamiento = 40 €/m²
- $A = 3 \text{ secaderos} \cdot \frac{18.1 \text{ kW}}{2 \text{ secadero}} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{dia}} \cdot \frac{232 \text{ dias}}{\text{año}} \cdot 0.03 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 4,535 \frac{\text{€}}{\text{año}}$
- $I = 132 \frac{\text{m}^2}{\text{secadero}} \cdot 3 \text{ secaderos} \cdot 40 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} = 15,840\text{€}$
- $r_s = \frac{15,840\text{€}}{4,535 \frac{\text{€}}{\text{año}}} = 3.5 \text{ años}$

NECESIDADES TERMICAS ACONDICIONAMIENTO	kW
Pérdidas por la cubierta	73
Pérdidas por el muro de hormigón	24
Pérdidas por la chapa de fachada	18
Pérdidas por el suelo	14
Calor para evaporar el agua de las piezas	293
Calor para calentar el aire de evaporación	125
Calor total	547

- Superficie cerramientos = 7,701 m²
- Coste específico del aislamiento = 40 €/m²
- $A = \frac{(73+24+18+14)}{2} \text{ kW} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{dia}} \cdot \frac{232 \text{ dias}}{\text{año}} \cdot 0.03 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 10,774 \frac{\text{€}}{\text{año}}$
- $I = 7,701 \text{m}^2 \cdot 40 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} = 308,040\text{€}$
- $r_s = \frac{308,040\text{€}}{10,774 \frac{\text{€}}{\text{año}}} = 28.6 \text{ años}$

Potencias térmicas	Q(kW)
Calentamiento aire	26
Evaporacion agua	149
Calentamiento pie.	18
Calentamiento car	6
Pérdidas por ceirra	34
TOTAL=	234

- Superficie cerramientos = 286 m²/secadero
- Coste específico del aislamiento = 40 €/m²
- $A = 2 \text{ secaderos} \cdot \frac{34 \text{ kW}}{2 \text{ secadero}} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{dia}} \cdot \frac{232 \text{ dias}}{\text{año}} \cdot 0.03 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 5,679 \frac{\text{€}}{\text{año}}$
- $I = 2 \text{secaderos} \cdot 286 \text{ m}^2 \cdot 40 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} = 22,880\text{€}$
- $r_s = \frac{22,880\text{€}}{5,679 \frac{\text{€}}{\text{año}}} = 4 \text{ años}$

REDUCCION GAS

REGULACION HIGROTERMICA

- Las necesidades higrotérmicas térmicas en secaderos y HVU's son variables como se ha visto en los modelos de caracterización.
- Cuando los ventiladores de impulsión y/o extracción no están equipados con variación de velocidad, no es posible regular el caudal de aire de secado → Exceso de ventilación y consumo
- El control de velocidad en cada fase minimiza el aire a calentar y el aire a extraer manteniendo la humedad de la cámara en su valor de programa.
- El ahorro de gas por variación de frecuencia es un valor a añadir al ahorro eléctrico por variación de frecuencia.
- En un secadero de moldes bien diseñado, no hay mucho ahorro pues el ventilador trabajará a régimen nominal siempre.
- En las HVU hay gran diferencia de ventilación entre colado y secado. La diferencia de caudales es lo que se puede ahorrar durante la fase de colado.
- En los secaderos de piezas la ventilación máxima es en la fase 1. Si no hay variador de velocidad, el resto de fases estarán sobre-ventiladas

Regulación HVU

- En colado hay exceso de ventilación respecto al secado
- $A_{HVU} = 125kW \cdot \frac{(28,431 - 5,583)}{28,431} \cdot 8 \frac{h}{dia} \cdot 232 \frac{dias}{año} \cdot 0.03 \frac{€}{kWh} = 5,593 \frac{€}{año}$

Regulación secadero piezas

- La primera fase es la de mayor caudal. Todas las demás están sobre-ventiladas

$$A_{sp} = \frac{(0.2+21.3+71.2+125.3)}{(2+3+2+3)} kW \cdot 10 \frac{h}{dia} \cdot 232 \frac{dias}{año} \cdot 0.03 \frac{€}{kWh} = 4,037 \frac{€}{año}$$

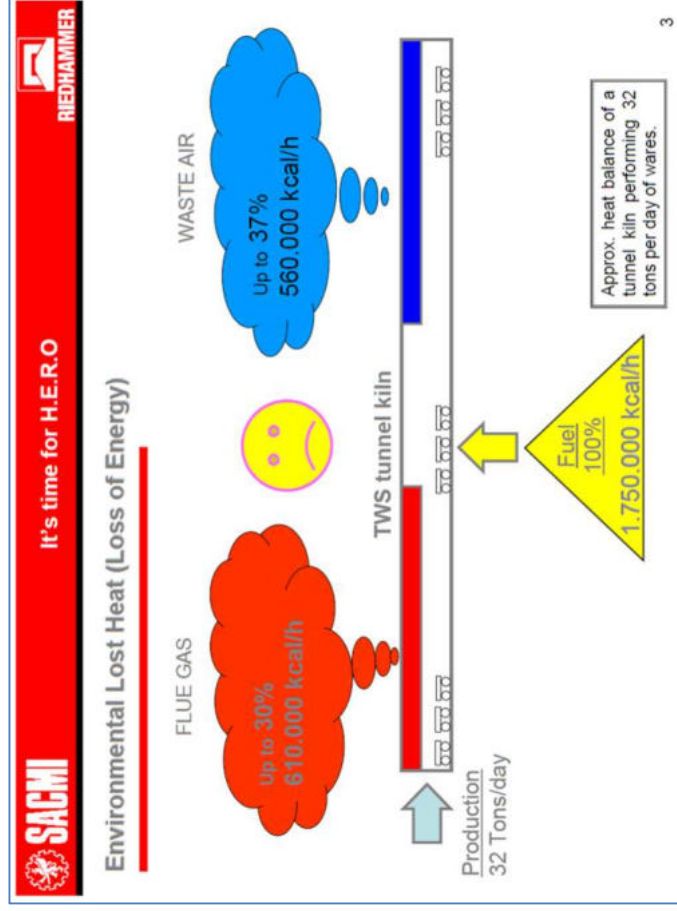
Fase	Nominal		Exceso	Q
	kg/h	m³/h		
1	7,432	6,211	0	0
2	4,710	3,936	2,274	21
3	2,588	2,163	4,047	71
4	828	692	5,518	125

REDUCCION GAS

RECUPERACION TERMICA AIRES HORNOS PARA RECEPTORES TERMICOS

MEDIA SANTANA- SETTAT	CALOR RECUPERADO	°C	kg/h	kg/s	kW
Chimenea humos	179	20,107	5.5852	998	
Chimenea enfriamiento rápido	392	1,502	0.4173	164	
Chimenea enfriamiento lento	165	13,799	3.8330	632	
TOTAL=	182	35,408	9.8356	1,794	

En valores promediados, el calor recuperable de los hornos puede suministrar a secaderos y HVU's.



RECEPTORES DE CALOR RECUPERADO	Calor kW	Energía kWh/año	Ahorro €/año
Secaderos de moldes	360	2,004,480	60,134
Centrales acondicionamiento	560	3,118,080	93,542
Secaderos de piezas	600	3,340,800	100,224
Calderas	105	581,856	17,456
TOTAL=	1,625	9,045,216	271,356

- $A = 271,356 \frac{\text{€}}{\text{año}}$
- $I = 750,000\text{€}$
- $r_s = \frac{750,000\text{€}}{271,356 \frac{\text{€}}{\text{año}}} = 2.76 \text{ años}$

REDUCCION GAS

RECUPERACION TERMICA AIRES HORNOS PARA PRECALENTAR AIRES DE COMBUSTION Y TECHO EN HT.

- Con los aires residuales se puede precalentar el aire de combustión y el de techo en el horno túnel.
- Se cogen los más calientes buscando mayor exergía, todo el residual de enfriamiento rápido y la parte restante de los humos de chimenea a través de intercambiador de calor

Aire combustión pre-calentado	m _{aire} kg/s	T °C	Q kW
De chimenea combustion	0.3517	179	52
De enfriamiento rápido	0.4173	392	151
TOTAL=	0.7691	295	203

$$\bullet A = 203 \text{ kW} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{dia}} \cdot 300 \frac{\text{dias}}{\text{año}} \cdot 0.03 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 43,848 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$\bullet I = 50,000\text{€}$$

$$\bullet r_s = \frac{50,000\text{€}}{43,834\frac{\text{€}}{\text{año}}} = 1.14 \text{ años}$$

Aire techo precalentado	m _{aire} kg/s	T °C	Q kW
	0.3120	295	83

$$\bullet A = 83 \text{ kW} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{dia}} \cdot 300 \frac{\text{dias}}{\text{año}} \cdot 0.03 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 17,928 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$\bullet I = 25,000\text{€}$$

$$\bullet r_s = \frac{25,000\text{€}}{17,928\frac{\text{€}}{\text{año}}} = 1.4 \text{ años}$$

REDUCCION GAS

RECUPERACION TERMICA AIRES HORNOS PARA PRECALENTAR AIRES DE COMBUSTION Y TECHO EN HI.

- Igualmente que en el horno túnel, se puede precalentar el aire de combustión, difusión e inyección en el intermitente.
- En este caso sólo hay una chimenea de extracción única

PRECALENTAMIENTO COMBUSTION INTERMITENTE		
POTENCIA TERMICAS H.I.	Q	m
DURANTE FASE CALENTAMIENTO	kW	kg/s
Pérdidas por el suelo	49	-
Pérdidas por las paredes	268	-
Pérdidas por el techo	46	-
Calor aportado a las piezas	261	-
Calor aportado a soportes de piezas	214	-
Calor aportado a las vagonetas	189	-
PERDIDAS Y CARGAS= 1,026		
Aire de difusión	116	0.309
Aire de inyección	51	0.119
Aire de combustion	515	0.647
AIRES=		1.074
Gas natural	1,709	0.036

$$A = 682 \text{ kW} \cdot 535 \frac{\text{min}}{\text{ciclo}} \cdot \frac{1\text{h}}{60 \text{ min}} \cdot 300 \frac{\text{ciclos}}{\text{año}}$$

$$0.03 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 54,730 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$I = 100,000\text{€}$$

$$r_s = \frac{100,000\text{€}}{54,730 \frac{\text{€}}{\text{año}}} = 1.83 \text{ años}$$

REDUCCION GAS

CONCEPTO EMS RIEDHAMMER REDUCCION CONSUMO HORNOS TUNEL

Mediante la combinación de las siguientes técnicas de ahorro, el sistema EMS (Energy Management System) de Riedhammer consigue reducir los consumos en un 48% con pre-calentamiento a 400°C o 57% a 700 °C

- Quemadores pulsantes en la zona de precalentamiento con aire pre-calentado a 200 °C
- Aire pre-calentado a 400 °C (EMS-400-4.0) ó 700 °C (EMS-700-Cyber) en la zona de calentamiento.
- Sistema controlado de recuperación en la zona de enfriamiento rápido.
- Control electrónico de relación aire/gas
- Control de actuación combinada con los aires de enfriamiento

Tab. 1 Comparison of energy and emission data of tunnel kilns with EMS400-4.0 and tunnel kilns without EMS

	Riedhammer Tunnel Kiln with EMS400-4.0	Tunnel Kilns Available on the Market
Energy consumption [kcal/kg net]	660	1260
Energy consumption [kcal/kg charge]	315	599
Total fuel cost [EUR/year]	420 132	802 326
Total CO ₂ -emission [kg/year]	2 800 882	5 348 837
Difference		+90 %

Tab. 3 Comparison of energy and emission data of tunnel kilns with EMS700-Cyber and tunnel kilns without EMS

	Riedhammer Tunnel Kiln with EMS700-Cyber	Tunnel Kilns Available on the Market
Energy consumption [kcal/kg net]	545	1260
Energy consumption [kcal/kg charge]	259	599
Total fuel cost [EUR/year]	346 927	802 326
Total CO ₂ -emission [kg/year]	2 312 850	5 348 837
Difference		+131 %

REDUCCION GAS

CONCEPTO REKO RIEDHAMMERI REDUCCION CONSUMO HORNOS INTERMITENTE

Análogamente, en el horno intermitente se puede aplicar el sistema REKO con ahorros del 60%

Tab. 5 Comparison of energy and emission data of shuttle kilns with and without new recuperator burners

	Riedhammer Shuttle Kiln with New Recuperator Burners (Reko 2.0)	Shuttle Kilns Available on the Market
Energy consumption [kcal/kg net]	995	2500
Energy consumption [kcal/kg charge]	582	1460
Total fuel cost [EUR/year]	254 535	638 372
Total CO ₂ -emission [kg/year]	1 696 898	4 244 186
Difference		+249 %

REDUCCION GAS

AHORROS EMS & REKO

Los ahorros respectivos con estos sistemas se pueden calcular como:

$$A = 0.48 \cdot 2,000 \text{ kw} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{dia}} \cdot 300 \frac{\text{dia}}{\text{año}} \cdot 0.03 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 207,360 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

para EMS-400

$$A = 0.56 \cdot 2,000 \text{ kw} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{dia}} \cdot 300 \frac{\text{dia}}{\text{año}} \cdot 0.03 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 241,920 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

para EMS-700

$$A = 0.60 \cdot 1.709 \text{ kw} \cdot 535 \frac{\text{min}}{\text{ciclo}} \cdot \frac{1\text{h}}{60\text{min}} \cdot 300 \frac{\text{ciclos}}{\text{año}} \cdot 0.03 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 82,288 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

para REKO

Las inversiones son inciertas, por lo que es difícil estimar el retorno. Asumiendo un coste de 400 k€ para el EMS y de 200 k€ para el REKO, se obtendrían retornos de 2 y 2.4 años respectivamente.

REDUCCION GAS

AHORROS CON QUEMADOR IMPROVED BURNING SYSTEM

La empresa ASTC ha patentado los quemadores “*IMPROVED BURNING SYSTEM*”, que queman el gas con aire tomado directamente del interior del horno a la temperatura de la zona correspondiente. Conceptualmente, esto tiene un efecto de ahorro teórico de todo el calor correspondiente al aire de combustión. Con el caudal de aire de combustión y la temperatura media de horno en fase de calentamiento, se puede calcular el calor ahorrado:

$$Q_{tunel} = 0.85 \frac{kg}{s} \cdot 1 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot (970 - 30)K = 799 kW$$

$$Q_{intermitente} = 0.65 \frac{kg}{s} \cdot 1 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot (822 - 30)K = 515 kW$$

y el ahorro correspondiente:

$$A_{tunel} = 799 kW \cdot 24 \frac{h}{dia} \cdot 300 \frac{dia}{año} \cdot 0.03 \frac{€}{kWh} = 172,584 \frac{€}{año}$$

$$A_{intermitente} = 515 kW \cdot 535 \frac{min}{ciclo} \cdot \frac{1h}{60 min} \cdot 300 \frac{ciclos}{año} \cdot 0.03 \frac{€}{kWh} = 41,328 \frac{€}{año}$$

La inversión para el túnel se estima en 325,000 € y para el intermitente en 150,000, con lo que los retornos salen de 1.9 y 3.6 años respectivamente

REDUCCION GAS

AHORROS POR CARGA ADECUADA

CARGA	Eficiencia		
	Densidad kg/m ³	Kcal/kg	kWh/kg
Túnel	150	1,260	1.46
Intermitente	170	1,800	2.09

- La carga del horno debe ser lo más cercana posible a la especificada de diseño para que la eficiencia sea la óptima. La eficiencia empeora tanto en cuanto la densidad de carga sea menor que la de diseño

- Los soportes de SiC tienen más densidad y más resistencia mecánica, por lo que aligeran la superestructura de la vagoneta.
- Por otro lado tienen menor calor específico por lo que disminuyen el consumo térmico.

Refractario	Densidad	MOR	Ce	Coste
	kg/m ³	MPa	kJ/kg·K	€/kg
Cordierita	2.6	200	1.46	5
SiC	3.2	540	0.92	15

INVERSION	Ahorro	Inversión	r _s
SiC vs. Cordierita	kg/m ³	€	años
Túnel	36,735	23,750	0.6
Intermitente	12,854	15,390	1.2

- Con los datos anteriores y considerando 100 vagonetas a equipar en el caso del túnel y 18 en el caso del intermitente, los retornos son muy interesantes.
- Esto es válido siempre que las piezas sean repetitivas y por tanto los soportes.

REDUCCION GAS AHORROS POR CATALIZADOR MAGNETICO

EFFECTO CATALIZADOR

• INCREMENTA LA VELOCIDAD DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN:

Debilitamiento de la energía de enlace C-C & C-H
Reduce la demanda de energía de activación

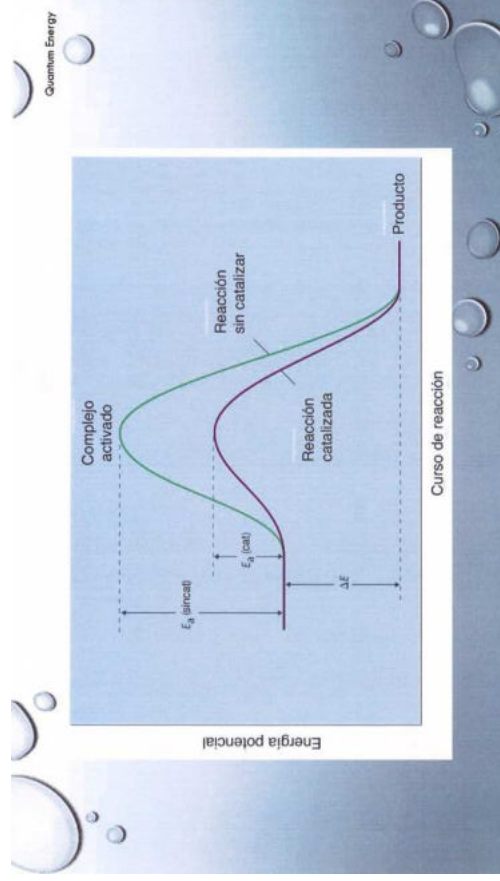
COMBUSTIÓN DE METANO SIN/CON CATALIZADOR

• EFECTO DEL CATALIZADOR: INCREMENTAR EL CALOR TOTAL LIBERADO DURANTE LA COMBUSTIÓN Y REDUCIR EMISIONES

Reactantes: $\text{CH}_4(\text{g}) + 2 \text{O}_2(\text{g})$

Productos: $\text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) + \text{energías}$

Energía Disponible Total $\text{PCI} = 55.2 \text{ MJ/m}^3$



- La reacción es más completa por lo que necesita menos energía para producirse → hasta un 15% ahorro.

$$A = 28 \frac{\text{kW}}{\text{quemador}} \cdot 0.15 \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{dia}} \cdot 300 \frac{\text{dia}}{\text{año}} \cdot 0.03 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 907 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$I = 1,500 \frac{\text{€}}{\text{catalizador}}$$

$$r_s = \frac{1,500\text{€}}{907 \frac{\text{€}}{\text{año}}} = 1.65 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

REDUCCION GAS

AHORROS POR RECUPERACION TERMICA COMPRESOR

PROCESO ADIABATICO

$$P^1-\gamma \cdot (nRT)^\gamma = cte$$

Donde:

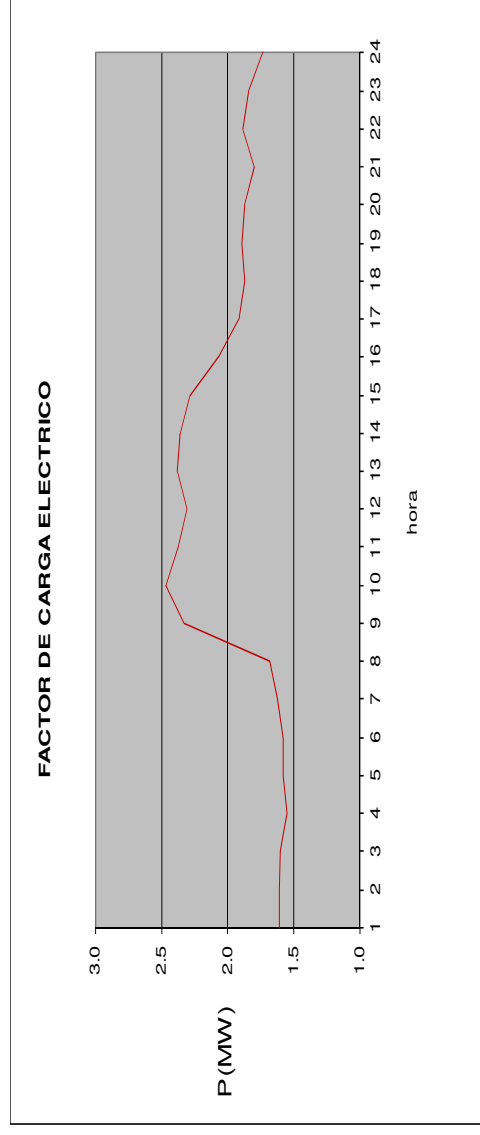
- P: presión
- T: Temperatura
- γ : Cte aire
- n: nº de moles
- R: Cte gas ideal

- En un proceso adiabático la temperatura del aire se incrementa con la presión
- Para una presión de 8 bar, la temperatura sube a 276°C aproximadamente
- La energía correspondiente a este calor se calcula como la invertida en comprimir el aire (unos 160 kW para el compresor del estudio) afectada por un factor de rendimiento de 0.8.
- La energía térmica recuperable resulta entonces de 128 kW a 276°C.
- El ahorro correspondiente será:
- $A = 128 \text{ kw} \cdot 2,225 \frac{\text{h}}{\text{año}} \cdot 0.03 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 8,544 \frac{\text{€}}{\text{año}}$
- Una inversión para reconducir este calor a algún consumidor térmico cercano podría suponer, por ejemplo 15,000 € y el retorno resultante:
- $\tau_s = \frac{15,000 \text{ €}}{8,544 \frac{\text{€}}{\text{año}}} = 1.75 \text{ años}$

OTRAS MEDIDAS AHORRO

GENERACION FOTOVOLTAICA

PLANTA FOTOVOLTAICA		
Superficie techos	m2	23,100
Consumo		
Energía anual	kWh/año	7,277,798
Coste anual	€/año	727,780
P_max global	kW	2,466
Planta		
a_placa	m	1.956
b_placa	m	0.992
S_placa	m2	1.940
P_placa	W	300
peso placa	kg/placa	26
peso estructura	kg/placa	29
Sobrecarga cubierta:	kg/m2	37
Latitud	º	39.81
a_proyectada		1.503
S_proyectada	m2	1.490
rendimiento		17.89%
Factor ocupacion		0.35
Nº de placas teórico		15,499
Nº de placas real		5,425
Potencia	kW	1,628
Radiacion	kWh/m2·dia	4.60
Energía generada	kWh/año	2,009,724
Coste planta	€	1,677,501
Ahorro anual	€/año	200,972
Retorno simple	años	8.35



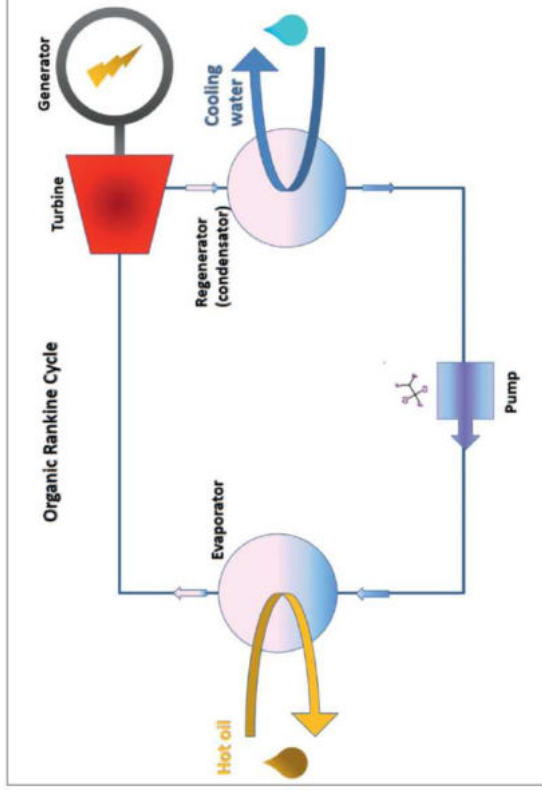
- Una planta fotovoltaica puede generar electricidad que sea consumida en la fábrica. La curva de carga de consumo adjunta se ajusta a las horas de luz solar.
- Con la superficie disponible de techo, pueden generarse anualmente unos 2 GWh.
- El consumo anual es de 7.3 GWh, por lo que se puede considerar que toda la generación es autoconsumida.
- El ahorro correspondiente será:

$$A = 2,009,724 \frac{kWh}{año} \cdot 0.1 \frac{€}{kWh} = 200,972 \frac{€}{año}$$
- Para una inversión de 1.68 M€, el retorno resulta de 8.35 años

OTRAS MEDIDAS AHORRO

COGENERACION CON CICLO ORGANICO RANKINE

Product	Model	LT1	LT2	LT3
Heat source	Fluid	Water	Water	Water
	Flow rate (m³/h)	17,0	36,5	77,5
	Inlet temperature (°C)	90-120	90-120	90-120
Heat sink	Thermal power (kWt)	130-265	275-540	585-1070
	Fluid	Water	Water	Water
	Flow rate (m³/h)	14,0	29,5	63,0
	Inlet temperature (°C)	20-40	20-40	20-40
	Outlet temperature (°C)	30-50	30-50	30-50
Electrical power	Thermal power (kWt)	100-195	210-395	455-785
	Gross power (kWe)	8-21	17-43	37-84



- Un horno puede alimentar un COR de salida 50 kW eléctricos (LT3)

- El ahorro correspondiente es:

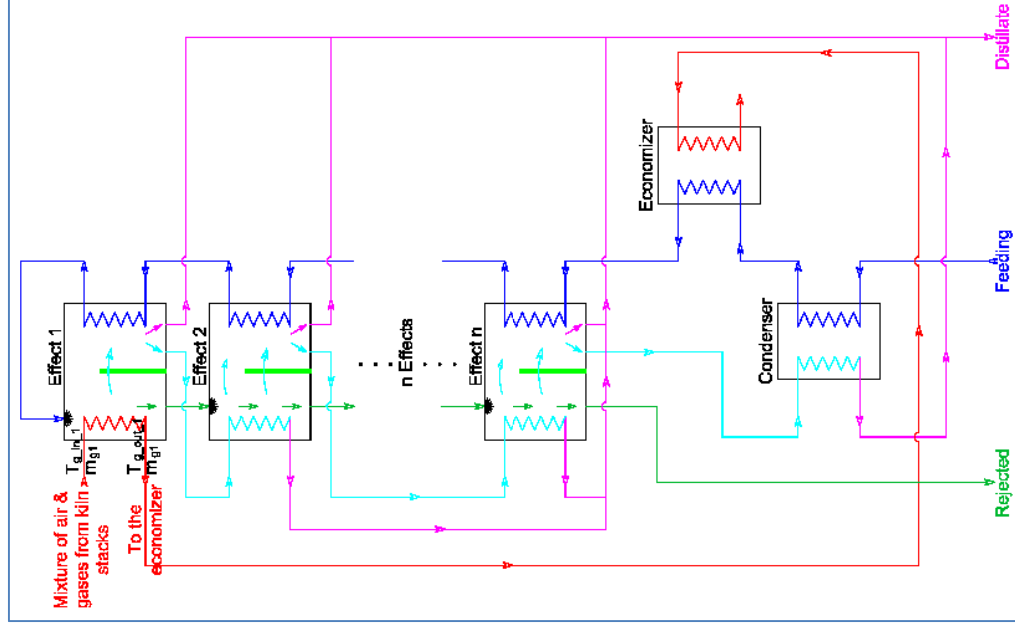
$$A = 50 \text{ kW} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{dia}} \cdot 300 \frac{\text{dias}}{\text{año}} \cdot 0.1 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 36,000 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

- El coste de este equipo es de 198,000€

$$r_s = \frac{198,000\text{€}}{36,000 \frac{\text{€}}{\text{año}}} = 5.5 \text{ años}$$

OTRAS MEDIDAS AHORRO

DESTILACION MULTI EFECTO (MED) CON CALOR RESIDUAL DE HORNO



22/01/2019

CONSUMO AGUA		COLADO MOLDES YESO	
Nº Piezas	500,000 pcs/año	Lavado m3/dia	Total dia m3/dia
PRIMERAS MATERIAS		0	0.20
PASTAS	21.52	0.50	22.02
PREPARACION ESMALTE	2.39	0.50	2.89
YESO	8.93	0.30	9.23
COLADO	26.94	2.00	28.94
ACONDICIONAMIENTO			0.00
SECADO			0.00
ESMALTERIA		2.00	2.00
HORNOS			0.00
CONTROL FINAL	0.38	0.20	0.20
OFICINAS		0.10	0.48
ALMACEN		0.25	0.25
SERVICIOS	64.72	2.00	66.72
TOTALES DIARIOS	124.87	8.05	132.92
CONSUMO ANUAL	28,971	1,868	30,838 m³/año

- Una planta de destilación multi efecto trabaja con bajas temperaturas de evaporación por vacío en las celdas de evaporación-condensación.
- Debido a la baja salinidad del agua de alimentación, el residuo es mínimo, por lo que el rendimiento hidráulico es muy alto.
- El coste de una planta de 133 m³/dia es del orden de 150-200 k€ y el de operación es del orden de 2 €/m³.
- El ahorro correspondiente depende del precio del agua, supuesto por exceso a 2 €/m³. Con este valor, igual al coste de operación MED, no se justifica la inversión de capital. El precio debería subir hasta 3.67 €/m³ para tener un retorno de 3 años.

$$r_s = \frac{200,000 \text{ €}}{133 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} \cdot 300 \frac{\text{dia}}{\text{año}} \cdot (3.67 - 2) \frac{\text{€}}{\text{m}^3}} = 3 \text{ años}$$

OTRAS MEDIDAS AHORRO

CONDENSACION DE VAPORES EN SECADEROS Y HVU's MEDIANTE ENFRIADORA DE ABSORCION

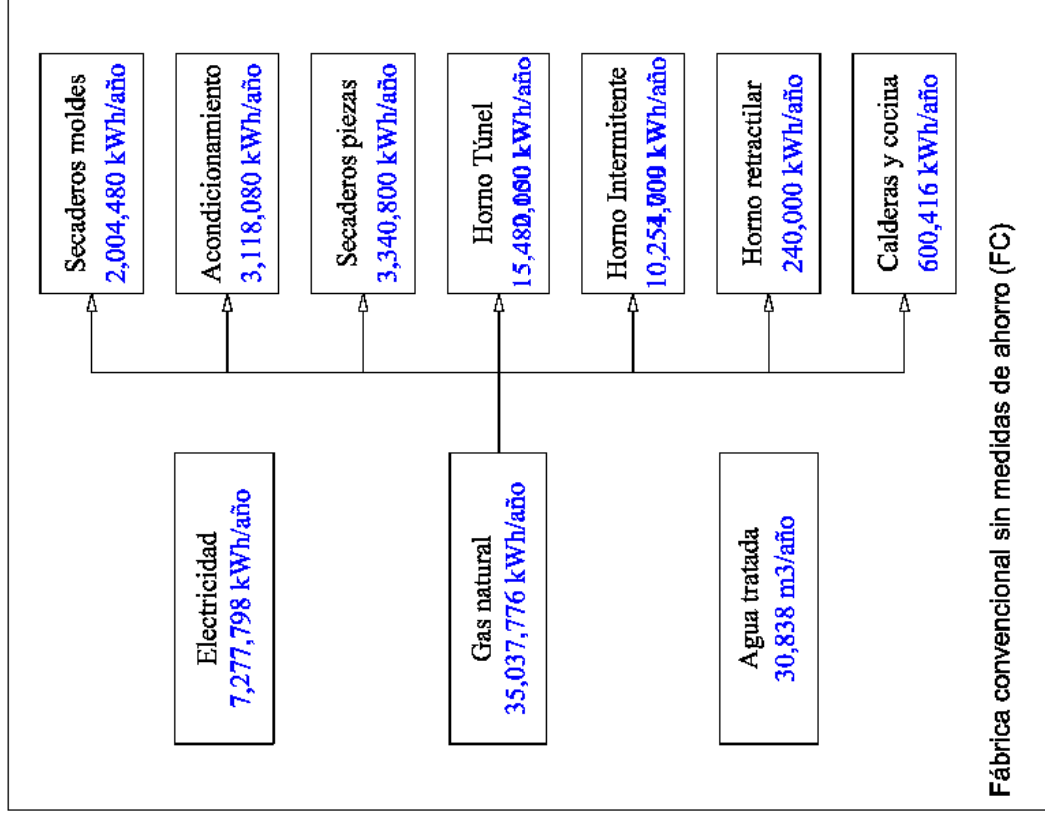
- El agua de proceso de preparación de pastas se va a la pieza y posteriormente es evaporada en la sección de colado por calefacción y en el secadero de piezas.
- Del mismo modo, el agua contenida en el yeso se evapora en el secadero del molde.
- La del esmalte se evapora entre la ventilación del área de carga del horno y la extracción del pre-secadero.
- La suma total de este agua es de 32.84 m³/día y podría recuperarse mediante un proceso de condensación por medio de una enfriadora de absorción. Supuesto el precio del agua a 2 €/m³, y el coste de la máquina de 150,000 €, el retorno sería:

$$T_r = \frac{150,000\text{€}}{32.84 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \cdot 300 \frac{\text{días}}{\text{año}} \cdot 2 \frac{\text{€}}{\text{m}^3}} = 7.6 \text{ años}$$

	CONSUMO AGUA		COLADO MOLDES YESO	
	Nº Piezas	500,000 pcs/año	Lavado m ³ /día	Total día m ³ /día
PRIMERAS MATERIAS			0	0.20
PASTAS		21.52	0.50	22.02
PREPARACION ESMALTE		2.39	0.50	2.89
YESO		8.93	0.30	9.23
COLADO		26.94	2.00	28.94
ACONDICIONAMIENTO				0.00
SECADO				0.00
ESMALTERIA			2.00	2.00
HORNOS				0.00
CONTROL FINAL			0.20	0.20
OFICINAS		0.38	0.10	0.48
ALMACEN			0.25	0.25
SERVICIOS		64.72	2.00	66.72
TOTALES DIARIOS		124.87	8.05	132.92
CONSUMO ANUAL		28,971	1,868	30,838 m³/año

Esquema de la fábrica modelo sin ningún tipo de medida de ahorro energético.

FASES OPTIMIZACION FABRICA CONVENCIONAL SIN REDUCCIONES



FABRICA CONVENCIONAL	Electricidad kWh/año	Gas kWh/año	Agua m3/año	TOTAL kWh/año	m ³ /año
Consumos					
PRIMERAS MATERIAS	429,664	0	46	429,664	46
PREPARACION PASTA	916,493	0	5,108	916,493	5,108
PREPARACION ESMALTES	345,866	0	671	345,866	671
MODELERIA Y MOLDES	547,520	2,004,480	2,141	2,552,000	2,141
COLADO	1,625,856	0	6,714	1,625,856	6,714
ACONDICIONAMIENTO COLADO	182,074	3,118,080	0	3,300,154	0
SECADO	551,232	3,340,800	0	3,892,032	0
ESMALTERIA	202,304	0	464	202,304	464
HORNOS	916,800	25,734,000	0	26,650,800	0
Horno tunel	540,000	15,480,000	0	16,020,000	0
Horno intermitente	360,000	10,254,000	0	10,614,000	0
CONTROL FINAL	82,800	240,000	46	322,800	46
OFICINAS	112,288	0	110	112,288	110
ALMACEN	28,304	0	58	28,304	58
SERVICIOS	1,336,598	600,416	15,480	1,937,014	15,480
TOTAL	7,277,798	35,037,776	30,838	42,315,574	30,838

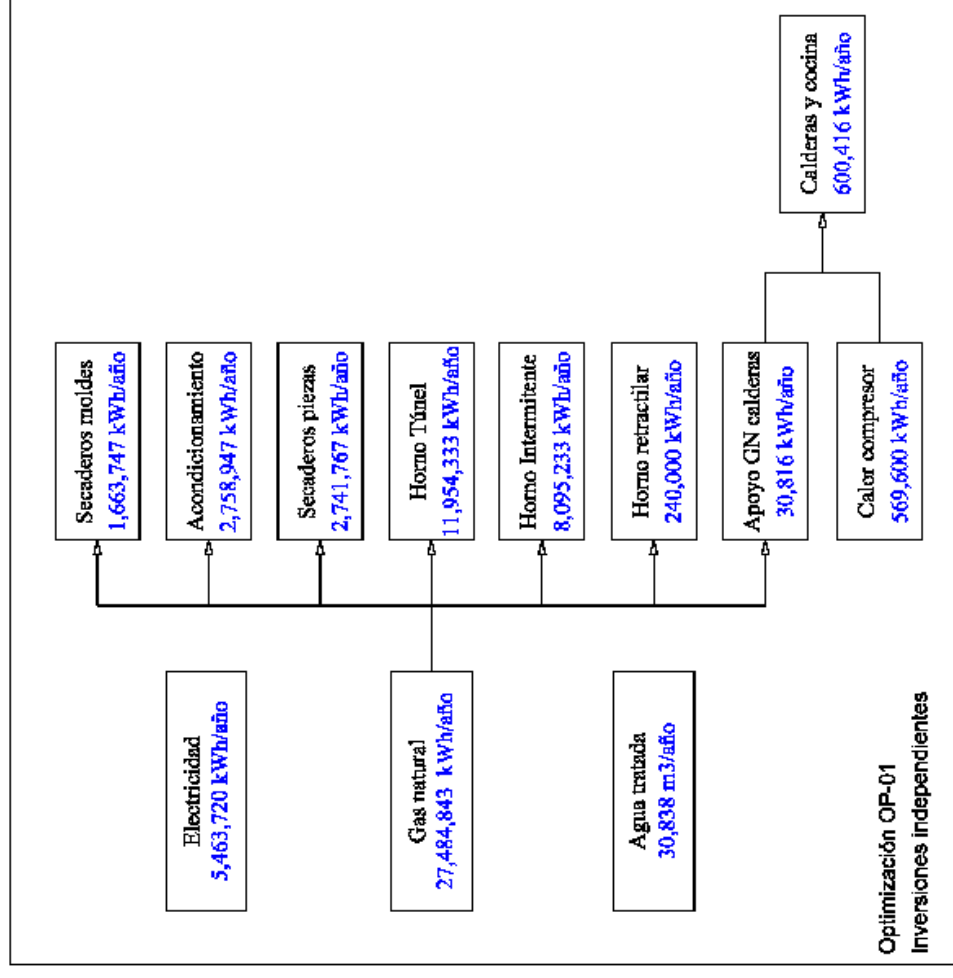
Fábrica convencional sin medidas de ahorro (FC)

OPTIMIZACION OP-01

PRIMER PASO DE OPTIMIZACION CON INVERSIONES INDEPENDIENTES

Se incluyen todas las inversiones que no influyen en otras acciones de reducción. Se realizan todas las mejoras eléctricas y se recupera el calor de compresor para las calderas de ACS. También se implementan medidas de reducción térmica que no influyen en otra acciones como por ejemplo la recuperación de calores residuales, cogeneración, etc.

- Mejora eficiencia motores
- Variación de frecuencia
- Iluminación LED
- Regulación y control
- Mejora de aislamientos
- Regulación higró-térmica
- Quemadores pulsantes
- Control de la regulación óptima
- Carga adecuada
- Soportes SiC vs. Cordierita
- Catalizadores magnéticos
- Recuperación térmica en compresores



OPTIMIZACION OP-01

PRIMER PASO DE OPTIMIZACION CON INVERSIONES INDEPENDIENTES

Energía		Tipo		Descripción		Ahorro		Inversión		Retorno	
						€/año	kWh/año	€		años	
Electricidad	Alumbrado LED			Substitución de alumbrado convencional por LED		7,968	79,680	24,626		3.09	
Electricidad	Eficiencia IE			Substitución de motor de eficiencia IEE1 ó IEE2 a IEE3		19,879	198,792	67,289		3.38	
Electricidad	Regulación alumbrado			Control de iluminación por presencia e intensidad		3,089	30,886	8,337		2.70	
Electricidad	Variación de frecuencia			Reducción del par motor-resistente por variación de frecuencia		125,566	1,255,655	356,821		2.84	
Electricidad	Control de ventilación			Control de ventilación de secado de moldes en los bancos		31,250	312,500	20,000		0.64	
Gas	Aislamiento térmico			Incremento de aislamiento térmico cerramientos secaderos y colado		21,001	700,021	346,760		16.51	
Gas	Regulación higr térmica			Control de Temperatura y humedad en HVU y secaderos piezas		13,681	456,024	60,388		4.41	
Gas	Eficiencia combustión			Mejora de la eficiencia de combustión mediante catalizadores magnéticos		90,232	3,007,736	330,000		3.66	
Gas	Regulación térmica			Regulación adecuada del horno para minimizar caudales excesivos de aires		20,538	684,609	10,000		0.49	
Gas	SiC			Aligeramiento de superestructura HT con SiC		49,589	1,652,981	39,140		0.79	
Gas	Recuperación térmica			Recuperación térmica del calor de compresor para calentar agua calderas		17,088	569,600	30,000		1.76	
Total =						399,880	8,948,484	1,293,361		3.23	

OP-01

Ahorros

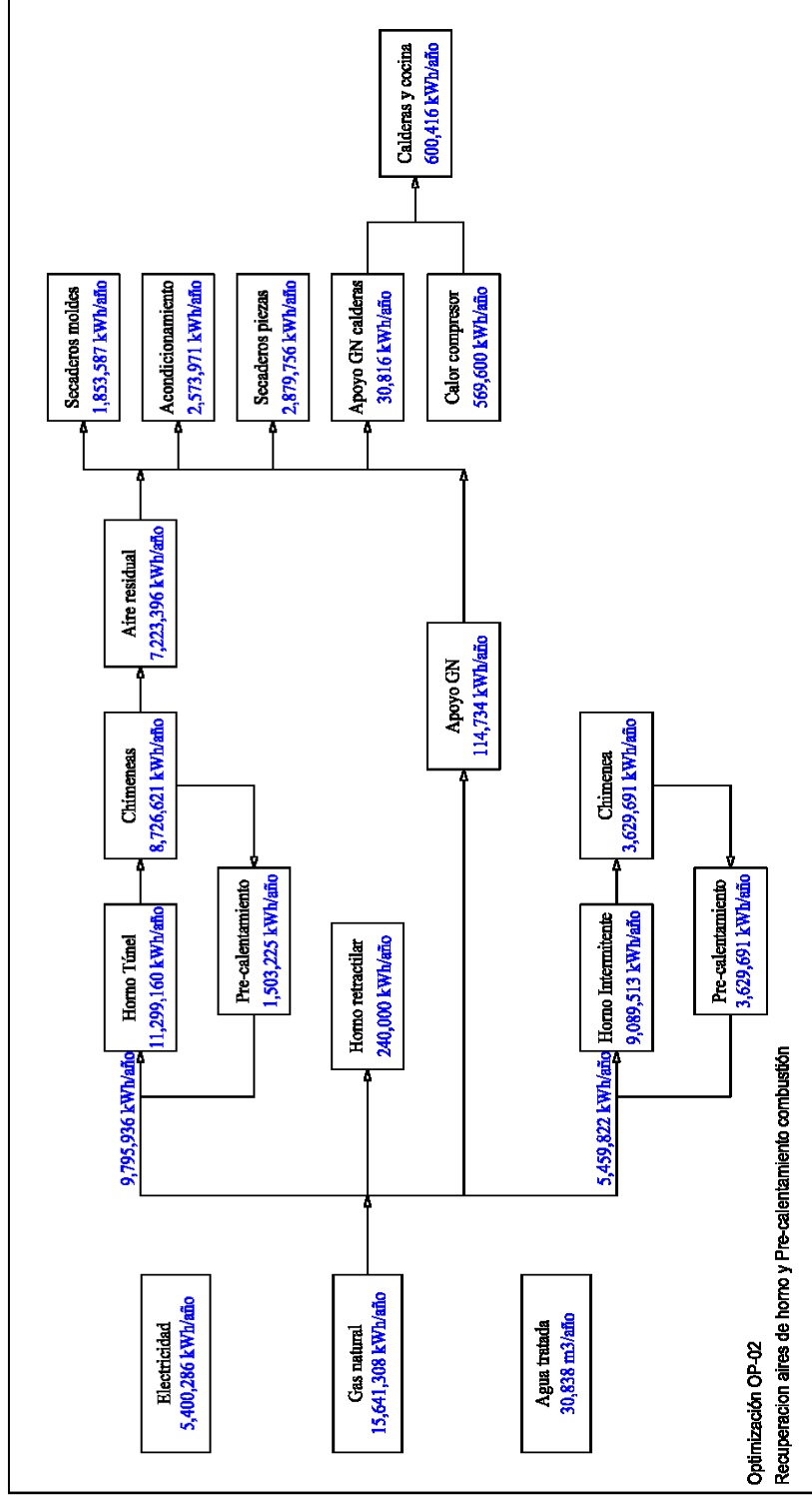
	Electricidad kWh/año	Gas kWh/año	Agua m3/año	TOTAL kWh/año	TOTAL m3/año
PRIMERAS MATERIAS	48,706	0	0	48,706	0
PREPARACION PASTA	266,918	0	0	266,918	0
PREPARACION ESMALTES	99,623	0	0	99,623	0
MODELERIA Y MOLDES	30,413	150,893	0	181,306	0
COLADO	497,254	0	0	497,254	0
ACONDICIONAMIENTO COLADO	41,587	544,109	0	585,696	0
SECADO	184,876	461,044	0	645,920	0
ESMALTERIA	21,532	0	0	21,532	0
HORNOS	267,481	5,345,326	0	5,612,808	0
		4,180,840	0	4,180,840	0
		1,164,487	0	1,164,487	0
Horno tunel					
Horno intermitente					
CONTROL FINAL	10,033			10,033	0
OFICINAS	13,360			13,360	0
ALMACEN	3,335			3,335	0
SERVICIOS	392,394	569,600	0	961,994	0
TOTAL	1,877,513	7,070,972	0	8,948,484	0

- Reducción eléctrica = 25.8%
- Reducción gas = 20.2%
- Reducción agua = 0%

OPTIMIZACION OP-02

SEGUNDO PASO DE OPTIMIZACION CON PRE-CALENTAMIENTO Y RECUPERACION DE CALOR

Se utiliza el calor residual de cada horno para pre-calentar los aires de combustión, techo de difusión e inyección respectivamente de cada horno. Además el calor residual del HT se aprovecha en secaderos y HVU's.



OPTIMIZACION OP-02

SEGUNDO PASO DE OPTIMIZACION CON PRE_CALENTAMIENTO Y RECUPERACION DE CALOR

Energía		Tipo		Descripción		Ahorro		Inversión		Retorno	
Gas	Gas	Recuperación térmica	Pre calentamiento aire	€/año	kWh/año	€	años	€/año	kWh/año	m3/año	años
				271,356	9,045,216	750,000	2.76				
				104,136	3,471,201	175,000	1.68				
				375,492	12,516,417	925,000	2.46				
				Total =							

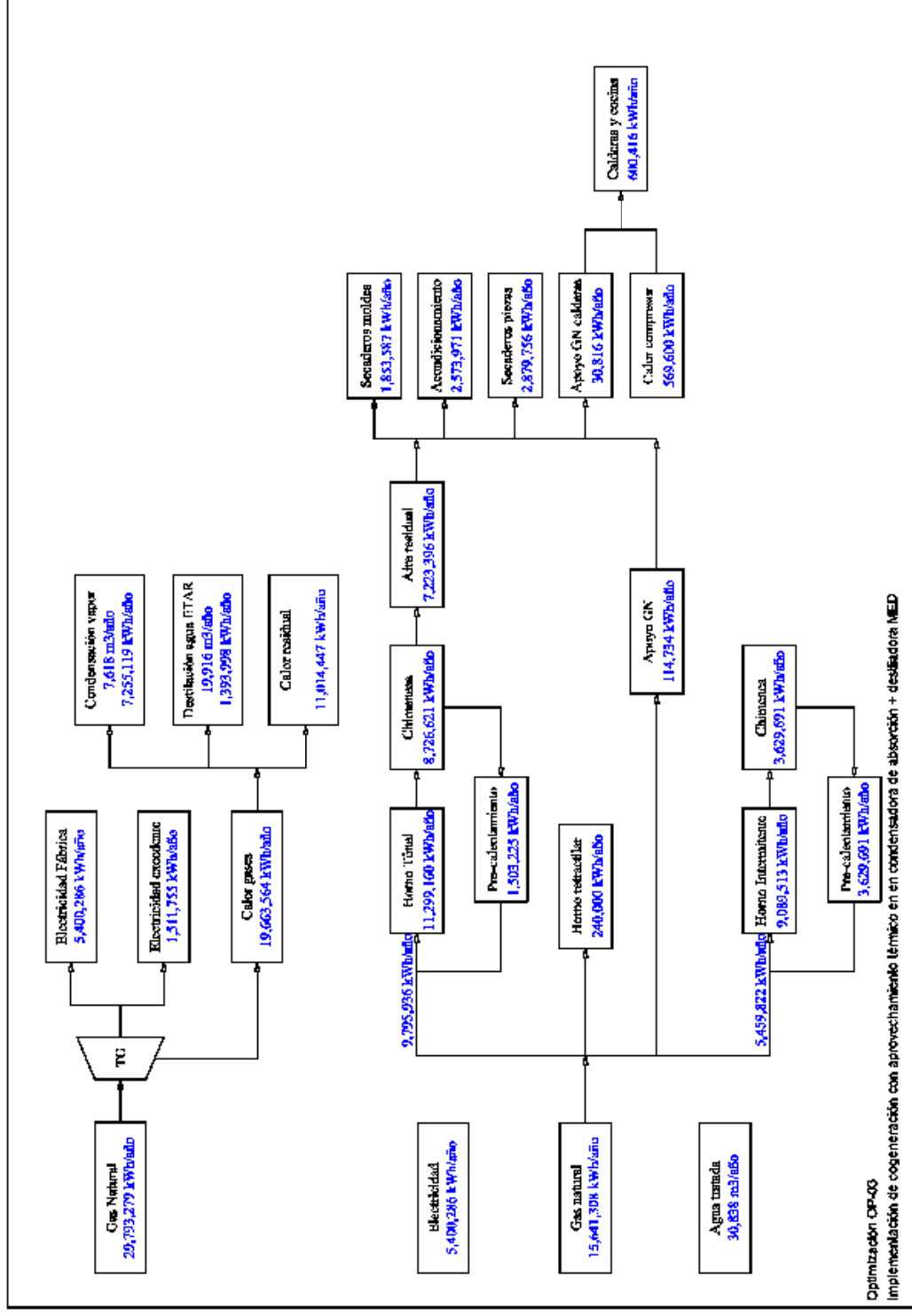
- Reducción eléctrica = 0%
- Reducción gas = 44.18%
- Reducción agua = 0%

OP-02	Electricidad	Gas	Agua	TOTAL
Ahorros	kWh/año	kWh/año	m3/año	kWh/año
PRIMERAS MATERIAS	0		0	0
PREPARACION PASTA	0		0	0
PREPARACION ESMALTES	0		0	0
MODELERIA Y MOLDES	0	1,853,587	0	1,853,587
COLADO	0		0	0
ACONDICIONAMIENTO COLADO	0	2,573,971	0	2,573,971
SECADO	0	2,879,756	0	2,879,756
ESMALTERIA	0		0	0
HORNOS	0	5,132,916	0	5,132,916
Horno tunel	0	1,503,225	0	1,503,225
Horno intermitente	0	3,629,691	0	3,629,691
CONTROL FINAL	0		0	0
OFICINAS	0		0	0
ALMACEN	0		0	0
SERVICIOS	0	-83,918	0	-83,918
TOTAL	0	12,356,312	0	12,356,312

OPTIMIZACION OP-03

TERCER PASO DE OPTIMIZACION TG+MED+ABSORCION

Se implanta una planta de cogeneración para abastecer el 100 % de electricidad y con el calor residual de la planta, recuperar el agua evaporada de piezas y moldes y el agua residual de ETAR



Optimizador OP-03
Implementación de cogeneración con aprovechamiento térmico en en condensadora de absorción + deshidradora MED

OPTIMIZACION OP-03

TERCER PASO DE OPTIMIZACION TG+MED+ABSORCION

OPTIMIZACION OP-03 SIN APROVECHAMIENTO TERMICO

Energía	Tipo	Descripcion	Ahorro €/año	Ahorro kWh/año	Inversión €	Retorno años
Mixta	Cogeneración	Cogeneración partir de OP-02 sin aprovechamiento térmico	-191,952	-22,881,238	3,000,000	-15,63
Agua	MED	Destilación de agua con calor residual vs agua red	16,498	164,984	200,000	12,12
Agua	Condensación	Recuperación de agua red evaporada con enfriador de absorción	19,311	164,984	150,000	7,77
		Total =	-156,143	-22,551,270	3,350,000	-21,45

OPTIMIZACION OP-03 CON APROVECHAMIENTO TERMICO

Energía	Tipo	Descripcion	Ahorro €/año	Ahorro kWh/año	Inversión €	Retorno años
Mixta	Cogeneración	Cogeneración partir de OP-02 con aprovechamiento térmico total	397,955	-3,217,674	3,000,000	7,54
Agua	MED	Destilación de agua con calor residual vs agua red	16,498	164,984	200,000	12,12
Agua	Condensación	Recuperación de agua red evaporada con enfriador de absorción	19,311	164,984	150,000	7,77
		Total =	433,764	-2,887,706	3,350,000	7,72

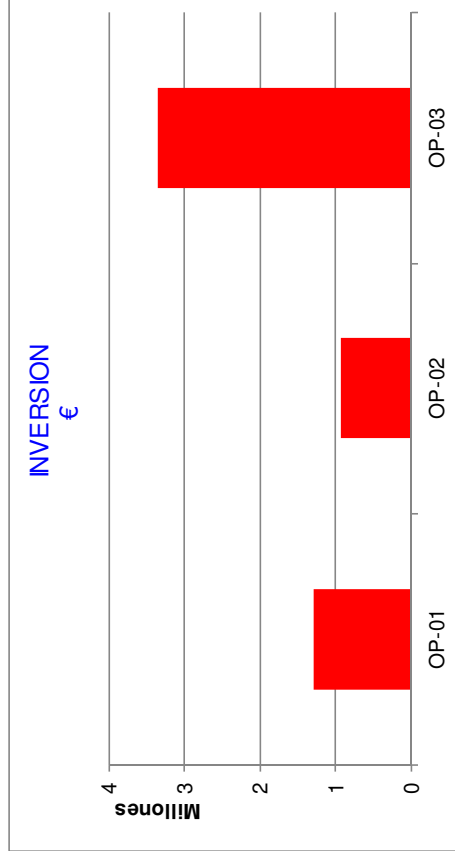
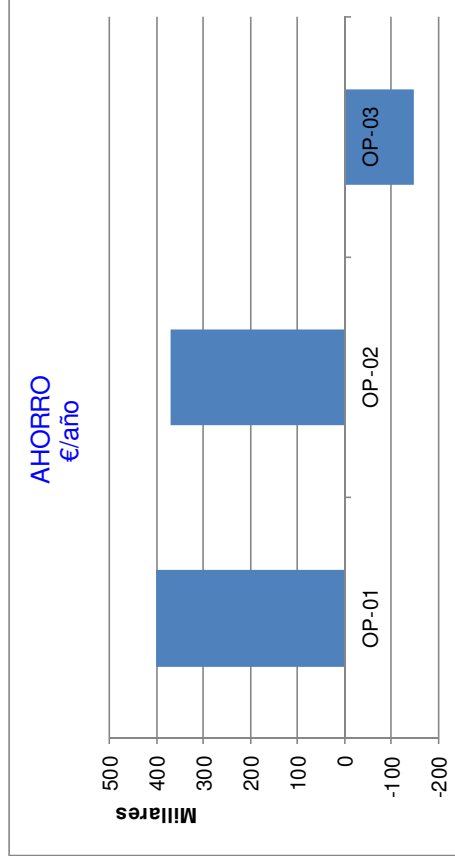
OP-03 Ahorros	Electricidad		Gas		Agua		TOTAL	
	kWh/año	kWh/año	kWh/año	kWh/año	m3/año	m3/año	kWh/año	m3/año
PRIMERAS MATERIAS	380,958	0	0	0	0	0	380,958	0
PREPARACION PASTA	649,575	0	0	4,992	4,992	0	649,575	4,992
PREPARACION ESMALTES	246,242	0	0	555	246,242	0	246,242	555
MODELERIA Y MOLDES	517,107	0	0	2,071	517,107	0	517,107	2,071
COLADO	1,128,602	0	0	0	1,128,602	0	1,128,602	0
ACONDICIONAMIENTO COLADO	140,487	0	0	0	140,487	0	140,487	0
SECADO	366,356	0	0	0	366,356	0	366,356	0
ESMALTERIA	180,772	0	0	0	180,772	0	180,772	0
HORNOS	649,319	0	0	0	649,319	0	649,319	0
	Horno tunel	540,000	0	0	540,000	0	540,000	0
	Horno intermitente	360,000	0	0	360,000	0	360,000	0
CONTROL FINAL	72,767	0	0	0	72,767	0	72,767	0
OFICINAS	98,928	0	0	0	98,928	0	98,928	0
ALMACEN	24,969	0	0	0	24,969	0	24,969	0
SERVICIOS	2,455,959	-29,793,279	-29,793,279	19,914	-27,337,320	19,914	-27,337,320	19,914
TOTAL	6,912,041	-29,793,279	27,532	-22,881,238	27,532	27,532	-22,881,238	27,532

- Reducción eléctrica = 128% Resulta exceso de electricidad para vender a la red
- Reducción gas = -191%. En realidad no hay ahorro de gas pues aumenta el consumo por la TG
- Reducción agua = 89%. El agua se reduce. Esto puede justificar la inversión si su precio es suficientemente alto

RESUMEN

OPTIMIZACION FABRICA SIN APROVECHAMIENTO DE CALOR RESIDUAL

RESUMEN	Aprovechamiento parcial calor	Electricidad kWh/año	Gas kWh/año	Agua m3/año	COSTE €/año	AHORRO €/año	INVERSION €	RETORNO años
Fábrica convencional	FC	7,277,798	35,037,776	30,838	1,840,589			
Optimización 01	OP-01	5,400,286	27,966,804	30,838	1,440,709	399,880	1,293,361	3.23
Optimización 02	OP-02	5,400,286	15,610,492	30,838	1,070,020	370,689	925,000	2.50
Optimización 03	OP-03	-1,511,755	45,403,771	3,306	1,217,550	-147,530	3,350,000	-22.71
Inversión global=		-1,511,755	45,403,771	3,306	1,217,550	623,040	5,568,361	8.94

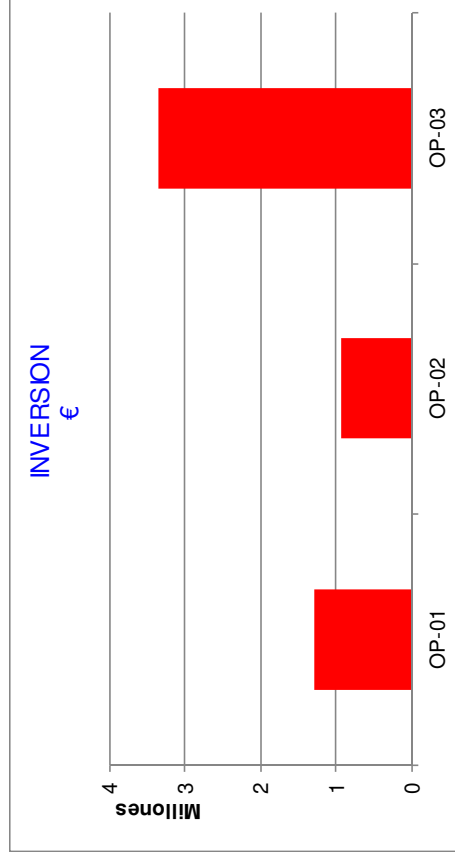
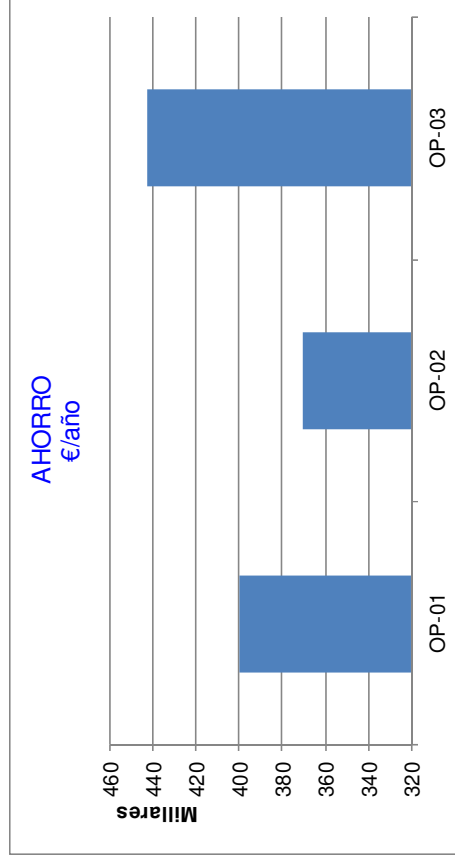


El calor residual de la planta de cogeneración no se utiliza totalmente. Por tanto, ni el ahorro térmico de aprovechamientos residuales ni el ahorro de agua cubren el exceso de consumo de la TG y la inversión resulta negativa



RESUMEN

OPTIMIZACION FABRICA CON APROVECHAMIENTO DE CALOR RESIDUAL

RESUMEN	CONSUMO		COSTE	AHORRO	INVERSION	RETORNO
Aprovechamiento total calor	Electricidad kWh/año	Gas kWh/año	Agua m3/año	€/año	€	años
Fábrica convencional	FC	35,037,776	30,838	1,840,589		
Optimización 01	OP-01	27,966,804	30,838	1,440,709	1,293,361	3.23
Optimización 02	OP-02	15,610,492	30,838	1,070,020	370,689	2.50
Optimización 03	OP-03	25,740,207	3,306	627,643	442,377	7.57
Inversión global=		-1,511,755	25,740,207	627,643	1,212,947	4.59



En el caso de utilizar de alguna manera todo el calor residual de la TG, sí que se recupera el extra-coste de su consumo y la inversión resulta rentable

 	Tesis Doctoral	
	Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales	
Título: Optimización de los consumos de agua y energía en la industria cerámica sanitaria y la reducción de emisiones de CO ₂		
Autor: Carlos Ignacio Cuvilla Suárez	10/03/2021	Página 231 de 231

ANEXO XXVI: “Autorización de la Compañía ROCA SANITARIO S.A. a favor del doctorando para publicar en la tesis los documentos de aplicación de la misma en las fábricas del grupo ROCA” CORREO DEL DEPARTAMENTO DE R.R.H.H.

Re: permiso publicacion

Xavier Aguilera <xavier.aguilera@roca.net>

Mar 21/07/2020 10:48

Para: Carlos Cuviella <carlos.cuviella@roca.net>; Codigo Etico <codigoetico@roca.net>

Estimado Carlos,

Tienes la autorización para el uso de datos y el nombre de la empresa según las condiciones de uso que has formulado en tu solicitud. Te ruego disculpes la demora en la contestación y aprovechamos para agradecerte la confianza.

Mucha suerte en la presentación de tu Tesis Doctoral.

Cordialmente,

Xavier Aguilera
Senior Managing Director
Human Resources

+34 93 366 12 00
Avinguda Diagonal, 513
08029 Barcelona
Spain

De: Carlos Cuviella <carlos.cuviella@roca.net>

Enviat el: dilluns, 20 d'abril de 2020 16:13

Per a: Codigo Etico <codigoetico@roca.net>

Tema: permiso publicacion

Sres:

Dentro del marco del programa de Doctorado que estoy realizando, he escrito una guía de técnicas de ahorro energético en las fábricas de productos sanitarios de la cual adjunto la copia de los dos documentos presentados como trabajo central de mi tesis durante la evaluación.

"Aplicabilidad medidas reduccion PP.pdf" y "Aplicabilidad medidas reduccion Word.PDF".

Ambos trabajos son genéricos y teóricos sin ninguna implicación realtiva al grupo ROCA o cualquier otra Compañía en particular.

Debido a mi actividad dentro del grupo, he utilizado esta información para aplicarla de forma práctica en las fábricas de ROCA, para lo cual el pasado año hice una adaptación de los documentos mencionados a efectos de presentarlo en nuestras fábricas y en los cuales sólo hay una mención expresa a datos concernientes a ROCA (página 1 consumos anuales de la fábrica de Settat-Marruecos), que si fuese necesario, podría suprimir.

En la defensa de mi Tesis Doctoral podría presentar los documentos relativos a ROCA que también adjunto como prueba de la aplicabilidad de las técnicas que reforzaría mi trabajo de investigación y elevaría la calidad misma de la Tesis:

"Aplicacion ROCA PP.pdf" y **"Aplicacion ROCA Word. pdf"**

En cumplimiento del Código ético de ROCA les dirijo el presente escrito con el ruego de obtener el permiso de publicación exclusivo para la Tesis Doctoral y la certificación de mi autoría relativa a los documentos adjuntos en lo que a ROCA se refiere.

Esperando su respuesta favorable, les desea la mejor salud:

Carlos Cuviella

ROCA SANITARIO S.A.

Rambla Lluch,2 Gavà

08850 Barcelona

Ph: +34936351656 Ext: 111466

Mob: +34679680366

e.mail: carlos.cuviella@roca.net