

TESIS DOCTORAL

2015



ANÁLISIS DE LAS EMISIONES DE CO₂ COMO INDICADOR DE
EFICIENCIA Y SOSTENIBILIDAD EN PLANTAS INDUSTRIALES DE
PROCESO CONTINUO

LUIS MIGUEL CALVO HERRERO

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA AVANZADA DE FABRICACIÓN

UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA (UNED)

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

TESIS DOCTORAL

2015



ANÁLISIS DE LAS EMISIONES DE CO₂ COMO INDICADOR DE
EFICIENCIA Y SOSTENIBILIDAD EN PLANTAS INDUSTRIALES DE
PROCESO CONTINUO

LUIS MIGUEL CALVO HERRERO

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA AVANZADA DE FABRICACIÓN

UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA (UNED)

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

DEPARTAMENTO: INGENIERÍA DE CONSTRUCCIÓN Y FABRICACIÓN

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA (UNED)

ANÁLISIS DE LAS EMISIONES DE CO₂ COMO INDICADOR DE EFICIENCIA Y
SOSTENIBILIDAD EN PLANTAS INDUSTRIALES DE PROCESO CONTINUO

LUIS MIGUEL CALVO HERRERO

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA AVANZADA DE FABRICACIÓN

Directora:

Dra. MARIA ROSARIO DOMINGO NAVAS

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi esposa Susana y a mis hijos Cristian y Alicia por el apoyo recibido durante todo el tiempo que he tenido dedicar al simultanear mi carrera profesional con la realización de la presente Tesis.

Me gustaría también agradecer a mi directora de Tesis, Dra. Maria Rosario Domingo Navas, por su persistencia, su paciencia, su esfuerzo y apoyo durante todo el proceso. Tiene mi más sincera admiración por todo lo que me ha aportado en el tiempo que ha durado esta Tesis Doctoral.

<i>Abreviaturas</i>	4
<i>Símbolos</i>	5
<i>Índice de Figuras</i>	8
<i>Índice de Tablas</i>	11
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.	13
1.1.- <i>La eficiencia y la sostenibilidad en fabricación.</i>	15
1.1.1.- <i>Sostenibilidad.</i>	16
1.1.2.- <i>Mantenimiento del sistema productivo.</i>	18
1.1.3.- <i>Emisiones de CO₂ como indicador de eficiencia de producción.</i>	19
1.1.4.- <i>Relación de eficiencia de producción y emisiones de CO₂.</i>	21
1.1.5.- <i>Fabricación de papel.</i>	23
1.2.- <i>Objetivos de la Tesis.</i>	24
1.3.- <i>Estructura de la Tesis.</i>	29
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA.	32
2.1.- <i>Introducción.</i>	32
2.2.- <i>Los procesos de producción continuos y las emisiones de CO₂.</i>	34
2.3.- <i>Influencia de la legislación en las emisiones de CO₂.</i>	36
2.4.- <i>Estrategias globales para la reducción de emisiones de CO₂.</i>	40
2.5.- <i>Sostenibilidad, eficiencia y emisiones de CO₂.</i>	42
2.6.- <i>Las emisiones de CO₂ y el proceso de fabricación de papel.</i>	43
2.6.1.- <i>El proceso de secado y las características del papel.</i>	46
2.6.2.- <i>Influencia del mantenimiento en las emisiones de CO₂.</i>	49
2.6.3.- <i>Aspectos energéticos y parámetros operativos del proceso de secado del papel.</i>	53
2.6.4.- <i>Influencia de los sistemas de gestión en las emisiones de CO₂.</i>	58
2.6.5.- <i>Sistemas alternativos de secado del papel.</i>	59
2.7.- <i>Consideraciones finales.</i>	62
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA Y EQUIPOS UTILIZADOS.	65

3.1.- <i>Introducción</i>	65
3.2.- <i>Metodología del estudio del caso</i>	66
3.3.- <i>Determinación de las emisiones de CO₂</i>	69
3.4.- <i>Determinación de los datos históricos de producción</i>	72
3.5.- <i>Determinación de la disponibilidad de máquina</i>	76
3.6.- <i>Determinación de la influencia del tipo de papel en las emisiones de CO₂</i>	82
3.7.- <i>Procedimiento estadístico de datos</i>	85
3.8.- <i>Sistema de gestión medioambiental y corporativa</i>	86
3.9.- <i>Determinación de los flujos de aire relacionados con el proceso de secado</i>	89
3.9.1.- <i>Cálculo de los flujos de aire de la nave</i>	89
3.9.2.- <i>Cálculo de las emisiones de CO₂ asociadas a las pérdidas de energía</i>	91
3.10.- <i>Equipos utilizados</i>	92
3.11.- <i>Consideraciones finales</i>	101
CAPÍTULO 4. EL PROCESO DE FABRICACIÓN DEL PAPEL	102
4.1.- <i>Fases del proceso de fabricación del papel</i>	102
4.1.1.- <i>Preparación de pasta</i>	102
4.1.2.- <i>Formación de la hoja</i>	103
4.1.3.- <i>Sección de secado del papel</i>	104
4.1.4.- <i>Sección de terminación y embalado</i>	104
4.2.- <i>Aspectos operativos de la sección de secado</i>	105
4.2.1.- <i>Sistema de agua fría añadida al circuito de la caldera</i>	106
4.2.2.- <i>Control de temperatura del aire soplado a campana</i>	108
4.2.3.- <i>Control de temperatura y humedad del aire del interior de campana</i>	110
CAPÍTULO 5. RESULTADOS	112
5.1.- <i>Introducción</i>	112
5.2.- <i>Variación del indicador, análisis previo</i>	113
5.3.- <i>El Indicador “t CO₂/ t Producción” frente a la disponibilidad</i>	118
5.4.- <i>El Indicador “t CO₂ / t Producción” frente al tiempo de parada</i>	119
5.5.- <i>El Indicador “t CO₂/ t Producción” frente a la duración de parada</i>	120
5.6.- <i>Ajuste del Indicador “t CO₂/ t Producción” frente a variables de disponibilidad</i>	122
5.7.- <i>El Indicador “t CO₂/ t Producción” frente al tipo de producto</i>	124
5.8.- <i>El indicador “t CO₂/ t Producción” respecto al producto y temperatura exterior</i>	127

5.9.- El Indicador “t CO ₂ / t Producción” respecto a los parámetros de producción en la sección de secado.	131
5.9.1.- Estudio del indicador “t CO ₂ / t Producción”.....	132
5.9.1.1.- Agrupación de productos por tipo de papel	132
5.9.1.2.- Resultados experimentales.....	138
5.9.1.3.- Relación del indicador con la temperatura	139
5.9.2.- Diseño del experimento.....	141
5.9.3.- Hallazgos del análisis.	144
5.10.- Relación entre el indicador y las operaciones de mantenimiento de fábrica. ...	147
5.10.1.- Agua de reposición al circuito de caldera.....	148
5.10.2.- Temperatura de soplado de aire a la campana de secado.....	155
5.11.- Relación entre el indicador y el aislamiento de campana.....	159
5.11.1.- Estudio de los flujos de aire.....	160
5.11.2.- Energía añadida a los flujos de aire.....	163
5.12.- Consideraciones finales sobre los resultados.....	172
CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN.	174
6.1.- Introducción.	174
6.2.- Análisis de resultados.....	175
6.3.- Evolución de las emisiones de CO ₂	187
6.4.- Consideraciones finales sobre el análisis de resultados.	190
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.....	191
CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA	197

ABREVIATURAS

CMS	Corporate Management System (Sistema de Gestión Corporativa).
DA	Datos de la Actividad.
EMS	Environmental Management System (Sistema de Gestión Medioambiental).
ETS	European Trade Scheme (Sistema Europeo de Comercio de Emisiones).
FE	Factor de Emisión.
FO	Factor de Oxidación
GEI	Gases de Efecto Invernadero.
KPI	Key Performance Indicator (Indicador Clave de Rendimiento).
MTD	Mejores Técnicas Disponibles
QCS	Quality Control System (Sistema de Control de Proceso).
SCADA	Software para Supervisión, Control y Adquisición de Datos.

SÍMBOLOS

A_x	Área de la abertura X de la nave de producción.
C_p	Presión de los condensados extraídos de la sección de secado.
C_{rt}	Temperatura del retorno de condensados.
C_t	Temperatura de condensados extraídos de la sección de secado.
C_w	Caudal de agua añadida al circuito de caldera.
Dep	Punto de rocío.
D_p	Días de producción.
D_p	Temperatura del punto de rocío.
E_{am}	Humedad del aire extraído de la campana de secado.
E_{at}	Temperatura del aire extraído de la campana de secado.
E_{bm}	Humedad del aire de soplado a campana de secado.
E_{bt}	Temperatura del aire de soplado a campana de secado.
H_{ri}	Humedad relativa del flujo i.
M_s	Velocidad de máquina.
O_m	Humedad del aire exterior.
O_t	Temperatura del aire exterior
P_{ae}	Pérdidas anuales de emisiones.

Pd	Densidad superficial del papel.
Pde	Pérdidas diarias de emisiones.
Pg	Tipo de producto fabricado.
Pmi	Contenido de humedad del papel a la entrada de sección de secado.
Pmo	Humedad del papel a la salida de la sección de la sección de secado.
Pti	Temperatura del papel a la entrada de la sección de secado.
Pto	Temperatura del papel a la salida de la sección de secado.
Pwi	Ancho del papel a la entrada de la sección de secado.
Q	Caudal o flujo de aire debido al efecto termo-sifón.
Sf	Caudal de vapor a la sección de secado.
Sp	Presión de vapor a la sección de secado.
St	Temperatura de vapor a la sección de secado.
Tac	Tiempo de producción parado por avería o mantenimiento correctivo de origen conocido.
Tad	Tiempo de producción parado por avería o mantenimiento correctivo, origen desconocido.
Tam	Tiempo de parada de producción por microparadas.
Tei	Tiempo de espera de máquina.
Tfs	Tiempo en el que la máquina está fuera de servicio.
Th	Temperatura de salida del aire de la nave de producción.

Ti	Temperatura del flujo i de aire.
Tmp	Tiempo de paradas de producción por mantenimiento preventivo.
Tp	Tiempo producción de máquina.
Tpp	Tiempo de parada de producción por requerimientos de producción
Ts	Tiempo de ajuste de máquina.
Tt	Tiempo programado de producción previsto para la máquina
Wt	Temperatura del agua a la entrada de la sección de secado.
Δh	Diferencia de altura entre dos aberturas de la nave de producción.
ΔP	Diferencia de presión debida a la diferencia de altura entre dos aberturas de la nave de producción.

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 3.1. Datos del QCS con detalle de los parámetros extraídos.....	80
FIGURA 3.2. Producciones por gramaje para el tipo de papel C0A.	84
FIGURA 3.3. Producciones por gramaje para el tipo de papel C1A.	84
FIGURA 3.4. Ejemplo de los datos recogidos por el QCS.	96
FIGURA 3.5. Medición de humedad (Pmi) y temperatura (Pti) del papel recogidos por el QCS.....	97
FIGURA 3.6. Control de temperatura (Pti) y caudal vapor (Sf) recogidos por el QCS.	97
FIGURA 3.7. Medición de densidad superficial (Pd), humedad (Pmo) y temperatura (Pto) del papel recogidos por el QCS.	98
FIGURA 3.8. Medición de las características del retorno de condensados (Ct, Cp) recogidos por el QCS.....	99
FIGURA 3.9. Medición de las características del vapor (Sf, St, Sp) recogidos por el QCS y sistema de distribución y regulación de vapor.	99
FIGURA 4.1. Diagrama del proceso.	109
FIGURA 5.1. Disponibilidad por años – “t CO ₂ / t Producción”.	113
FIGURA 5.2. Tfs (horas) paro por años – “t CO ₂ / t Producción”.	114
FIGURA 5.3. Duración media de la parada por años - indicador.	117
FIGURA 5.4. Duración de la parada por años – indicador.	118
FIGURA 5.5. Disponibilidad – emisiones “ t CO ₂ / t Producción”.	119
FIGURA 5.6. Tiempo de parada – emisiones “ t CO ₂ / t Producción”.	120
FIGURA 5.7. Comparación de los valores mensuales y medios de días con paradas “t CO ₂ / t Producción”.	121
FIGURA 5.8. Duración media de parada – emisiones “t CO ₂ / t Producción”.....	121
FIGURA 5.9. Duración de paradas cortas – emisiones “t CO ₂ / t Producción”.	122
FIGURA 5.10. Ajuste del indicador.	123
FIGURA 5.11. Relación entre el indicador, el tipo de producto y el gramaje del papel. .	125
FIGURA 5.12. Relación entre el indicador y el tipo de producto en gramajes bajos, 200 g/m ²	125

FIGURA 5.13. Relación entre el indicador y el tipo del producto en gramajes medios, 350 g/m ²	126
FIGURA 5.14. Relación entre el indicador y el tipo de producto en gramajes medios, 500 g/m ²	126
FIGURA 5.15. Relación entre el indicador y el tipo de producto en gramajes altos, 630 g/m ²	127
FIGURA 5.16. Relación entre el indicador, tipo de producto y gramaje para temperaturas entre -5 y 5°C.	128
FIGURA 5.17. Relación entre el indicador, tipo de producto y gramaje para temperaturas entre 5 y 10°C.....	128
FIGURA 5.18. Relación entre el indicador, tipo de producto y gramaje para temperaturas entre 10 y 15°C.	129
FIGURA 5.19. Relación entre el indicador, tipo de producto y gramaje para temperaturas entre 15 y 20°C.	129
FIGURA 5.20. Relación entre el indicador, tipo de producto y gramaje para temperaturas entre 20 y 25°C.	129
FIGURA 5.21. Relación entre el indicador, tipo de producto y gramaje para temperaturas entre 25 y 30°C.	130
FIGURA 5.22. Relación entre el indicador, tipo de producto y gramaje para temperaturas entre 30 y 35°C.	130
FIGURA 5.23. Valores medios e intervalos de confianza al 95,0% del indicador “t CO ₂ / t Producción” respecto al tipo de papel.	134
FIGURA 5.24. Valores medios e intervalos de confianza al 95,0% del indicador “t CO ₂ / t Producción” respecto al gramaje.	134
FIGURA 5.25. Valores medios e intervalos de confianza al 95,0% del indicador “t CO ₂ / t Producción” respecto a la temperatura exterior (<i>O_t</i>).	134
FIGURA 5.26. Media e intervalos de confianza de los principales parámetros respecto al indicador “t CO ₂ / t Producción”.	144
FIGURA 5.27.a - h Imágenes térmicas.	168
FIGURA 6.1. Evolución del indicador - “t CO ₂ / t Producción” del 2001 al 2013.	188

FIGURA 6.2. Evolución mensual del indicador - “t CO₂ /t Producción” desde 2001 a 2013.

..... 189

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 3.1. <i>Información extraída del QCS.</i>	81
TABLA 3.2. <i>Distribución de producción por tipo de papel.</i>	82
TABLA 3.3. <i>Distribución de producción, kg producidos de cada tipo de papel y gramaje en un año.</i>	83
TABLA 5.1. <i>Incremento del indicador en porcentaje en los días que hay parada con respecto a la media mensual del indicador.</i>	116
TABLA 5.2. <i>Modelos de ajuste.</i>	123
TABLA 5.3. <i>Resultado del análisis de la varianza.</i>	133
TABLA 5.4. <i>Regresión lineal (tipo de papel – indicador).</i>	135
TABLA 5.5. <i>Contraste de tipo de papel, gramaje y temperatura en el test de Student-Newman-Keuls.</i>	137
TABLA 5.6. <i>Los resultados de los parámetros y variables extraídas de QCS y límites experimentales.</i>	138
TABLA 5.7. <i>Correlación de temperaturas de proceso con temperatura exterior.</i>	140
TABLA 5.8. <i>ANOVA para “t CO₂/ t Producción”.</i>	143
TABLA 5.9. <i>Resultados medias y límites de cada factor y nivel del indicador “t CO₂/ t Producción”.</i>	145
TABLA 5.10.a. <i>Media diaria de producción de vapor y agua (Cw) añadida al circuito, debido a las purgas de caldera y a las pérdidas de vapor en la sección de secado 2004-2008.</i>	153
TABLA 5.10.b. <i>Media diaria de producción de vapor y agua (Cw) añadida al circuito, debido a las purgas de caldera y a las pérdidas de vapor en la sección de secado 2009-2013.</i>	153
TABLA 5.11. <i>Datos del aire antes y después de la reparación de los intercambiadores.</i>	158
TABLA 5.12. <i>Balance de emisiones, porcentaje de pérdidas por calentamiento de los flujos de aire.</i>	159

TABLA 5.13. <i>Flujos de aire.</i>	165
TABLA 5.14. <i>Energía de cada flujo de aire.</i>	169
TABLA 5.15. <i>Método de los flujos de aire. Balance de emisiones, porcentaje de pérdidas.</i>	170
TABLA 5.16. <i>Método tradicional. Balance de emisiones, porcentaje de pérdidas.</i>	171

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La actividad de fabricación industria actual, tanto de procesos continuos como discretos, se caracteriza por la importancia que tienen los aspectos relativos al control del proceso. El objetivo es mantenerlo controlado para cumplir con los requisitos de calidad del producto fabricado con la eficiencia del proceso en valores óptimos.

Con este objetivo, se suelen dotar a las plantas industriales de sistemas de control que integran una gran cantidad de sensores y controles, que pretenden ayudar a conseguir el objetivo inicial de operar el proceso de forma controlada y dentro de los parámetros previstos. Estos sistemas aportan infinidad de datos, pero no todos estos datos se pueden emplear para medir la eficiencia del proceso de fabricación.

Otro aspecto que hay que tener en cuenta, que está directamente relacionado con los procesos de producción, lo constituye el impacto que el proceso de fabricación genera tanto en los propios operarios de planta como en el entorno donde se encuentra ubicada la actividad industrial.

Los principales factores que afectan a la opinión y valoración que tienen tanto los operarios como la población respecto a los procesos industriales, suelen basarse en los residuos generados y las emisiones de productos contaminantes entre los que se encuentran los vertidos a red de agua y las emisiones atmosféricas. Esta sensibilización suele ser generalmente negativa, asociando frecuentemente los procesos de producción con la generación de residuos y el aumento de la contaminación.

Pese a las reticencias que hay sobre los procesos industriales en general, las fábricas se consideran necesarias para mantener el nivel actual de desarrollo y bienestar. Hecho que implica que el control de las variables medioambientales sea muchas veces tan importante como el control de los parámetros del propio proceso productivo.

Los procesos continuos, como el sector siderúrgico, el sector del vidrio, el sector de la construcción, el sector petroquímico, el sector metalúrgico y el sector del papel, suelen estar asociados a plantas de gran tamaño. A mayor tamaño generalmente implica mayor impacto ambiental, y si cabe en estas plantas son más sensibles a este tipo de controles.

Los últimos años, para mejorar la imagen exterior de los complejos industriales, muchas de las plantas han optado por sistemas voluntarios de gestión, auditoría y control, como el reglamento EMAS, sistemas de gestión medioambiental como ISO 14001, ISO 50001 y sistemas de gestión tanto de salud interna con la OHSAS 18001 o respecto al entorno donde están ubicadas mediante los proyectos de Responsabilidad Social Corporativa. Habitualmente se elaboran documentos tipo “Memorias de Sostenibilidad” para demostrar los controles llevados a cabo en el proceso productivo y el impacto que la actividad genera sobre el entorno.

Si tenemos en cuenta las emisiones atmosféricas, quizás la sensibilización principal está centrada sobre las emisiones de gases de efecto invernadero y sobre el efecto que provocan en la atmosfera y el medioambiente.

Las administraciones públicas se han hecho eco de la importancia de los aspectos medioambientales asociados a los procesos industriales y han avanzado en la monitorización, control y distribución de información relacionada con la contaminación generada por cada proceso industrial en particular.

Respecto a las emisiones atmosféricas en general y las emisiones de CO₂ en particular desde 2005 en Europa ya se han sucedido tres planes de asignación de derechos de emisión traspuestos al reglamento español (Real Decreto 5/2004, Real Decreto 1866/2004, Real Decreto 60/2005, Real Decreto 777/2006, Real Decreto 1370/2006, Ley 13/2010) con el objetivo de concienciar a la industria de la importancia del control de las emisiones que genera en sus procesos y forzarla a reducir el volumen de sus emisiones.

En este último tercer plan (Ley 13/2010) que empezó en 2013 y tendrá validez hasta 2020, se ha avanzado un paso más respecto a los anteriores planes, mediante la imposición de una tasa a la contaminación. El endurecimiento de la legislación está forzando a los procesos industriales a reducir o incluso eliminar en lo posible sus emisiones atmosféricas.

Las emisiones de CO₂ se han convertido en un coste significativo en los procesos actuales de producción. El coste afecta en primer lugar a las plantas de producción con consumo de energía térmica derivada del uso de combustibles fósiles como el gas natural. El coste también se ve incrementado por el uso de energía eléctrica, ya que la no gratuidad de las emisiones a los sectores de generación de electricidad ha hecho que se interiorice el coste de las emisiones en el precio de la electricidad.

La ubicación del proceso industrial, no es insensible a los costes medioambientales necesarios para mitigar el efecto de su contaminación en general y las emisiones de CO₂ en particular. Hay una diferencia significativa entre las fábricas situadas en áreas políticas adheridas al Protocolo de Kioto (Naciones Unidas, 1998) por el sobrecoste asociado a la necesidad de adquirir los derechos de emisión, como puede ser la Unión Europea, y las que no lo están como Estados Unidos, China, etc. que no tienen dicho coste. El indicador “Emisiones de CO₂ (kt)” recopilado por el Banco Mundial (2015) procedente de la quema de combustibles fósiles sólidos, líquidos, gaseosos y de la quema de gas, muestra claramente que los países que más emiten son China, Estados Unidos seguidos de Rusia e India, todos ellos no han ratificado el Protocolo de Kioto (Naciones Unidas, 1998).

Como medio de compensación a los procesos industriales que se pueden ver afectados por la deslocalización (por ejemplo los situados en la Unión Europea), debido a los costes que produciría la asunción del precio a pagar por la emisión de estos gases, hay procesos industriales con asignación parcial gratuita de derechos de emisión. La necesidad de esta asignación gratuita para conservar el tejido industrial evidencia que el sobrecoste afecta significativamente a la competitividad de la fábrica y puede abocar a más de una planta al cierre.

Los complejos industriales han considerado las emisiones de CO₂ frecuentemente, por no decir siempre desde el inicio del primer plan de asignación de 2005 derivado del Protocolo de Kioto (Naciones Unidas, 1998), como una consecuencia del proceso de producción. Las emisiones generalmente solo significaban un coste administrativo y eran vistas más como un impuesto que como una posible herramienta a través de la cual conocer el funcionamiento del proceso de producción.

1.1.- LA EFICIENCIA Y LA SOSTENIBILIDAD EN FABRICACIÓN

La industria papelera, gracias a sus particulares características, es uno de los sectores mejor posicionados en el camino del desarrollo sostenible. Con una materia prima natural y renovable, fabrica productos reciclables, a través de procesos de producción cada vez más sofisticados y en continua evolución (ASPAPPEL, 2014). Este es un sector en crecimiento y muy comprometido con el desarrollo sostenible, consciente de que sostenibilidad y competitividad son aspectos que deben estar unidos.

La fabricación de papel a partir de papel recuperado, es sencilla conceptualmente. Emplea las fibras de celulosa (procedentes tanto de madera como de papel recuperado), agua, electricidad y vapor para producir el papel. El proceso de producción industrial precisa maquinaria de muy alta tecnología y un exhaustivo control del proceso de producción.

El proceso papelerero utiliza electricidad para mover la maquinaria y energía térmica principalmente para secar la hoja de papel formada. El proceso de fabricación de papel supone aproximadamente el 6% de la energía consumida en la industria a nivel mundial (Laurijssen et al., 2010) y una parte muy significativa de las emisiones del CO₂ en la Unión Europea.

Desde el punto de vista productivo, la capacidad de secado en la sección de secado constituye frecuentemente el factor limitante de la producción en las plantas de fabricación de papel.

Se han realizado búsquedas sobre los términos sostenibilidad, emisiones de CO₂, indicadores de sostenibilidad, medidas de eficiencia y sostenibilidad, Mantenimiento Productivo Total (TPM), eficiencia de producción en la fabricación en general como en la de papel en particular con el objetivo de encontrar estudios que relacione ambos términos. Los resultados de la revisión bibliográfica se han estructurado en varios puntos: sostenibilidad, fabricación de papel, TPM, emisiones de CO₂ como indicador de eficiencia de producción y la relación entre eficiencia de producción y emisiones de CO₂.

1.1.1.- Sostenibilidad

Inicialmente el concepto de sostenibilidad ha estado más relacionado con el desarrollo sostenible, por tanto asociado a temas sociales, políticos y económico (Durán (2000), Vilches et al. (2009)) que con los procesos de producción industrializados. Son escasas las referencias que asocian la sostenibilidad con el mantenimiento de planta o la medida de la eficiencia del proceso productivo.

La visión de la sostenibilidad se asocia, respecto a los procesos industriales, frecuentemente desde el punto de vista de los recursos naturales. No faltan estudios sobre concepto de desarrollo sostenible (Gomes, 1997) basando su definición en los aspectos políticos, y como el crecimiento de la población puede suponer una amenaza para los recursos disponibles. Se hace un esfuerzo por intentar concienciar en la racionalización del uso de los recursos naturales, con el objetivo de preservarlos para futuras generaciones.

También está extendido el uso de indicadores de sostenibilidad (Rayen (2001), Red Nels (2009)) para medir el estado de la calidad del medioambiente, buscando medir niveles de contaminación, deterioro producido, etc. con el fin de poder plantear soluciones que intenten restaurar los entornos dañados por la acción humana o por lo menos mitigar los daños ya producidos.

Existen estudios sobre la medida de la sostenibilidad a través de indicadores económicos (Durán, 2000) que intentan revisar los indicadores que se han desarrollado desde las tres dimensiones de la sostenibilidad o sustentabilidad (económica, ecológica y social) para buscar criterios de homogeneidad que permita la comparación entre los diversos países o zonas geográficas.

Hay numerosos estudios sobre la relación entre innovación, tecnología y sostenibilidad que intentan poner de manifiesto desde distintos puntos de vista lo importante que es el empleo de las nuevas tecnologías (Holliday y Dormann (2002), Vilches et al. (2009)) para conseguir que los países que actualmente están en vías de desarrollo consigan, válgame la redundancia, un desarrollo sostenible y compatible con el medioambiente y el uso de recursos para que su población alcance mayores cotas de bienestar.

No faltan tampoco estudios de las consecuencias del uso de tecnologías limpias (Vilches et al., 2009) o el efecto beneficioso que las nuevas tecnologías (Intel Eco-Technology Innovations, 2007) aportan en el incremento de la eficiencia energética y por ende en el uso razonable de los recursos naturales y la sostenibilidad.

A pesar de todas los avances llevados a cabo en la literatura académica para encontrar relaciones entre la eficiencia y la sostenibilidad y el uso de indicadores asociados a ellas, sigue siendo necesario el análisis de procesos concretos que permitan su conocimiento exhaustivo y la definición de medidas que permitan cuantificar los progresos conjuntos en la eficiencia y la sostenibilidad de la producción.

1.1.2.- Mantenimiento del sistema productivo

Si la actividad vinculada con el mantenimiento es fundamental en la industria, en los procesos continuos adquiere mayor relevancia, debido a que los fallos en el proceso pueden llegar a provocar la parada de toda la planta; esto se acentúa aún más, en las secciones identificadas como cuello de botella. En líneas generales, en la industria, Alsyouf (2009) encuentra que los departamentos de mantenimiento emplean alrededor de un 13% de su tiempo a planificar las actividades de acuerdo a las recomendaciones de los fabricantes de los equipos, pero aproximadamente la tercera parte del tiempo han de dedicarlo a tareas no planificadas; lo anterior indica que a pesar de las técnicas de mantenimiento que se han desarrollado aún queda camino por recorrer en cuanto a su aplicación en la industria. Por otra parte Simoes et al. (2011) encuentran que en entornos de fabricación, es necesario medir, monitorizar y seguir los resultados de las acciones de mantenimiento.

Respecto al mantenimiento del sistema de producción en planta y en concreto sobre el sistema de mantenimiento productivo total o TPM, existen numerosos trabajos sobre su definición (Chand y Shirvani (2000), Alvarez (2009)), beneficio de su uso en diversos sectores (Eti et al. (2004), Eti et al. (2006)) e incluso causas del abandono por parte de las empresas del TPM después de haber intentado implantarlo (Rodrigues y Hatakeyama, 2006).

Se ha visto el beneficio de la implementación del TPM para la mejora de indicadores de producción (Chand y Shirvani (2000), Alvarez (2009)), se han construido métricas para medir el impacto de la implementación del TPM en la planta (Oechsner et al. (2003), Scodanibbio (2008)) e incluso los beneficios indirectos de la implementación del TPM (Rodriguez, 2002).

Aunque hay alguna investigación que ha relacionado la sostenibilidad con el principal indicador del TPM, es decir con la eficiencia global del equipo (OEE, Overall Equipment Effectiveness), como el trabajo desarrollado por Domingo y Aguado (2015), no se han encontrado trabajos específicos que permitan generar pautas de mantenimiento que mejoren conjuntamente la eficiencia y sostenibilidad del proceso de producción en general ni en la fabricación de papel en particular. No obstante este trabajo, no busca determinar el OEE, caracterizado por relacionar la disponibilidad de

los equipos, el rendimiento de los mismos y la tasa de calidad (Nakajima, 1988), sino analizar algunos de estos elementos junto a las emisiones de CO₂ e identificar patrones que faciliten su incremento mientras se reducen las emisiones.

1.1.3.- Emisiones de CO₂ como indicador de eficiencia de producción

En los últimos años se ha puesto de manifiesto la relación entre las emisiones de gases de efecto invernadero derivados de la actividad humana, entre los que se encuentran los procesos industriales, y el calentamiento global de la atmósfera. Dentro de las emisiones de gases de efecto invernadero, el indicador más importante por su volumen e importancia en Europa lo constituyen las emisiones de CO₂.

Como se ha mencionado anteriormente, la gran preocupación por el efecto que tendrá a medio y largo plazo el efecto de este calentamiento, está haciendo que su limitación y control se tome como una parte fundamental en la consecución de la sostenibilidad de nuestro entorno.

De las diversas búsquedas realizadas, se han encontrado estudios que indican la relación entre eficiencia energética y emisiones de CO₂ (Siitonen et al., 2010), las variables que afectan tanto a la eficiencia energética como a las emisiones y una visión de la reducción de emisiones como consecuencia de medidas de ahorro de energía en términos absolutos sin tener en cuenta la eficiencia de producción ni el impacto que este tiene en el indicador.

La mayor parte de los artículos encontrados provienen de revistas energéticas que no tienen en cuenta como se produce y con qué calidad, solo el hecho de la transferencia o transformación de energía.

Frecuentemente se ha abordado la medición de este indicador desde el punto de vista global desligándolo de la eficiencia de los procesos productivos. Ejemplo de este hecho lo constituye el nuevo plan de asignación de derechos de emisión que, aunque tiene en cuenta la comparación de un proceso respecto al que más eficiente se realiza (*benchmark*) supone un reparto igualitario de emisiones entre los diversos sectores sin tener en cuenta la situación de eficiencia de cada sector individual y sin tener en cuenta

que el grueso de las emisiones lo constituyen sectores difusos (transporte, consumo doméstico, pequeños procesos industriales) en los que no se revisa esta eficiencia.

En el año 2005 se introdujo en Europa como medida de intento de control, el primer periodo de asignación “Derechos de emisión de CO₂” en diversos sectores de producción industrial y generación de energía con la intención de reducir en la medida de lo posible la emisión de este gas de efecto invernadero a la atmósfera.

En la actualidad en el tercer periodo (Ley 13/2010), en el que ha evolucionado el sistema que inicialmente se basó en la asignación de derechos basados en ratios históricos de consumos energéticos y actividad, para pasar a una asignación únicamente en función del calor útil empleado en el proceso.

Después de descontar con este método la teórica “sobreasignación” debida al cálculo de las emisiones sin tener en cuenta la eficiencia de su transformación en calor y la posterior eficiencia de la transferencia en el proceso productivo, se prevé una reducción paulatina de la asignación gratuita de derechos de emisión desde el 70% en los mejores casos a principios de 2013 (para la mayoría de las plantas industriales) hasta un 20% de asignación en 2020 y con el objetivo de reducción de las emisiones globales del 80% a finales de 2050.

Dentro de la asignación, y para el sector de fabricación de papel considerado como “*carbon leakage*” o en riesgo de fuga de carbono, se contempla la asignación “gratuita” de las emisiones de proceso basadas en un *benchmark* que tiene como base las referencias de emisiones del 10% de los procesos de producción más eficientes de cada tipo de papel dentro de la Unión Europea.

El *benchmark* de asignación de emisiones constituye, en sí, un indicador válido para la medida de la efectividad del proceso y que permitirá comparar nuestro proceso con otras fábricas del sector. El control de las emisiones se hace necesario, puede aportar una ventaja competitiva de la planta industrial, e incluso comprometer su continuidad por su mala gestión.

La importancia no solo económica, sino también estratégica por el carácter que adquieren las emisiones de CO₂; sin embargo los países emergentes e incluso EE. UU. y China siguen en la actualidad sin ratificar el Protocolo de Kioto (Naciones Unidas, 1998). Este hecho provoca que los objetivos sobre la reducción de emisiones se vean

comprometidos y solo tengan un efecto parcial en el mundo, pues se siguió sin ratificar en los acuerdos posteriores alcanzados en cumbres como las de Johannesburgo (2002) y Bali de 2007 (Ecoportal, 2012), Copenhague (2009) o en Cancún (2010). Tampoco se llegó a un acuerdo en la cumbre de Durban (2011), o en la de Doha (2012) donde se extendió el Protocolo hasta 2020; no obstante se espera que se alcancen en próxima cumbre de París a celebrar a finales de 2015. La extensión del periodo hasta 2020 está asumido por la Unión Europea (Decisión 2015/146).

1.1.4.- Relación de eficiencia de producción y emisiones de CO₂

Las emisiones de CO₂, varían en función de la fuente de energía utilizada. El principal proceso en el que se generan las emisiones de CO₂ corresponde a la utilización de combustibles fósiles y sus derivados en cualquiera de sus formas (sólidos, líquidos y gases). Dentro del proceso de combustión con combustibles denominados “limpios” como el gas natural, una parte de las emisiones dependen del foco generador de calor (quemador, motor de cogeneración, turbina, etc.) y otra con más importancia si cabe de la propia instalación térmica de aprovechamiento de este calor en el proceso productivo.

Los conceptos actuales de eficiencia energética en el uso de calor obtenido por combustión se aplican principalmente al consumo de combustibles fósiles y se basan en la optimización del uso de la energía para reducir su consumo. Se hace necesario un cambio de enfoque de la fabricación en general y de la de papel en particular viendo la efectividad de la propia producción y la influencia que tienen las condiciones de mantenimiento de equipos y operativas del proceso en la generación de emisiones.

La limitación de las emisiones de CO₂ puede suponer una limitación de facto de la actividad industrial. La importancia de su seguimiento y control se hace más que evidente.

De las numerosas búsquedas realizadas, como se ha comentado anteriormente, se ha encontrado un gran número de trabajos respecto a la generación de las emisiones de CO₂ y su influencia en el cambio climático actual, la necesidad de limitarlas e ir sustituyendo las fuentes de energía basadas en combustible fósil por renovables o menos contaminantes.

Generalmente también se aborda el problema de las emisiones de CO₂ desde el punto de vista del consumo de energía indicando que, empleando sistemas de transformación más eficientes (bombillas, electrodomésticos, motores, etc.), se conseguirá una disminución de las emisiones.

Teniendo en cuenta el volumen de consumo de energía que tiene el sector industrial en general y el sector papelero en particular, las emisiones de CO₂ derivadas de este consumo (directa o indirectamente) se han considerado frecuentemente como una consecuencia del proceso productivo necesario e inevitable.

La mayoría de las plantas de producción industrial consideran que solo se pueden reducir las emisiones de CO₂ sustituyendo equipos por otros más modernos y/o eficientes, fomentando las políticas de ahorro energético (iluminación, trabajo de máquina a carga nominal, etc.) e incluso indirectamente calculando la huella del carbono del producto fabricado teniendo en cuenta el transporte de materias primas, la transformación y expediciones con objeto de minimizarla con los procesos externos a la planta de producción, como el uso de otro tipo de materiales, etc.

Generalmente los equipos nuevos con el tiempo se deterioran o no funcionan en los parámetros para los que se diseñaron. Las condiciones para las que se diseñaron los equipos pueden no ser las actuales de funcionamiento por diversos motivos, lo que trae como consecuencia que la eficiencia actual de la instalación pueda quedar muy alejada de la inicialmente planteada.

Son escasos los estudios o trabajos que pongan de manifiesto la necesidad de realizar un seguimiento y mantenimiento de las instalaciones para posibilitar mantener o reducir las actuales emisiones de CO₂ de una planta industrial, así como la introducción de indicadores de TPM asociados a este control, y la relación entre las emisiones de CO₂ y estos indicadores así como con la eficiencia de producción. Es necesario seguir profundizando en este tipo de relaciones.

Lo que a priori sí parece factible es encontrar la relación entre las emisiones de CO₂ y la producción. La ratio de las emisiones de CO₂ relativo a la producción puede ser un indicador válido para revisar el estado de la producción real. Un incremento de esta ratio debido al deterioro de las instalaciones puede tenerse en cuenta para evaluar la capacidad de producción de la fabricación en general y la de papel en particular, para intentar encontrar las causas de las disminuciones de la producción debidas a ineficiencias del proceso.

1.1.5.- Fabricación de papel

Se ha revisado la información publicada sobre el proceso de producción de papel en general y sobre la sección de secado del papel en particular. Se han encontrado numerosos estudios respecto al proceso general del secado, su eficiencia y el impacto medioambiental que generan.

Desde la propia asociación de fabricantes de pasta y papel (ASPAPPEL, 2014) se toma conciencia en su memoria de sostenibilidad de la importancia de las emisiones de CO₂ como indicador de la eficiencia del proceso en la que se puede observar su evolución en los últimos años.

La importancia que tienen las emisiones de CO₂ en esta asociación, que aglutina en España a la mayoría de los fabricantes de pasta y papel y más del 90% de su producción (ASPAPPEL, 2014), se refleja también por la realización de jornadas multidisciplinarias periódicas en las que interviene tanto el entorno universitario y los fabricantes de equipos directamente implicados en el proceso (Torres (1985), Brunnschweiler (2010), IPE (2011)) y la publicación de libros específicos que se consideran como manual de referencia para conocer las variables físicas que toman parte en el proceso de secado (Navas (1976), Karlsson (2000)). El enfoque de estos trabajos se hace siempre considerando las variables físicas del secado del papel y no desde el punto de vista de indicadores de TPM que permitan controlar y prevenir la pérdida de eficiencia de la instalación.

Las publicaciones en la literatura especializada, que analizaremos detalladamente en las siguientes secciones de la Tesis, suelen tener por objetivo revisar la influencia del proceso de secado en las características del papel (Reese (1992), Patel et al. (1995), Karlsson (2000), Hostetler et al. (2005), Bicudo (2008), Triantafillopoulos (2010)), los nuevos sistemas y desarrollos que mejoran la eficiencia del proceso (Wedel et al. (2000), Lang et al. (2001), Capozzi et al. (2001), Martin et al. (2004), Karner y Herzog (2008), Dumortier (2010), Laurijssen et al. (2010)). También la influencia que tiene cada una de los elementos de la sección de secado en el secado (Barber, 2011) así como el diseño y dimensionamiento (Bauer et al., (1998), Reese (1992)) de esta sección.

Se ha encontrado también numerosos estudios sobre el aspecto energético desde el punto de vista teórico (Söderman y Pettersson (2003), Sivil et al. (2005), Zvolinschi et al. (2006)) y su análisis para maximizar la recuperación de energía y reutilizarla en otras partes del proceso de fabricación (Walimaki (2004), Sivil y Ahtila (2009), Laurijssen et al. (2010)).

Otros estudios analizan la reducción de consumo de energía (Austing, 2010) por medio del control del proceso de producción y otras publicaciones que plantean la relación entre eficiencia energética y productividad (Virtamen et al., 2010).

Diversos autores analizan la relación entre la eficiencia energética y emisiones de CO₂ en sectores con procesos continuos como el metal (Siitonen et al., 2010), caucho (Saidur y Mekhifel, 2010) y las implicaciones que tiene el marco regulatorio en la industria (Tanaka (2008), Wang et al. (2011)). No se han encontrado estudios similares relacionados con la fabricación de papel.

Sin embargo no se ha encontrado en esta revisión como la identificación y uso de indicadores medioambientales aplicados a una instalación existente permitan evaluar tanto la eficiencia energética del proceso de secado como relacionar esta eficiencia energética con la capacidad disponible de producción. No se ha encontrado en esta revisión estudios que relacionen las emisiones de CO₂ como indicador de la sostenibilidad del proceso de producción.

1.2.- OBJETIVOS DE LA TESIS

Considerando lo expuesto hasta ahora, se van a estudiar la problemática de las emisiones de CO₂ en la industria de fabricación de papel, para ver si es factible utilizar las emisiones de CO₂ como indicador en el proceso, para emplearlo como instrumento de medida de eficiencia y sostenibilidad en el área de producción.

Analizaremos también la relación entre las emisiones y el estado de mantenimiento y puesta a punto de la planta, para comprobar si en este caso también se puede asociar las variaciones del indicador de emisiones de CO₂ con el estado de mantenimiento de la maquinaria asociada al proceso.

Estudiaremos la influencia de la introducción de indicadores relativos al funcionamiento de proceso, para ser relacionados posteriormente con algunos elementos considerados en la medida de los resultados de la implantación del TPM, así como un control de las condiciones operativas de la planta en la variación de la producción y el indicador de emisiones de CO₂ relativo a esta producción.

El cambio de enfoque que se pretende introducir es la evaluación de los procesos desde el prisma de las emisiones de CO₂ y no desde el punto de vista únicamente energético, evitando relegar a las emisiones a una mera consecuencia del consumo de energía sobre el que no se puede actuar.

La introducción de un *benchmark* de producto en el sector de fabricación de pasta y papel para la asignación de derechos de emisión, significa de alguna forma una evaluación relativa de la contaminación generada por el proceso de fabricación. Aprovecharemos la comparación de las emisiones de la planta respecto al *benchmark* para analizar el comportamiento respecto a la sostenibilidad y efectividad del proceso de fabricación. El *benchmark* lo establece la Comisión Europea analizando los datos de contaminación de las fábricas de un mismo sector, en concreto se corresponde con el valor declarado por el 10% de las fábricas menos contaminantes.

Revisaremos la relación existente y frecuentemente olvidada, entre el indicador analizado “t CO₂/t Producción” de sostenibilidad y alguno de los elementos claves considerados en la medida de la eficiencia en fabricación, como OEE definido por Nakajima (1988), la eficacia total del rendimiento (OTE, Overall Throughput Effectiveness) analizado por Kanthi y Muthiah (2007) o la eficiencia global de planta, OFE (Overall Factory Effectiveness) establecido por Oechsner et al. (2003) para ver la importancia de estos indicadores no solo por el coste directo que provoca (pago por uso de energía, gestión de residuos, etc.) sino también por el efecto que tiene sobre la disponibilidad de máquina y la calidad del producto fabricado.

La elección del sector de fabricación de papel no ha sido casual. La fabricación de papel está afectada directamente por el Protocolo de Kioto (Naciones Unidas, 1998) y sometida al régimen de comercio de derechos de emisión, que implica un coste medioambiental directo respecto a la energía empleada que puede hacer inviable el funcionamiento de la planta.

En el sector de fabricación en general y el de papel en particular, se ha considerado frecuentemente la reducción de emisiones de CO₂ como consecuencia del

aumento de la eficiencia energética del proceso. Este hecho se ha asociado principalmente a la reducción del consumo de energía primaria o al cambio de maquinaria e instalaciones antiguas por otras nuevas más “eficientes”, como la instalación de sistemas de cogeneración de con mayor eficiencia eléctrica, uso de calderas con mejor rendimiento, uso de intercambiadores con menor resistencia térmica, mejoras de aislamiento en las instalaciones térmicas, etc.

Habitualmente, la primera acción para reducir las emisiones de CO₂ ha sido la sustitución de la fuente de energía fósil como petróleo, carbón y fueloil por otra menos contaminante como el gas natural o incluso alternativas como la biomasa y en menor medida la solar, eólica e hidráulica que tienen asociado menores emisiones para el mismo uso de energía.

Dichas soluciones reducen inicialmente las emisiones por la sustitución de la fuente de energía o por la sustitución de máquinas y elementos de proceso, pero dichas máquinas también envejecen y se vuelven menos eficientes debido al cambio en las condiciones operativas y a su estado de mantenimiento.

En los procesos de producción de papel, los distintos equipos implicados en el secado térmico, pueden y de hecho pierden por diversas razones la eficiencia inicialmente calculada. No se conoce que se haya abordado la posibilidad de la reducción de emisiones como consecuencia del seguimiento y mantenimiento de las instalaciones que, inicialmente, eran más eficientes que las que sustituían pero que se deterioran en igual medida produciendo una menor eficiencia global. De la misma manera no se conoce el uso del indicador de emisiones de CO₂ como herramienta para seguir el estado de la instalación.

Un incremento del indicador provoca una reducción de eficiencia que puede traer como consecuencia:

- Considerando la sección de secado un aspecto limitante de producción, una disminución de su capacidad.
- Un deterioro de la maquinaria y/o elementos de la instalación de secado del papel.

Para lo cual se revisará:

- Cuáles son las instalaciones y aspectos operativos de planta identificados que tienen influencia directa sobre la ratio de emisiones de CO₂.
- Qué influencia tiene la eficiencia de dichas instalaciones respecto a la capacidad de producción.

Con el objetivo de poder identificar, ante un cambio del valor del indicador, el elemento o elementos que no están funcionando como se tenía previsto.

El estudio pretende demostrar que se puede introducir el indicador “t CO₂ / t Producción” como indicador válido para medir el estado de mantenimiento y puesta a punto de la maquinaria del proceso.

El uso de este indicador puede ser una herramienta para ayudar a encontrar las causas de las disminuciones de la producción debidas a ineficiencias, y para establecer las condiciones operativas que permitan un incremento de la capacidad de producción en el cuello de botella del proceso de fabricación de papel.

En ese estudio se tratará de encontrar las variables de proceso pueden influir en el indicador, como la tipo de producto fabricado y el gramaje de papel. En el caso del tipo de papel que se fabrica, cada uno tiene una formulación distinta tanto de materia prima como de productos añadidos, lo que hace que puedan tener una característica específica en la facilidad de eliminación del agua que contiene y por lo tanto un nivel de indicador “t CO₂ / t Producción” de partida distinto.

Analizaremos la relación que existe entre el indicador y el tipo de papel producido. El uso de este indicador podrá ser usado por otras empresas transformadoras de papel para evaluar la huella medioambiental, y en concreto la huella de carbono de los productos que manufacturan y facilitar la realización de la selección del papel como materia prima bajo este nuevo requisito.

El objetivo de este trabajo será determinar el efecto de los principales parámetros de funcionamiento en la fabricación de papel asociadas a una sección de secado térmico con el indicador “t CO₂ /t Producción”. Con esta información la fábrica puede adaptar su producción para reducir el indicador.

Este estudio toma en cuenta solamente la emisión directa de CO₂ producidas en la instalación debidas a la combustión de gas natural, que se utiliza para generar el vapor empleado para el secado térmico del papel (en esta fábrica es la única fuente de energía térmica utilizada en la sección de secado). Estas emisiones están bajo el esquema del comercio de emisiones (European Trade Scheme, en adelante ETS).

En el actual estudio no se tienen en cuenta las emisiones indirectas del proceso, como las derivadas del consumo de energía eléctrica, transporte de materias primas y producto terminado, así como otros focos difusos como la planta de tratamiento de aguas residuales, etc.

Desde otro punto de vista distinto, se analiza la introducción de indicadores ambientales en el sistema general de Gestión Corporativa (Corporate Management System, CMS) como medida primaria. Se analizará en profundidad la gestión del indicador y la descomposición del mismo en sus componentes principales, con el objetivo de identificar las mejores prácticas, normas diarias y acciones para su control desde el punto de vista de la gestión y mantenimiento de la planta, y su efecto en la reducción del indicador considerado.

Analizaremos la gestión de los indicadores ambientales desde el sistema de gestión medioambiental que dispone la planta objeto de estudio, con más de 25 años de antigüedad y cómo la gestión de indicadores ambientales y su descomposición en varios sub-componentes, pueden ayudar a reducir las emisiones de CO₂ de la planta de manera significativa.

Se tratará de identificar el efecto de variables asociadas a la sección de secado con las emisiones de CO₂, como el agua fría añadido al circuito de la caldera y la temperatura del aire soplado a la sección de secado. Además de la identificación, se estudiará el impacto en la calidad del producto que tienen estas variables. Esta información se puede utilizar para adaptar las rutinas de mantenimiento y normas diarias para reducir en la medida de lo posible, el indicador en cuestión.

Para concluir el estudio, analizaremos el estado de la infraestructura utilizada en el secado térmico del papel, llamada campana que envuelve la sección de secado aislándola de la nave de producción.

Analizaremos que cantidad de emisiones se producen en el proceso y que son achacables directamente al estado de los paneles, puertas y otros elementos que componen la campana de secado mediante un nuevo método de cálculo de la pérdida de energía global en una planta industrial a través del cálculo de la entalpía añadida a las corrientes de aire cuya cruzar la sala de producción. En este caso, las pérdidas de energía se pueden medir a través de la entalpía añadida a cada flujo de aire, medida como diferencia de entalpía entre la entrada y las corrientes de aire de salida.

Sostenibilidad significa utilizar los recursos para satisfacer nuestras necesidades sin comprometer los recursos para las generaciones futuras. Este concepto de sostenibilidad se ha relacionado con la eficiencia productiva (Aguado, et al., 2013), aunque no con el mantenimiento, vamos a tratar de llenar este vacío y estudiar cómo se puede empezar a lograr este objetivo mediante la realización de mantenimiento de las instalaciones y no sólo por sustitución de combustible o cambio de equipos de proceso.

El objetivo de esta última parte del estudio es validar un método para encontrar fallos de aislamiento, que permitan mejorar la eficiencia del proceso. Indirectamente, se debe determinar qué cantidad de emisiones pueden reducirse y como esta reducción afecta el indicador objeto de análisis en esta Tesis " $t\text{ CO}_2 / t\text{ Producción}$ ".

Finalmente este estudio pretende demostrar que se puede introducir las emisiones de CO_2 como indicador válido en el proceso de fabricación continuo, para emplearlo como instrumento de medida de la eficiencia de producción.

Por otra parte, el estudio pretende también emplearse para medir el estado de mantenimiento y puesta a punto de la planta, y evidenciar la relación que tiene el indicador de emisiones de CO_2 con el estado de mantenimiento de la maquinaria asociada al proceso.

1.3.- ESTRUCTURA DE LA TESIS

La Tesis se iniciará con un análisis del concepto de sostenibilidad y su relación con los procesos industriales. Analizaremos este concepto desde varios puntos de vista así como la relación entre sostenibilidad y eficiencia en producción.

Después de hacer un primer análisis y planteamiento de los objetivos de la Tesis, en el Capítulo 2 se hará una revisión bibliográfica en profundidad sobre los diversos puntos que relacionan las emisiones de CO₂ de una planta con la eficiencia y sostenibilidad.

Expondremos el origen de las emisiones de CO₂ en los procesos de fabricación y las estrategias globales empleadas hasta ahora para su reducción. Se profundizará en el estudio de la relación entre sostenibilidad, eficiencia y emisiones de CO₂.

Para centrar el estudio, realizaremos una revisión de la influencia del secado del papel en las características del producto, para poner de manifiesto que la reducción de emisiones no se puede plantear simplemente como una reducción de consumo de energía.

Comprobaremos la influencia que tiene en las emisiones el estado de los equipos asociados a la sección de secado y la posibilidad de establecer parámetros operativos y/o de control que puedan conducir a la reducción del indicador objeto de estudio “t CO₂/ t Producción”.

Revisaremos también el efecto que tienen los sistemas de gestión y el uso de indicadores medioambientales en las emisiones de CO₂, y como el establecimiento de pautas de control puede ayudar también a la reducción de las emisiones de CO₂.

En el Capítulo 3 describiremos la metodología empleada en la Tesis para los diversos cálculos y posterior análisis de datos, la relación de variables identificadas y los equipos de medida utilizados.

El Capítulo 4 lo dedicamos a realizar un análisis del proceso de fabricación de papel en general y de la sección de secado en particular teniendo en cuenta los diversos aspectos y limitaciones operativas que presenta el proceso de fabricación.

En el Capítulo 5 obtendremos los resultados de los análisis planteados en la sección de metodología y analizaremos los resultados obtenidos para obtener las conclusiones de la Tesis.

El Capítulo 6 se dedica a la discusión de los resultados obtenidos y finalmente el Capítulo 7 a la exposición de las conclusiones derivadas del análisis de resultados.

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1.- INTRODUCCIÓN

Hoy en día las emisiones de gases de efecto invernadero se han convertido en un aspecto muy importante a tener en cuenta por sus implicaciones medioambientales. En los últimos años se ha hecho evidente la relación entre las emisiones de gases de efecto invernadero y el calentamiento global debido a las actividades humanas, incluido los procesos industriales. Actualmente, no existen dudas acerca de la influencia de estas emisiones en el calentamiento global y las consecuencias ambientales de este calentamiento ya se están mostrando en nuestro planeta.

Las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (en adelante “GEI”) pueden agruparse de acuerdo con el Protocolo de Kioto (Naciones Unidas, 1998), en los siguientes tipos de emisiones según el Panel Intergubernamental del Cambio Climático, conocido como IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (IPCC, 2007):

Dióxido de carbono (CO₂)

Metano (CH₄),

Óxido de nitrógeno (N₂O)

Hidrofluorocarbonos (HFC)

Perfluorocarbonos (PFC)

Hexafluoruro de azufre (SF₆).

Para la contabilización del potencial contaminante de cada foco emisor puede emplearse la medida directa de cada contaminante en los focos emisores, o la estimación por balance de emisión en función del consumo de combustible. La elección de un tipo de determinación u otro, depende en gran medida del coste y la disponibilidad del equipo adecuado. En la mayoría de las ocasiones se opta por el sistema de balance de emisión por la dificultad de determinar en muchas ocasiones

mediante la medición en continuo la componente de cada uno de estos contaminantes, por la complejidad técnica, por el coste del equipo o por la inexistencia en muchos casos de los equipos de medida adecuados al foco emisor que muchas veces viene derivada de la no imposición legal de su utilización.

Las emisiones de GEI provocadas por el uso de combustibles fósiles fundamentalmente dependen del combustible utilizado y está asociado al propio proceso productivo. Los GEI pueden calcularse de manera agregada como unidades de CO₂ equivalentes o (CO₂-eq) y pueden obtenerse con un nivel adecuado de precisión como factores de emisión relativos al consumo del combustible utilizado en cada caso.

Aplicando la metodología indicada se pueden calcular las emisiones, contadas como CO₂-eq, estimándolas como factor de emisión de acuerdo al potencial de calentamiento de cada combustible o sustancia, según la tabla propuesta en el segundo informe de evaluación sobre el cambio climático y aceptado inicialmente por el IPCC (1995). En consecuencia CO₂-eq (en lo sucesivo y para simplificar su enunciado lo referenciaremos como emisiones de CO₂) se pueden determinar siguiendo la metodología descrita en el apartado "Cálculo de las emisiones y factores de emisión" del "Informe de inventario de GEI para la aplicación de la Directiva de Comercio de Derechos de Emisión" publicada por el Ministerio de Medio Ambiente del Gobierno de España en 2011 (Ministerio de Medio Ambiente. Informe Inventarios GEI mayo 2011, Anexo 8). Esta tabla se actualiza periódicamente para recoger los cambios en la composición de las distintas materias empleadas como combustible.

La tipología particular de cada sector industrial también puede influir en la emisión de GEI. Hay procesos productivos que independientemente del uso térmico de combustibles, producen contaminantes atmosféricos que afectan al medioambiente. Un ejemplo lo constituyen las emisiones de NO_x y SO_x en el proceso de refino de petróleo y en el sector químico. La determinación de la cuantía de estos GEI se puede realizar de la misma manera que se indica para los procedentes de los procesos de combustión, medición directa o por factor de emisión. En el presente estudio no se analizan este tipo de emisiones de proceso.

2.2.- LOS PROCESOS DE PRODUCCIÓN CONTINUOS Y LAS EMISIONES DE CO₂

Los procesos de producción continuos están caracterizados por la fabricación de productos muy estandarizados en procesos secuenciales altamente automatizados como; el sector petroquímico (para la obtención de combustibles), el sector siderúrgico (para la obtención de perfiles, vigas, chapas metálicas, etc.), el sector del vidrio (envases, vidrio plano, etc.), el sector de la construcción (cemento, ladrillos, etc.), el sector del papel (gráfico, celulosa, etc.), automóviles, etc., utilizan de manera especialmente intensiva la energía tanto en forma de electricidad como en forma térmica.

Una de las características generales de estos procesos lo constituye la planificación de la producción, se realiza en periodos amplios de tiempo y con mucha antelación. Para períodos con subdivisiones semanales, quincenales o incluso mensuales. Los puntos fuertes de estos sistemas de producción dependen de la planificación detallada de la misma para evitar las paradas por cambios no óptimos de producto y el control del propio proceso productivo.

Los procesos continuos también se caracterizan por el uso de máquinas y sistemas productivos complejos y generalmente altamente especializados, dispuestas en formación secuencial. En los sistemas continuos, el control de los parámetros operativos del proceso tiene una gran importancia, ya que afectan tanto a la calidad del producto fabricado como a la eficiencia del propio proceso de producción.

De acuerdo con Chase et al. (2009), otras características significativas de este tipo de producción son los grandes volúmenes de producto manufacturado, generalmente la cantidad elaborada de cada producto es muy elevada con relación a la variedad de los mismos y que cada producto generalmente es procesado a través de un método idéntico o casi idéntico a los demás. El planeamiento y el control de la producción se basan en información relativa al uso de la capacidad instalada y al flujo de los materiales de un lugar a otro.

La producción en masa continua también se caracteriza por ser un proceso que obtiene una gama menor de productos pero con un volumen de producción generalmente alto. El grado de automatización de los procesos continuos es elevado. Los procesos continuos frecuentemente están asociados a grandes instalaciones, tienen importantes costes asociados a la parada y arranque de planta.

Uno de los puntos fuertes de este tipo de proceso es la reproducibilidad, la exactitud y precisión del producto manufacturado siempre y cuando el proceso se encuentre dentro de los parámetros establecidos. Las desviaciones de las normas se detectan rápidamente pero puede ser muy costoso la corrección de las mismas debido a la elevada inercia de los procesos.

Otra característica reseñable de los procesos continuos lo constituye la parte del proceso que tiene una capacidad menor que el resto, que se denomina habitualmente cuello de botella, y que determina la máxima producción que puede alcanzar la planta. La identificación del cuello de botella dentro del proceso productivo y las variables o indicadores de su rendimiento puede ayudar a mejorar el control de la sección y reducir la limitación de producción.

En la actividad de fabricación industrial, uno de los aspectos más importantes lo constituye el control del proceso de producción. En este sentido se emplean numerosos sistemas que aportan infinidad de datos, pero no todos estos datos se pueden emplear para medir la eficiencia del proceso de fabricación. Las actividades de mantenimiento tienen especial importancia en este control, y en particular en los procesos continuos, y más aún cuando están centrados en el cuello de botella del proceso; este aspecto fue puesto de manifiesto en el sector del automoción por Li y Ni (2009). Obviamente, para efectuar este control y mejora del proceso son necesario indicadores; en el Capítulo 1 ya se mencionó que en para entornos avanzados de mantenimiento como el OEE de Nakajima (1988) y otros con un rango de aplicación a toda la factoría (Oechsner et al., 2003) o incluso particularizados en el rendimiento para detectar cuellos de botella en procesos no automatizados (Muthiah y Huang, 2007) o automatizados (Mutiah et al., 2008), también ha habido desarrollos para su aplicación en procesos continuos, como el elaborado por Nachiappan y Anantharaman (2006). Sin embargo, cuando el cuello de botella del proceso está claramente identificado en una planta de fabricación y el rendimiento y la calidad dependen del tiempo de funcionamiento ya que la producción se para en casos de fallos detectados, la disponibilidad se convierte en el elemento fundamental a verificar

Según datos de la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2012), el sector industrial en general consume en torno al 29,7% de la energía mundial, lo que hace que el 36% de las emisiones mundiales de CO₂ se deriven de los procesos industriales. Entre todos estos sectores, el de fabricación de pasta y papel es uno de los cuatro mayores sectores industriales consumidores de energía, junto con el siderometalúrgico, petroquímico y de materiales de construcción, con alrededor de 6% del consumo total industrial de energía en el mundo.

Dentro de los diversos sectores de fabricación afectados por las emisiones de CO₂, el sector de fabricación de papel se considera muy importante y significativo respecto a las emisiones que produce. El proceso de fabricación es un proceso continuo, altamente automatizado y en el que el balance de energía consumida es mayoritario el combustible térmico con un 70% aproximadamente y que es responsable de las emisiones directas mayoritarias de CO₂ en el sector, siendo la electricidad el 30% aproximadamente del consumo de energía (ASPAPPEL, 2014).

La fabricación de papel suele tener su cuello de botella en la sección de secado térmico, ya que generalmente es esta sección la que determina la máxima velocidad posible para alcanzar la humedad en el papel requerida por el cliente cuando este abandona la sección de secado. La velocidad de la máquina se ajusta por debajo de la máxima velocidad mecánica debido a que la sección de secado frecuentemente está limitada por la cantidad de agua que puede evaporar por hora y que debe reducirse hasta obtener la humedad del papel requerida a la salida de la misma. Atendiendo a este hecho se puede identificar el cuello de botella de la fabricación de papel en el proceso de secado. Frecuentemente se suelen utilizar complejos sistemas de soporte que ayudan a tomar decisiones sobre el funcionamiento de los procesos (Ni y Jin, 2012), pero en la planta industrial, el uso de un indicador simple puede facilitar la gestión y contribuir a la mejora de los resultados.

El indicador “t CO₂ / t Producción” se puede utilizar para tomar decisiones y para actuar en operaciones como las de mantenimiento, que tienen una influencia directa en el rendimiento de la sección de secado, afectando incluso a su capacidad de evaporación. Si se consigue relacionar este indicador con los parámetros de funcionamiento del proceso, esta identificación puede permitir el uso de este indicador simple, para agilizar la gestión y ayudar a entender el comportamiento de los principales parámetros del proceso y reducir las emisiones de CO₂.

2.3.- INFLUENCIA DE LA LEGISLACIÓN EN LAS EMISIONES DE CO₂

La influencia entre el marco legislativo y las emisiones de CO₂ se pone de manifiesto por la dificultad en encontrar un consenso mundial para la aplicación de las restricciones del Protocolo de Kioto (Naciones Unidas, 1998) a nivel global. Los países reacios a poner un control, y en consecuencia una limitación a las emisiones de CO₂

argumentan el negativo impacto que tendrían estas medidas en la competitividad del sector industrial afectado. Este hecho evidencia la fuerte relación existente a priori entre la legislación aplicada en cada país y las emisiones industriales de GEI.

El marco legislativo global es importante, pero no lo es menos el marco legislativo local al que se encuentra sometida la planta de producción respecto a los límites puntuales de emisión, que dependiendo del nivel de inmisión de contaminantes en el área donde se ubica la planta pueden ser incluso más restrictivos que los generales.

Se han encontrado las investigaciones de Wang et al. (2011) y Lihon Peng et al. (2015), que indican cómo un endurecimiento de marco legislativo ambiental en general con implicaciones en el marco regulatorio de la actividad industrial, ha logrado la reducción de emisiones contaminantes en general y de las de CO₂ en particular.

La Unión Europea desarrolló mediante la Directiva 2008/1/CE de 15 de enero, relativa a la Prevención y Control Integrado de la Contaminación, conocida como IPPC (Integrated Pollution Prevention and Control), y que establece las obligaciones que deben cumplir las actividades industriales y agrícolas con un elevado potencial de contaminación con el objetivo de evitar o minimizar entre otros aspectos, las emisiones contaminantes a la atmósfera y que tiene obligación de ser transpuesta a la legislación de cada uno de los estados miembros.

Silvo et al. (2009) analizaron en su estudio la influencia de la regulación por la implantación de la Directiva IPPC en las plantas finlandesas de celulosa y papel en relación con las Mejores Tecnologías Disponibles (MTD, European IPPC Bureau, (2014)).

Por su parte Wang et al. (2011) estudiaron el efecto de la aplicación de la regulación ambiental más estricta en la provincia de Shandong, este estudio mostró que con la implementación de una regulación más estricta la mayoría de los indicadores de eficiencia (con excepción de las emisiones de CO₂) habían logrado mejoras significativas.

La intención de las autoridades europeas con la adopción de la Decisión 2010/2 / UE, como apoyo a la reducción de las emisiones contaminantes, es crear un sistema de comercio de emisiones ETS que resulte económicamente costoso para las industrias y

de esta manera obligarlas a reducir significativamente sus niveles de emisión de gases contaminantes en general y GEI en particular.

En los países de la Unión Europea, actualmente la mayor parte de las fábricas de pasta y papel (todas las que producen más de 20 t al día de papel) están sometidas al del Sistema Europeo de Comercio de Emisiones (ETS), que ha estado en vigor desde 2005. Las emisiones directas de CO₂ que están bajo ETS provienen principalmente de la combustión de gas natural (ya que el fueloil puede considerarse de uso más marginal en el sector industrial) y tienen que ser cubiertos por créditos que en parte (no más del 80% en el mejor de los casos) se han recibido gratuitamente, mientras que el resto deben ser adquiridos en las subastas que realizan los gobiernos de cada país o compradas directamente al mercado.

Esta carga económica de adquisición de derechos de emisión, es cada vez más importante. Después del tercer plan de asignación 2013-2020 los costes que debe realizar la industria en general y la de fabricación de pasta y papel en particular, constituye una carga que otras regiones no Europeas (como China y Estados Unidos) la industria no tienen que soportar al no estar estas áreas económicas adscritas a este Protocolo de Kioto (Naciones Unidas, 1998).

Las emisiones de CO₂ se han convertido así en un coste significativo en los procesos de producción en los que hay un consumo de energía en general y con un sobre coste directo significativo en forma de tasa de CO₂ cuando el consumo de la energía se realiza por el uso de combustibles fósiles. Este nuevo enfoque de protección del medio atmosférico mediante el gravamen a las emisiones directas de CO₂ seguramente afectará significativamente a la competitividad de las fábricas y puede abocar a más de una planta al cierre.

Europa está actualmente inmersa en la tercera fase de implantación del Protocolo de Kioto (Naciones Unidas, 1998), periodo 2013-2020, que tiene como novedad significativa respecto a los anteriores la eliminación de la asignación gratuita a las emisiones a ciertos procesos, como las asociadas a los procesos de generación eléctrica. En el caso particular de la generación eléctrica, el sobrecoste debido a las emisiones de CO₂, ha provocado la subida del precio de la electricidad para internalizar el coste de estas emisiones.

La producción de papel se clasifica, atendiendo al régimen de comercio de emisiones, en diversos tipos de papel sobre las que se ha definido un *benchmark* de

producto respecto a las emisiones de CO₂. El *benchmark* está fijado teniendo en cuenta las emisiones declaradas por el 10% de las plantas Europeas más eficientes en cada tipo de papel.

Para el papel, los *benchmark* definidos (ECOFYS, 2013) son:

Papel prensa (<i>Newsprint</i>)	0,298
Papel fino sin estucar (<i>Uncoated fine paper</i>)	0,318
Papel fino estucado (<i>Coated fine paper</i>)	0,318
Tisú (<i>Tissue</i>)	0,334
Test liner y fluting (<i>Test liner and flutting</i>)	0,248
Cartón sin estucar (<i>Uncoated carton board</i>)	0,237
Cartón estucado (<i>Coaed carton board</i>)	0,237

Que son completados con el *benchmark* de calor para el resto de los papeles.

El establecimiento a nivel legislativo de los *benchmark*, que empleados para determinar la cantidad de derechos de emisión que debe entregar cada instalación industrial en un periodo y en función de la cantidad de papel producido, implica el establecimiento de objetivos de eficiencia de proceso muy estrictos y que penaliza a todas las instalaciones que no estén dentro de ese 10% de las más eficientes que fabrican ese tipo de papel en el sector.

El hecho de referenciar la producción y las emisiones de CO₂ a un *benchmark* implica que se compara la eficiencia de cada proceso de producción, en concreto en el caso de la fabricación de papel el secado térmico del mismo, respeto a otras fábricas similares. La eficiencia del proceso lo da tanto la eficiencia térmica como la eficiencia de máquina puede afectar de manera importante a la viabilidad de la planta.

2.4.- ESTRATEGIAS GLOBALES PARA LA REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO₂

Las emisiones de CO₂ procedentes del uso de combustibles fósiles, como el gas natural, se ven a menudo como consecuencia de los procesos de fabricación, y parece muchas veces como algo necesario para el desarrollo e inevitable por la necesidad de uso de energía económica y versátil.

La reducción de las emisiones en los procesos industriales puede ser abordada de diferentes maneras en función del tipo de complejo industrial, el área geográfica donde este la planta industrial ubicada, en función del origen del elemento contaminante o tipo de combustible que emplea, de los esfuerzos en adopción de las Mejores Tecnologías Disponibles (MTD, (European IPPC Bureau, (2014)) y la adopción de sistemas de gestión eficientes de la energía.

En el proceso de reducción de emisiones, lo esperable de los procesos industriales debe ser la reducción de la cantidad total de emisiones (directas e indirectas) generadas en la instalación. No se debe estudiar únicamente las emisiones directas e incurrir en el error de reducirlas aumentando el uso de otras fuentes de energía, como la energía eléctrica, que no producen emisiones que se contabilizan directamente en el complejo industrial y frecuentemente no están sometidas al Protocolo de Kioto (Naciones Unidas, 1998). Esta energía si tiene unas emisiones asociadas a la generación de la electricidad que pueden ser muy importantes en función del mix tecnológico de generación del propio área geográfica donde esté ubicada la planta industrial (carbón, fueloil, gas natural, nuclear, eólica, fotovoltaica, etc.). Las emisiones industriales también dependen del estado de desarrollo del área geográfica donde se ubican y están condicionadas por el combustible predominante en la zona.

La principal estrategia para reducir las emisiones industriales puede ser completamente diferente en diferentes áreas, tales los ubicados en América, Asia o Europa. Peng et al. (2015) apoyan la idea de que la manera de abordar la reducción de las emisiones no es el mismo en todos los países, incluso teniendo en cuenta el mismo sector de fabricación. La influencia de la fuente de energía como la implantación de sistemas de gestión energética e indicadores de eficiencia energética puede ayudar dentro de un sector industrial y en una misma área geográfica a obtener resultados muy dispares de emisiones de gases contaminantes.

Un ejemplo que apoya esta idea queda plasmado en el estudio de Zhang y Liu (2015), indican que un 70% de la energía primaria total en China proviene del carbón, mientras en la Unión Europea el uso de este combustible en los procesos industriales excluida la generación eléctrica es casi nula. En su estudio concluye que las emisiones de CO₂ generadas por la energía eléctrica y el calor consumido crezcan de manera muy significativas por el uso de cualquier tipo de energía. Este hecho unido a la alta tasa de crecimiento que ha experimentado la economía China desde 2000, le han conducido a convertirse en el mayor emisor mundial de emisiones de CO₂.

Otro componente clave para la reducción de las emisiones lo constituye también el uso de indicadores de eficiencia de energética. Peng et al. (2015) también evidencian la influencia de cómo se han mejorado los resultados obtenidos en la reducción del consumo energético en general y en las emisiones directas de gases contaminantes en particular, en aquellos procesos industriales que tienen implantados sistemas de gestión de energía, y los beneficios que proporciona el uso de indicadores de eficiencia energética.

Frecuentemente las plantas industriales utilizan como estrategia para reducir las emisiones de CO₂, la sustitución de los equipos de proceso por otros con tecnología más modernas y por lo tanto parece asumido que utilizará la energía de manera eficiente. Pero generalmente los equipos nuevos también se deterioran con el uso, y pueden no estar funcionando dentro de los rendimientos de diseño de la instalación cuando fueron evaluados. Las condiciones de diseño del punto de trabajo pueden estar muy alejadas de las de operación con el paso del tiempo, por diversas razones (debidas a aumentos de producción, a cambios en los parámetros de funcionamiento, a un mantenimiento deficiente, etc.). La consecuencia puede ser que la instalación esté funcionando en valores de parámetros muy alejados de los previstos inicialmente provocando la ineficiencia de los mismos.

Dentro de todas las emisiones de gases de efecto invernadero identificadas por el IPCC, en la industria papelera situada en la Unión Europea y debido fundamentalmente al uso de gas natural como principal combustible en sus procesos de generación de energía térmica, las emisiones de CO₂ constituyen el contaminante más importante tanto por su volumen como por el efecto sobre el calentamiento global.

En China, Peng et al. (2015) señalan que el consumo total de energía ha caído en China desde 2007 hasta 2014, debido principalmente por cambios tecnológicos, cambios en las políticas, la sustitución de combustibles. También ha encontrado que se

han declarado una gran cantidad de plantas industriales como de tecnología obsoleta y han sido clausuradas. Los autores indican el potencial de reducción de emisiones de CO₂ concretamente en la industria de celulosa y papel, que se pueden obtener a través de aplicar técnicas de mejora en la eficiencia energética y la aplicación a gran escala de las Mejores Tecnologías Disponibles (MTD, European IPPC Bureau, (2014)) asociadas a este proceso de producción. Los autores ponen de manifiesto que la estrategia prioritaria para reducir las emisiones de CO₂ es la sustitución del carbón como combustible principal por otros combustibles menos contaminantes, después se podrán proponer otras actuaciones basadas en el sistema de fabricación, como actualización de las propias instalaciones y mejorar la eficiencia energética del proceso.

2.5.- SOSTENIBILIDAD, EFICIENCIA Y EMISIONES DE CO₂

El concepto de sostenibilidad es difícil de asociar o relacionar en los procesos complejos con la eficiencia en producción. Aguado et al. (2012) constataron la dificultad de implementar la eficiencia y la sostenibilidad a la vez en un proceso productivo. Aunque intuitivamente puede estar clara la relación entre el mantenimiento de planta y la eficiencia en producción. Teniendo en cuenta la aseveración general indicada anteriormente, son escasos los artículos que relacionan el concepto de sostenibilidad con el mantenimiento de planta.

Puede haber una relación entre el estado de mantenimiento de la maquinaria y la eficiencia en producción, debido a que equipos bien conservados y mantenidos tienen menos averías y producen menos producto defectuoso que los equipos peor mantenidos. Las averías, aunque siempre se pueden producir de manera inesperada, se ven reducidas de manera significativa con las operaciones de mantenimiento planificado. Pese a haber una relación clara entre la disponibilidad de la maquinaria y su mantenimiento, tampoco es frecuente encontrar estudios que relacionen el concepto de sostenibilidad con el mantenimiento de planta.

La dificultad de la asociación de los conceptos de sostenibilidad, eficiencia en producción y mantenimiento proviene principalmente por la complejidad para identificar las herramientas y/o las variables necesarias para monitorizar su evolución y poder comparar los estados antes y después de las operaciones de mantenimiento planificado. La dificultad también se asocia a la cuantificación real de las mejoras

conseguidas por efecto directo de acciones de mantenimiento sobre la eficiencia en producción y la sostenibilidad del proceso. Es difícil también que se puedan achacar ciertos logros exclusivamente a las mejoras de mantenimiento.

El uso de un indicador global que observe comparativamente las consecuencias de las acciones planificadas con la suficiente perspectiva y alejándonos de las incidencias individuales de cada uno de los componentes implicados puede ayudar a resolver esta dificultad. El indicador que planteamos en esta Tesis “t CO₂ / t Producción”, que se centra en nuestro caso en la sección de secado (consumo de energía y emisiones de CO₂), es más específico que otros indicadores energéticos ya introducidos, como el Eco-indicador 99, y esto puede ayudar a implementar el concepto de medida de sostenibilidad y no solo del consumo energético del proceso.

El proceso de fabricación de papel, y en particular el subproceso de secado se ha estudiado desde numerosos puntos de vista, pero hasta ahora no hay suficientes estudios que consideren las emisiones de CO₂, como base para establecer un indicador válido de la eficiencia del proceso de secado y que está relacionado, aunque no exclusivamente, con energía térmica del proceso.

2.6.- LAS EMISIONES DE CO₂ Y EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE PAPEL

La energía en general y la energía térmica en particular se han convertido en una de las porciones de coste más importantes en el proceso de fabricación de pasta y papel. La energía es importante tanto por el coste de adquisición de la misma como por el sobre coste que hay en muchos casos que añadirle relativo a las emisiones de CO₂ asociada a este uso de la energía.

En el sector de fabricación de papel, las emisiones asociadas al proceso pueden ser muy variables dependiendo del tamaño del complejo industrial, por el tipo de papel producido e incluso, aun fabricando el mismo tipo de papel, puede variar dependiendo del áreas geográfica en la que este situada la fábrica por en el estado de desarrollo y el combustible predominante en la zona.

En el caso particular del sector de fabricación de pasta y papel a su vez, se pueden descomponer en dos subsectores claramente diferenciados e interrelacionados íntimamente entre ellos, dependiendo de que parte del proceso realice:

La producción de pulpa o pasta de papel.

La fabricación propiamente de papel.

A nivel de la declaración de las emisiones de CO₂, en el caso de fábricas ubicadas en la Unión Europea, también está separada el origen de las emisiones en los mismos sectores. Estos dos subsectores involucrados en el proceso de producción de papel pueden estar integrados en una sola planta de producción o localización física, o separados en dos.

El primer subsector, el de producción de pulpa o pasta de papel, puede utilizar como materia prima madera para transformarla en pasta de papel (denominada pasta virgen), o utilizar papel reciclado para obtener pasta reciclada. En el siguiente subsector, el de fabricación de papel, se utiliza la pulpa (virgen o reciclada) producida en la primera sección para obtener el papel propiamente dicho.

Generalmente se encuentra en instalación separada la producción de pulpa o pasta de papel virgen de la fabricación de papel, por ser un proceso específico y que necesita de un gran volumen para hacerse rentable por sí mismo. Un ejemplo de instalación separada de producción de papel que utiliza pasta virgen, lo constituye el subsector dedicado a la fabricación de papel tisú.

En Europa, el sector de fabricación de pasta y papel utiliza principalmente biomasa y gas natural como combustible para la obtención de energía térmica, el carbón no obstante sigue siendo una fuente residual. La producción mix eléctrico en la Unión Europea utiliza menos del 40% de la quema de combustibles fósiles (CEPI, 2013). Una estrategia prioritaria en este escenario para reducir las emisiones de CO₂ en los procesos industriales al utilizar ya fuentes de combustibles renovables y poco contaminantes, se lleva a cabo a través de mejorar la tecnología del uso de dichos sistemas de combustión basados, la mejora en la eficiencia energética y el propio control de proceso productivo.

Las emisiones provenientes de la electricidad, y que en el sector del papel se consideran como indirectas, han supuesto un incremento significativo en el coste directo

de la electricidad. Tanto es así que numerosos países de la Unión Europea en los que el mix de generación eléctrica depende en gran medida del uso de combustibles fósiles (como carbón y gas natural) han establecido un mecanismo de compensación por estos costes indirectos para las empresas intensivas en el uso de esta energía, entre las que se encuentra el sector de fabricación de pasta y papel.

El sector papelero Europeo, para su suministro de energía térmica emplea diverso combustibles en función de la disponibilidad de los mismos y las instalaciones de generación de calor disponibles en la planta, aunque emplea en su mayor parte gas natural (65%) y otros combustibles de fuente renovable como biomasa (32%) y fueloil (3%), según se puede extraer de las memorias de sostenibilidad tanto de CEPI como de ASPAPEL (CEPI 2013, ASPAPEL 2014). Dentro de las fuentes de combustible y atendiendo al potencial contaminante, la biomasa se considera por el IPCC como neutra respecto a las emisiones de carbono.

Las fuentes de las emisiones de CO₂ en la fabricación de papel son varias. Podemos distinguir entre dos tipos, directos e indirectos.

- Las emisiones directas provienen principalmente de la quema de combustibles fósiles (como el gas natural, carbón) y otros subproductos propios del proceso de pulpa y fabricación de papel, como la biomasa, el licor negro y el gas obtenido en la purificación de aguas residuales. Esta combustión se emplea para la obtención de energía térmica que en su mayor parte se empleada en el secado del papel.
- Las emisiones indirectas provienen principalmente de consumo de electricidad, el transporte de la materia prima y producto terminado, gestión de residuos, etc.

Las emisiones de CO₂ se han considerado frecuentemente, desde el inicio del primer plan de asignación de 2005 derivado del Protocolo de Kioto (Naciones Unidas, 1998), como una consecuencia del proceso de producción. Desde el punto de vista de la opinión pública, los entornos proteccionistas del medioambiente y la propia administración de la Unión Europea, la limitación de las emisiones mediante la imposición de una tasa por uso se considera una manera adecuada para forzar a los generadores de emisiones a reducirlas o cambiar de tecnología. En el entorno industrial sin embargo, las emisiones se ven más como una nueva carga administrativa y son

consideradas más como un impuesto que como una posible herramienta a través de la cual evaluar el funcionamiento del proceso de fabricación.

2.6.1.- El proceso de secado y las características del papel

El proceso de secado de papel, pese a su concepto relativamente simple y antigüedad en el método, es un proceso complejo que se ve afectada por muchos factores. Estos factores afectan tanto al consumo de energía requerida para secar el papel como a la calidad del propio papel producido. Las emisiones de CO₂ también se ven afectadas por los dos factores, por el propio consumo de energía y por la calidad del papel producido. La relación entre la sección de secado y emisiones de CO₂ se ha estudiado desde diversos autores con diferentes perspectivas o puntos de vista.

Las bases y fundamentos de secado del proceso de papel, que utilizan sistemas multi-cilindro fueron ya establecidos por Karlsson (2000). Su análisis se ha tomado como base para realizar nuevos estudios e ideas de mejora tanto del personal científico como del personal técnico de las propias plantas industriales de fabricación de papel.

El proceso de secado afecta de manera significativa a las características mecánicas y superficiales del papel fabricado. La optimización energética y la reducción de emisiones de CO₂ hay que realizarla teniendo en cuenta cómo los parámetros del proceso afectan a la calidad del producto fabricado. Dentro de los estudios llevados a cabo sobre este proceso, se hace especial hincapié en la influencia del proceso de secado de las características del papel.

En el proceso de secado, el papel debe ser calentado a una temperatura inferior a la de evaporación del agua y mantenido a dicha temperatura mientras que el agua se evapora desde el interior de la hoja de papel transmitiendo la humedad al aire circundante.

Se ha revisado la información publicada sobre la fabricación de papel y su proceso de secado. Se han encontrado publicaciones centradas en revisar la influencia del proceso de secado en las características del papel (Karlsson (2000), Hoestler et al. (2005), Bicudo (2008), Triantafillopoulos (2010)).

Entre ellos destacan los realizados por Karlsson (2000) que en sus estudios, revisa los parámetros principales que afectan a los procesos de evaporación del agua contenida en la hoja de papel dentro de la sección de secado. Hostetler et al. (2005) han llevado a cabo estudios sobre la temperatura óptima de la hoja de papel a lo largo del proceso para determinar las condiciones óptimas de secado que aseguren cualidades óptimas de papel producido y minimizar los costes pero únicamente desde el punto de vista de la energía.

Un aspecto fundamental a tener en cuenta en el proceso de secado, además de la temperatura de cada uno de los cilindros de secado a lo largo de la máquina, son las condiciones del aire dentro de la campana de secado, como se ha indicado el papel no se seca por la evaporación del agua de su interior por ebullición de la misma, si no por transferencia de humedad al medio circundante. Bicudo (2008) estudió la relación entre la temperatura de los cilindros secadores y la temperatura del aire circundante al mismo, con el objetivo de maximizar la cantidad de agua eliminada de la hoja de papel manteniendo las características de la calidad del producto y minimizar el uso de energía, y por lo tanto las emisiones de CO₂.

Otros autores como Martin et al. (2004) y Laurijssen et al. (2010) estudiaron los nuevos sistemas para mejorar la eficiencia del proceso. Laurijssen et al. (2010) centraron su estudio en el análisis de la influencia de cada uno de los elementos de la sección de secado implicados en el proceso de secado del papel, plantearon varias opciones para reducir el consumo de calor en la sección de secado convencional basada en sistemas multi-cilindro calentados con vapor y calcular también el efecto sobre que cada uno tiene sobre el consumo final de energía.

También se revisó la influencia de los elementos de la sección de secado en el proceso de secado Barber (2011) así como estudió el diseño y dimensionamiento de esta sección Bauer et al. (1998).

Otro factor a controlar en el sistema de secado lo constituyen los fieltros o telas secadoras, cuya misión es mantener presionada la hoja de papel contra el cilindro secador para maximizar la transferencia térmica entre el cilindro secador y la hoja de papel. Barber (2011) revisó en sus estudios la influencia de los fieltros o paños secadores usados en la sección de secado y la calidad del papel. Encontró la influencia entre sus condiciones generales (o acondicionamiento del paño) y su estado de limpieza con la capacidad del mismo para mejorar la eliminación de agua de la hoja de papel.

Otro aspecto importante de su estudio analiza también la influencia de las telas secadoras o paños en el perfil de humedad de la hoja. La causa se debe a la diferencia transversal en la evaporación desde la hoja al ambiente y la reducción de la transferencia de calor (causada por los depósitos dejados en los cilindros) y la transferencia de los depósitos de la tela secadora al papel. Los factores identificados por Barber (2011), con influencia en las propiedades del papel, son principalmente las diferencias de temperatura en la superficie de la hoja de papel, el acondicionamiento y limpieza de la tela secadora y la temperatura del aire soplado a la campana que compensa la extracción de aire húmedo.

Por su parte, Bauer et al. (1998) analizan los principales parámetros de secado en la fabricación de papel. Observó que puede haber diferentes tipos de papel con diferentes filosofías o configuraciones de la sección de secado que finalmente alcanzan el mismo objetivo de calidad en el secado del papel. Encontró la importancia de la distribución de temperatura superficial de la hoja en el proceso y lo identificó como uno de los principales factores que influyen en las propiedades del papel, debido principalmente a las temperaturas inadecuadas de la superficie del mismo.

Se ha encontrado numerosos estudios sobre el aspecto energético (Sivil et al. (2005), Zvolinschi (2006)) y su análisis para maximizar la recuperación de energía (Sivil y Ahtila (2009), Laurijssen et al. (2010)), sobre la reducción de consumo de energía (Austin (2010)) por medio del control del proceso de producción y la relación entre eficiencia energética y productividad (Virtanen et al. (2010)).

En cuanto a la energía, Sivil et al. (2005) indican que los factores operativos más importantes que afectan la eficiencia de recuperación de calor son la humedad del aire de extracción de la campana, la temperatura del aire de entrada y de velocidades de flujo de todas las corrientes de aire involucradas en el proceso de secado en el interior de la misma.

Las medidas de optimización en la sección de secado incluyen la disminución del uso de calor para la evaporación del agua de la hoja de papel, mediante el aumento de la temperatura del punto de rocío de la sección de secado. Otras medidas planteadas se basan en aumentar la cantidad de recuperación de calor mediante el uso de la energía contenida en el aire de extracción de la campana (aire que se encuentra entre 80 y 100°C y con un contenido de humedad elevado) y utilizarlo para precalentar o incrementar la temperatura de otros flujos empleados en la fabricación, como pueden

ser el agua del proceso o el aire de compensación soplado a la propia campana de secado.

El propósito de la recuperación de calor de la sección de secado, concretamente de la energía contenida en los flujos de aire húmedo extraído de la campana, es disminuir la energía utilizada para secar las de un papel. Sivil y Ahtila (2009) estudiaron el potencial de ahorro de energía con la recuperación de aire de refrigeración utilizado en otras áreas de la planta de producción, tales como sistema de vacío y refrigeración de los perfiladores de infrarrojos. La reducción del uso de energía se traduce directamente reducción de las emisiones de CO₂ asociadas.

Zvolinschi et al. (2006) encontraron que la regulación de la temperatura del vapor en cada sección de secado se puede reducir hasta un 3% el consumo de energía y también encontró la importancia en el incremento de la humedad del aire de extracción de la campana que favorece las condiciones de evaporación en el interior de la misma, pudiendo alcanzar ahorros energéticos de hasta el 35%, con la consiguiente disminución de las emisiones de CO₂ asociadas al proceso.

En las referenciase del uso del TPM para la mejora de producción (Chand y Shirvani (2000)) no se ha encontrado referencia al uso de indicadores medioambientales o las emisiones de CO₂ como indicador para evaluar la eficiencia y la capacidad de producción.

2.6.2.- Influencia del mantenimiento en las emisiones de CO₂

Las emisiones de CO₂ generadas por una instalación industrial no solo se ven afectadas por la tecnología empleada, también se ven afectadas de manera significativa por el estado de la instalación de secado y en particular por la sub-instalación de aprovechamiento térmico del proceso. Afecta el estado de la instalación térmica responsable del proceso de secado del material, los parámetros operativos de control del proceso y el estado de los sistemas de recuperación de calor.

Uno de los principales componentes en el proceso de secado del papel lo constituye la denominada campana de secado. Este elemento tiene por finalidad aislar

las condiciones térmicas de su interior respecto al exterior. La campana es una instalación que cubre y aislado desde fuera del área de secado del papel.

De acuerdo con la construcción de la campana, hay tres tecnologías principales de sección de secado, campana abierta (casi en desuso), campana semi-abierta y campana cerrada. Según los últimos estudios se estima que el sistema de campana cerrada, que aísla totalmente el proceso de secado de la nave de producción, utiliza entre 15 y 20% menos de energía térmica en forma de vapor que la semi-abierta (Kong et al., 2013) y el consumo se reduce hasta un 40% de la energía total utilizada para acondicionar la demanda de aire, teniendo en cuenta los flujos de aire extraído y la cantidad de aire de compensación necesario que hay que volver a introducir a la campana (denominado aire de soplado) y la energía necesaria para calentar este aire de soplado.

La campana de secado generalmente consta de paneles desmontables con aislante. Tiene puertas de acceso para monitorizar el funcionamiento del sistema y que son utilizadas también por los operadores de la máquina para acceder en caso de rotura de papel. Cuenta con paneles laterales y de techo desmontables para el acceso en caso de avería de la máquina o para el acceso en las paradas técnicas de mantenimiento.

A causa de los materiales con los que se construyen estos paneles, que generalmente son de aluminio para reducir su peso, en el proceso de montaje y desmontaje de los paneles, la campana puede perder estanqueidad. Estas pérdidas de estanqueidad se deben al deterioro de sus componentes y provoca pérdidas de energía significativas, las cuales pueden afectar tanto a los parámetros de proceso como al indicador analizado "t CO₂ / t Producción".

La falta de estanqueidad entre los paneles de la campana hace que se produzcan flujos de aire no deseados, Laurijssen et al. (2010) indicaron que una variable fundamental en el sistema de campana es punto de rocío o "*Dew point*", que es el punto en el que el aire en el interior de la campana se satura y la humedad que contiene se condensa.

Entre los parámetros de funcionamiento de la sección de secado está mantener la temperatura del aire en el interior por encima del punto de rocío para que no se produzca condensación de agua en el interior de la campana, obligando a calentar todo el aire en circulación a temperaturas por encima de este.

El punto de rocío más alto implica que el sistema tiene que estar mejor aislado. A mayor punto de rocío mayor cantidad de vapor de agua puede contener el aire de la campana, y por lo tanto se necesita menos aire para eliminar la misma cantidad de agua evaporada del papel. Además hace que la energía que tiene el aire extraído sea mayor (por llevar más agua evaporada) y sea más fácil de recuperar.

Para aumentar el punto de rocío en esta sección es necesario que el aislamiento y los cierres de la campana esté en buenas condiciones, de lo contrario el flujo de aire denominado fresco por estar a temperaturas entre 10 y 20°C que entra de la nave de producción al interior de la campana por la pérdida de estanqueidad entre los paneles, puede causar una bajada de temperatura del aire localizada y en consecuencia la condensación de agua del aire en el interior, volviendo a humedecer el papel.

El punto de rocío es un factor fundamental a controlar en el proceso de secado energéticamente hablando. Laurijssen et al. (2010) establecieron que el aumento de desde 55°C a 70°C del punto de rocío en el interior de la campana disminuiría más de un 8% el uso de la energía necesaria para la evaporación del papel de la misma cantidad de agua. Uno de los principales problemas para elevar el punto de rocío lo constituye el aislamiento de la campana de la sección de secado. Una pérdida de aislamiento, provoca insumos de aire exterior, haciendo que la mezcla de aire resultante en el interior de la campana se pueda saturar y producir condensación localizada del vapor de agua contenido en el aire sobre el propio papel a secar.

Koper et al. (2007) estudiaron la producción de entropía en el proceso de calentamiento del papel en el cilindro secador, e identificaron las cuatro fases en base a la posición de la hoja al entrar en contacto con el propio cilindro secador desde que se aproxima a él hasta que sale. En la primera, segunda y tercera etapa, el calor se transfiere por conducción debido a que la hoja de papel está en contacto con el cilindro y en la fase cuarta la hoja está pasando de un cilindro a la siguiente donde la evaporación y transferencia de calor se hacen por convección. Es en esta cuarta fase donde las características del aire circulante y su acondicionamiento son más importantes y afectan significativamente a la eficiencia de proceso. Este artículo muestra la importancia de acondicionar el aire soplado a la campana de la sección de secado así como el punto en el que se inyecta este aire caliente. El acondicionamiento de la campana y las pérdidas de estanqueidad de la misma afectan a la circulación de aire dentro de la campana por la entrada de aire no controlado y provocar la mezcla de corrientes de aire de diferente temperatura.

La temperatura de la hoja húmeda de papel se ve afectada por la temperatura del cilindro secador y también por la temperatura del aire circulante en el interior de la campana de secado. Ekvall y Hägglund (2008) identificaron las condiciones de contorno y los coeficientes de transferencia de calor entre el vapor – cilindro secador, cilindro secador - papel y cilindro secador – aire circulante. El flujo de aire dentro de la campana se controla para minimizar en lo posible la necesidad de calentamiento del aire mediante los cilindros secadores. El aire húmedo extraído de la campana se repone con aire soplado del exterior, en la mayoría de los casos el aire de compensación se calienta mediante los intercambiadores de calor aire-aire que recuperan la energía de las corrientes de aire extraídos o mediante intercambiadores agua – aire o vapor – aire cuando se necesita incrementar de manera significativa la temperatura del aire soplado. La compensación entre la extracción y el soplado se realiza por los insumos de aire procedentes de la nave de producción, que están a una temperatura muy por debajo del aire soplado.

Un elemento que tiene gran influencia en la eficiencia energética del proceso de secado del papel son las roturas de papel en el proceso de fabricación en general y en la sección de secado en particular, producen aumento del consumo de energía y también incremento en las emisiones específicas de CO₂. Ekvall y Hägglund (2008) estudiaron la influencia que tienen las roturas de papel en la sección de secado, y lo que afectan a la eficiencia del proceso con el objetivo de reducir las pérdidas producidas en el tiempo que dura la rotura mediante estrategias de control de la presión de vapor en cada sección de secado. Los autores encuentran la influencia de las roturas de papel y concluyen que minimizar el número de roturas de la hoja es una forma correcta de mejorar el rendimiento de la máquina de papel. El presente estudio pretende encontrar una relación entre las emisiones de CO₂ y la disponibilidad de la máquina debido a las incidencias de mantenimiento. Para mejorar la eficiencia en el secado de papel se considera importante revisar no solo los propios equipos de la sección de secado, si no también todos los equipos de la máquina de papel que están relacionados con la sección de secado e identificar sus posibles problemas y como estos afectan a la eficiencia del proceso de secado.

El acondicionamiento del aire en el interior de la nave de producción donde está situada la sección de secado tiene una influencia muy significativa en la eficiencia del proceso de secado de papel y los parámetros operativos de la campana debido a la no estanqueidad de la campana de secado. Tanasić et al. (2011) analizaron las características de los flujos de aire (temperatura, presión y velocidad) para conocer la mecánica del movimiento del aire caliente en el interior de la sala de producción. Encontraron que la temperatura del aire varía considerablemente de una sección a otra y

a lo largo del pasillo de la nave de producción. Observaron que la distribución vertical de temperatura se caracteriza por una alta gradiente de temperatura y una estratificación de la temperatura notable. Los gradientes de temperatura más altos se encuentran en áreas con importantes fuentes de calor como tuberías de vapor y los conductos de aire de extracción y soplado a campana. Encontraron una estrecha correlación entre la temperatura de estos elementos y la temperatura del aire circundante. Los patrones de flujo de aire en la sala se rigen por las corrientes de convección vertical debido a la flotabilidad del aire y la ventilación mecánica. La velocidad del aire es bastante baja, excepto en las proximidades de las ventanas y salidas de la nave. La no uniforme distribución del aire en la nave de producción puede provocar que los insumos de campana no estén a la misma temperatura y varíen en función de la ubicación de la abertura en la campana de secado y la zona de la nave donde se encuentre. Este hecho dificulta aún más el correcto ajuste del punto de rocío del aire del interior de campana.

La estrategia indicada de las plantas de producción industrial, que consideran que solo se pueden reducir las emisiones de CO₂ sustituyendo equipos por otros más modernos y/o eficientes, fomentando las políticas de ahorro energético se ve que pueden no ser válidas. Los equipos que con el tiempo se deterioran o no funcionan en los valores de parámetros para los que se diseñaron hacen que la eficiencia de la instalación puede diferir de la inicialmente planteada.

2.6.3.- Aspectos energéticos y parámetros operativos del proceso de secado del papel

Dentro del proceso de fabricación de papel, la sección de secado no se comporta ni utiliza los mismos parámetros operativos para todas las clases de papeles. El tipo de papel fabricado tiene gran influencia tanto en el proceso de secado en si, como en la energía utilizada. Bauer et al. (1998) analizan los parámetros más importantes que intervienen en el proceso y la relación entre ellos. Encontraron que se puede usar diferentes filosofías de secado para obtener los mismos objetivos de tipo de papel, pero utilizando diferentes cantidades de energía. Este hecho hace que el proceso de secado pueda tener muchas configuraciones distintas dependiendo tanto de las limitaciones de papel producido o maquinaria disponible en la fábrica, lo que puede afectar a la energía consumida en el proceso y consecuentemente a las emisiones de CO₂.

Basado en los estudios realizados por Karlsson (2000), Laurijssen et al. (2010) encontraron que la energía utilizada para el calentamiento de la hoja de papel desde la temperatura de entrada a la campana de secado hasta la salida de la misma, y la pérdida debido a la transferencia de calor (convención y radiación), pueden estar conjuntamente entre el 5 y el 10% de la energía térmica total utilizada en la sección de secado.

Laurijssen et al. (2010) identificaron la sección de secado de la fabricación de papel como la sección de mayor consumo de energía de la fábrica. En esta parte del proceso el consumo de energía se hace principalmente en forma de calor. Los autores identifican también medidas de optimización de este proceso que se pueden llevar a cabo para reducir el consumo de energía y por lo tanto las emisiones de CO₂, como el aumento de la temperatura del punto de rocío dentro de la campana secadora o aumentando la cantidad de calor recuperado en los flujos de aire extraídos de la campana para precalentar el aire entrante nuevamente en la misma.

Laurijssen et al. (2010) establecieron el potencial ahorro de calor de esta sección cerca de 32% de la energía total utilizada en él, lo que, teniendo en cuenta que según identificaron que la sección de secado puede emplear como mínimo un 50% de la energía total empleada en la fabricación de papel, los ahorros potenciales pueden estar alrededor del 15% del total de energía consumida para fabricar papel.

En este mismo sentido Kong et al. (2013) también identificaron en su estudio a la sección de secado como una de las secciones de la fabricación de papel con mayor potencial de ahorro de energía. En esta sección identificaron tres de las ocho áreas de la producción de papel (sección de campana de secado, recuperación de calor de gases de escape y control de la humedad del propio papel de secado campana) como grandes áreas potenciales para la reducción del consumo energía y por consecuencia de las emisiones de CO₂.

Para un análisis correcto de rendimiento del proceso es necesario identificar las variables que relacionan la eficiencia del proceso, el consumo de energía y las emisiones producidas con el tipo de producto fabricado. Bhutani (2012) cuantifica los flujos de energía que permiten establecer “*benchmark*” de producto y que permiten establecer una base de comparación para evaluar comparativamente la eficiencia de uso de la energía en la sección de secado para cada tipo de papel. Sugiere el uso de varios indicadores como pueden ser "t papel / t vapor", "t vapor / t agua evaporada", relación de retorno de condensado respecto a las t de vapor utilizadas, la temperatura del punto de rocío en el interior de la campana de secado, consistencia de la hoja o porcentaje de

humedad de la hoja a la salida de la sección de prensas y antes de la entrada de la sección de secado, el rendimiento de la máquina y los tiempos de parada no programada, OEE.

Austing (2010) mostró que es posible reducir el consumo de energía mediante el control de las variables asociadas con el proceso y Virtamen et al. (2010) encontraron en su estudio la relación entre la eficiencia energética y la productividad. El concepto actual de eficiencia energética que se aplica al uso de combustibles fósiles, se basan en la optimización del uso de la energía para reducir su consumo. También es evidente la relación entre la eficiencia energética y las emisiones de CO₂ como indican tanto Siitonen et al. (2010) como Moya y Pardo (2013) para el sector de la industria papelera.

Hay variables de proceso que afectan a la eficiencia energética y a las emisiones de CO₂, como indican Siitonen et al. (2010) para la industria papelera, pero generalmente no se establecen estrategias de reducción de emisiones como resultado de acciones planificadas de mantenimiento, ni se calcula el impacto que estas medidas tiene sobre las emisiones de CO₂ de la planta industrial.

Las principales medidas de optimización que se pueden llevar a cabo en la sección de secado incluyen, como se evidencia en el estudio realizado por Laurijssen et al. (2010), la disminución del uso de calor para la evaporación del agua contenida en la hoja húmeda de papel mediante el aumento de la temperatura del punto de rocío del aire en el interior de la propia campana de secado. Este punto es difícil de realizar debido a que generalmente las condiciones de aislamiento de la campana de secado no suelen ser las adecuadas.

Otras medidas que se pueden tomar están encaminadas a aumentar la cantidad de recuperación de calor mediante el uso del aire húmedo extraído de la propia campana de secado, para precalentar otros elementos como el propio aire de compensación que debe ser soplado nuevamente a la campana y para calentar también el agua del proceso.

Ruohonen et al. (2010) mostraron los requerimientos de energía para calentar el aire del interior de la campana de secado en el proceso de fabricación de papel así como la cantidad de vapor necesario para calentar también el aire de soplado necesario para compensar la extracción del aire de la campana. Concluyeron que uno de los puntos más interesantes para la recuperación de la energía del aire húmedo de extracción de la campana de secado es el calentamiento del aire de entrada a la campana, destacando así la importancia de los sistemas de recuperación de calor en la eficiencia del proceso.

La eficiencia energética se ve influenciada significativamente por la reutilización de la energía que se pierde en el proceso de secado. Rouhonen et al. (2010) centraron su estudio en la mejora de la eficiencia energética a través del análisis del uso de los flujos de energía perdidos en la extracción de campana como fuentes de calor para usos secundarios en una fábrica de papel, mediante el uso del análisis *pinch*, metodología empleada para optimizar la recuperación energética en un proceso industrial, minimizando la inversión de capital. Uno de los usos identificados por el autor corresponde al uso de esta energía para acondicionar el aire en la nave de producción, que se ha evidenciado anteriormente que afecta a las condiciones del aire del interior de la campana. El estudio muestra la dificultad de la recuperación de calor de los flujos de aire que salen de la propia sección de secado debido a la fuerte no linealidad de los intercambiadores de calor necesarios, debido al proceso de condensación del vapor de agua contenida en flujos de aire de salida de la campana de secado. Para intentar modelizar este proceso, en su estudio asumen que el contenido de humedad relativa del aire de salida de campana del que se extrae la energía y que posteriormente se utiliza para calentar otros flujos de aire y/o agua del proceso de fabricación de papel, se mantiene en constante al 100%. Aseveran en su estudio que estas reutilizaciones de calor producen reducciones en el consumo de vapor afectando a la eficiencia del proceso, y en consecuencia influye también en las emisiones de CO₂.

Este punto tiene mayor importancia si cabe debido a la fuerte variabilidad de la temperatura exterior en cualquiera de las localizaciones industriales de producción de papel, y la relación entre las condiciones del aire exterior y la utilización de energía en la sección de secado. La recuperación de energía para precalentar el aire soplado requiere menos energía procedente del vapor para calentar el aire de la campana de secado, traduciéndose en un ahorro directo de energía.

Sivill et al. (2005) encontraron en su estudio que la humedad del aire extraído de la campana de secado afecta en gran medida a la tasa de recuperación de calor y por consecuencia a la eficiencia del sistema de recuperación de energía empleado para calentar el aire soplado de compensación a la campana de secado. El propósito de la recuperación de calor de la sección de secado es disminuir la cantidad de energía que se utiliza para secar el papel. Sivill y Ahtila (2009) estudiaron el potencial de ahorro de energía que se podría obtener con la recuperación de calor contenida en el aire húmedo extraído de la campana de secado, y que de otra manera sería enviado directamente a la atmosfera, que trae como consecuencia directa una reducción de las emisiones de CO₂ asociadas al proceso de secado.

Zvolinschi et al. (2006) identificaron el efecto sobre la recuperación de energía que tiene el contenido de humedad de la extracción de aire, pudiendo alcanzarse hasta 35% de ahorro de energía comparado con los sistemas que no utilizan recuperación de calor. Ruohonen et al. (2009) indican que todas las opciones consideradas anteriormente, se pueden utilizar para reducir las emisiones de CO₂ de la planta como consecuencia de la reducción del uso de energía.

En otro estudio sobre los parámetros de la sección de secado, Zvolinschi et al. (2006) encontraron la influencia que tiene la regulación de la temperatura del vapor en cada sección de secado. Una correcta regulación se puede traducir, según indican en su estudio, en ahorros de hasta un 3% de la demanda de energía en la sección de secado.

Las auditorías energéticas periódicas sobre las instalaciones, como indican Thollander y Ottosson (2010) y Kong et al. (2013) pueden ayudar a la identificación de oportunidades de mejora que se pueden traducir en el logro de una mayor eficiencia energética de la planta, lo que puede servir también para reducir las emisiones de CO₂ del proceso.

La realización auditorías sistemáticas y su uso como una herramienta para supervisar y conocer el estado real de la maquinaria y su estado de mantenimiento, puede conducir a un importante ahorro energético. Como resultado de este ahorro energético y en la medida del origen del combustible utilizado para generar dicha energía, se pueden obtener significativas reducciones de las emisiones de CO₂ asociadas con el proceso. Según indican Siitonen y Ahtila (2010) las inversiones en el mantenimiento de planta y en la mejora de la eficiencia energética del proceso pueden producir reducciones de las emisiones de CO₂ que, teniendo en cuenta el coste de la energía ahorrada y el coste de las emisiones, pueden hacer que estas inversiones sean rentables por sí mismas.

La fabricación de papel es un proceso intensivo en uso de energía, en el que se requiere un cuidadoso análisis de las instalaciones para la reducción de las emisiones de CO₂ del proceso. En la fabricación de papel se establecen indicadores que se relacionan las emisiones de CO₂ y la eficiencia de la sección de secado del proceso de fabricación, llamado “referencia de producto” o “*product benchmark*”. Los “*product benchmark*” se establecen tomando como referencia las emisiones del 10% de los procesos más eficientes de producción de cada tipo de papel dentro de la Unión Europea (ECOFYS, 2009). Esta emisión de referencia o *benchmark*, es un indicador en sí mismo, que proporciona una medida válida de la eficacia de cada proceso de fabricación de papel, y

permite comparar la eficiencia de cada proceso con otras fábricas del sector que producen un papel similar o equivalente.

No se han encontrado estudios suficientes que relacionen la influencia que tienen los diversos factores del papel a la entrada de la sección de secado térmico y cómo estos factores pueden afectar al indicador "t CO₂ / t Producción" ni se ha visto como estos factores pueden afectar a la eficiencia y la sostenibilidad de la fabricación de papel.

Estos hechos hacen necesaria la revisión de los parámetros de los equipos y de operación de la instalación asociada con la fabricación en general y la sección de secado de papel en particular. El estado de funcionamiento afecta en gran medida a su eficiencia energética. El control de las emisiones de CO₂ asociadas a estos consumos de energía es aún más necesario.

El proceso de secado en la fabricación de papel no solo afecta al coste energético del proceso, también afecta a las emisiones de CO₂ asociadas al mismo y a las características del papel producido.

2.6.4.- Influencia de los sistemas de gestión en las emisiones de CO₂

Los estudios llevados a cabo por Gasbarro et al. (2013) analizan la influencia en la reducción de las emisiones de CO₂ asociadas al proceso productivo con el uso de herramientas de gestión, tales como el Sistema de Gestión Medioambiental así como la influencia que ha tenido en la Unión Europea la introducción de la gestión de las emisiones de CO₂ a través del Sistema Europeo de Comercio de Emisiones (European Trade Scheme, ETS).

Thollander y Ottosson (2010) y Kong et al. (2013) indican que las auditorías energéticas periódicas en las instalaciones, puede ayudar en el logro de una mayor eficiencia energética de la planta mediante la identificación de oportunidades de mejora, lo que puede servir para reducir las emisiones de CO₂. El presente estudio realiza una primera estimación de los ratios de eficiencia al introducir "t CO₂ / t Producción" como un indicador de la eficiencia del proceso y que sirve para encontrar las oportunidades de mejora en la reducción de las emisiones de CO₂.

Moya y Pardo (2013) observaron en su artículo cómo la adopción de Mejores Tecnologías Disponibles (MTD) potenciadas por las políticas de eficiencia energética puede ayudar también a reducir las emisiones de CO₂ y ser también económicamente viables por los ahorros producidos, y alcanzar así los objetivos de la Unión Europea (UE-27, 1 de enero de 2007 – 30 de junio de 2013).

Sin embargo, Del Río González (2005) indicó que la dificultad existente para introducir nuevas técnicas en el sector de fabricación de papel como las MTD o tecnologías más limpias, este hecho se debe a las grandes inversiones y complejidad técnica asociada a los propios procesos de fabricación del papel.

Ghose y Chinga-Carrasco (2013) revisaron las emisiones de CO₂ a través de la evaluación del ciclo de vida del producto, e identificaron que hasta un 85% del total de energía empleada en la fabricación de papel, en función del producto de papel, se utiliza para el secado de papel.

Las emisiones de CO₂ por lo general solo se toman en cuenta para el análisis de la huella de carbono, Culaba y Purvis (1999) analizan a través de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) del impacto de los procesos de fabricación aplicados a la industria de celulosa y papel, donde se toman las emisiones de CO₂ en cuenta como punto de partida para poder de reducir esta huella. Sin embargo el ACV no está centrado en el proceso de producción, sino que tiene en cuenta también otros elementos como transporte, etc. que hace que este indicador no pueda ser utilizado como indicador de eficiencia del proceso productivo.

2.6.5.- Sistemas alternativos de secado del papel

El proceso de secado es un proceso común a todos los procesos de fabricación de pulpa y papel aunque es más extendido en el subsector de fabricación de papel.

Aparte de ser el proceso de secado una de las secciones más importantes respecto al consumo de energía en la fabricación de papel, y como ya se ha indicado anteriormente el sector es reacio a aplicar nuevas tecnologías, este proceso influye de manera significativa en las características del papel producido. La relación entre las

características del papel y los parámetros del proceso de secado ha sido analizada por varios autores.

Del Río González (2005) indicó la dificultad en la industria de fabricación de papel para adoptar nuevos sistemas de secado, debido a factores externos e interno. Respecto a los factores internos destaca principalmente a las grandes inversiones necesarias y que no aportan soluciones técnicas que mejoren significativamente el proceso de fabricación de papel. El proceso de fabricación de papel es conceptualmente simple y las actuales instalaciones de secado basadas en sistemas de cilindros secadores calentados internamente con vapor, pese a ser de diseño muy antiguo, tiene buenos rendimientos, poca complejidad técnica y son relativamente sencillos de operar y mantener. En el sector y respecto a la sección de secado, es frecuente implementar soluciones técnicas nuevas de regulación y control sobre los sistemas de secado antiguos antes que reemplazar los cilindros secadores por sistemas nuevos de secado.

Laurijssen et al. (2010) y Kong et al. (2014) estudiaron la reducción del uso de la energía y de las emisiones de GEI mediante el uso de diversas tecnologías emergentes entre las que cabe destacar las que se aplican al secado del papel como:

“Impulse Drying”, secado por tecnología impulso (inventado en 1970 y aplicada en los años 80 y 90, en realidad la tecnología no se comercializa), aumenta el contenido seco del papel mediante la mejora la deshidratación mecánica. Se basa en la aplicación de altas temperaturas en la sección de prensado de papel con lo que disminuye la viscosidad del agua, reduciéndose así la cantidad de agua a eliminar en la sección de secado. Martin et al. (2004) estableció para esta técnica un potencial de ahorro de combustible de hasta un 20%.

“Impingement Drying”, secado por corriente de aire caliente (estudiado desde los años 90), el principio es hacer pasar un flujo de aire seco muy caliente sobre la hoja de papel. Esta tecnología se utiliza principalmente en la producción de papel tisú y la implantación industrial de esta tecnología es de alrededor de 5%. La energía total necesaria es similar a una instalación multi-cilíndrica convencional.

“Steam impingement”, secado por corriente de vapor (concepto con más de 50 años de antigüedad), similar al de corriente de aire, pero en este caso se utiliza vapor sobrecalentado. Esta tecnología no se utiliza en la fabricación

de papel por la necesidad de adaptación de la misma al proceso de producción en lo relativo al aislamiento de campana y sistemas de circulación y control del vapor sobrecalentado.

“*Condensing belt*”, secado por banda de condensación (utilizado en primer lugar en los años 90), este sistema aumenta el secado y la tasa de evaporación del papel de manera significativa y puede reemplazar completamente una sección multi-cilíndrica convencional. Esta tecnología comenzó a introducir en los años 90 y que todavía está en fase previa de comercialización.

“*Micro waves Drying*”, secado por microondas (Warner, 1966), esta tecnología examina el uso de microondas para el secado de papel y obtener un perfil de humedad uniforme en la hoja en el nivel deseado. La absorción de energía de microondas es proporcional al contenido de humedad, esto significa que las áreas de mayor contenido de humedad serán calentadas más que otros con menos nivel de humedad. El calentamiento localizado en el perfil del papel producirá una reducción de viscosidad, lo que dará lugar a una corrección automática de la humedad a través de la hoja. El uso de microondas para el secado total de papel actualmente no es comercialmente viable (Karlsson, 2000).

“*Infra-red*”, secado por infra-rojos es otra tecnología actualmente en uso, como hornos de microondas, se utiliza principalmente para corregir el perfil transversal de humedad de la hoja de papel. Por lo general, situado en la parte final de la máquina, donde el contenido de humedad a eliminar es menor, y debido a su coste energético. En este caso el coste de uso si es proporcional al contenido de agua a evaporar. Los infra-rojos pueden ser de dos tipos, atendiendo a la fuente de energía que produce el calentamiento, eléctricos y de gas. Cada sistema tiene sus ventajas e inconvenientes, los infrarrojos eléctricos son más fáciles de instalar y son muy eficaces mientras que en su contra tienen el elevado costo de la energía, en el caso de infrarrojos de gas aun siendo más económico que el eléctrico tiene el riesgo asociado de seguridad en cuanto a incendio y explosión.

Laurijssen et al. (2010) han puesto de manifiesto que las nuevas o emergentes tecnologías de secado están poco implementadas. Actualmente alrededor de un 95% del total de las instalaciones de fabricación de papel utilizan el sistema tradicional de secado que emplea vapor como vehículo de la energía que se transmite al papel al entrar en contacto este con sistema multi-cilíndrico para secar el papel (con exclusión de las secadoras de pulpa de papel). Actualmente sigue siendo el método dominante en la

fabricación de papel. Para tener una referencia, el secado térmico del papel utiliza entre el 70% y el 100% del consumo total de vapor de la instalación, dependiendo de la instalación de la máquina de papel y tipo de papel. La sección de secado de papel, es simple conceptualmente y fácil de mantener. Puede mezclar vapor generado por distintas tecnologías sin grandes problemas técnicos. Los parámetros de funcionamiento asociados a este sistema son simples y se han utilizado prácticamente sin cambios desde su desarrollo inicial.

2.7.- CONSIDERACIONES FINALES

Los procesos continuos tienen unas peculiaridades que hacen que el control de los mismos, pese a la simplicidad aparente del proceso, sea bastante complejo. A diferencia de los procesos discretos, un fallo de parámetros de control o cualquier otra incidencia, no solo hace que sea necesario desechar una pieza de producción discreta, sino un lote completo. Lo que influye notablemente en la eficiencia de producción y también en los consumos tanto de materias primas, de energía y en los residuos generados y, lo que este estudio analiza, en las emisiones contaminantes.

Los sistemas de producción basados en sistemas continuos, como el sector del cemento, químico, metalúrgico y del papel, suelen estar asociados a plantas de gran tamaño. A mayor tamaño generalmente implica mayor inversión y mayor tiempo de amortización de la propia instalación. Este hecho favorece que la maquinaria instalada funcione durante un largo periodo de tiempo durante el cual, solo se realizan operaciones de mantenimiento. Durante la vida útil de una instalación industrial se pueden producir cambios significativos en el producto manufacturado, lo que puede hacer que la instalación industrial pueda estar funcionando lejos de los valores de los parámetros para los que inicialmente fue diseñada.

El sector de fabricación de papel no es una excepción. Una instalación industrial con máquina de papel generalmente tiene una vida útil superior a los 15 años. Su cuello de botella, que es la sección de secado, debido a lo simple y robusto del sistema multicilindro unido a su economía, hace que siga siendo el método de secado predominante actualmente y previsiblemente en los próximos años.

Los sistemas de producción basados en sistemas continuos, como el sector del cemento, químico, metalúrgico y del papel son sectores muy tecnológicos que requieren grandes inversiones en su maquinaria y que generalmente funciona en régimen continuo. Esta forma de producir implica que las intervenciones de mantenimiento se restrinjan temporalmente a paradas técnicas programadas muy espaciadas en el tiempo, para evitar tener que parar la máquina de producción por los elevados costes energéticos y temporales necesarios para volver a poner en marcha el proceso productivo nuevamente.

En concreto, las fábricas de papel suelen tener un ciclo de vida largo y es raro que se construyan nuevas plantas desde cero, lo habitual es hacer reformas o actualizaciones sobre las existentes, generalmente por secciones, para ir implementando paulatinamente las novedades tecnológicas. Del Río González (2005) encontró que este hecho hace que el sector de fabricación de papel sea reacio a hacer cambios en su maquinaria o sistema de fabricación si el resultado de su aplicación no está suficientemente probado. Con este principio es normal que la mayor parte de los equipos de fabricación de papel en general y la sección de secado en particular, tenga una antigüedad notable (más de 15 años en la mayoría de los casos). La antigüedad y el uso continuado pueden causar el deterioro de las instalaciones que trae como consecuencia una pérdida de rendimiento, un aumento en el consumo de energía y en consecuencia de las emisiones de CO₂ asociadas con el proceso de fabricación en general y al de secado en particular.

El sector de fabricación de papel en Europa utiliza principalmente gas natural como energía primaria, de acuerdo con CEPI (2013) y ASPAPEL (2014), para obtener el vapor necesario para calentar la sección de multi-cilindro para secar el papel. Como explicamos anteriormente, las emisiones directas de CO₂ asociadas a la fabricación de papel provienen principalmente del consumo de esta energía térmica y se han convertido en un problema de dimensiones globales, por las razones ya analizadas, la contaminación ambiental causada por el consumo de combustible y su valor económico debido al coste de adquisición del combustible en sí.

Es evidente que hay un gran número de factores que afectan el proceso de secado y que la mayoría de ellos tienen efectos importantes en el consumo de energía y las emisiones de CO₂. La limitación de las emisiones de CO₂ que propone el actual Protocolo de Kioto (Naciones Unidas, 1998), al cual se ha adherido la Unión Europea, está limitando el consumo de fuentes de energía que generan dichas emisiones, afectando de manera significativa al proceso de producción y sus parámetros de funcionamiento.

En el comienzo de la tercera fase del Protocolo de Kioto (Naciones Unidas, 1998), que por lo general elimina la gratuidad de derechos de emisión que hasta ahora tenían la mayoría de los sectores, hace el seguimiento y control de las emisiones de CO₂ se haga aún más necesaria que antes, pudiendo llegar a aportar una ventaja competitiva respecto a otras fábricas.

En este escenario, el estudio de la introducción de nuevos indicadores que relacionan tanto el comportamiento medioambiental con la eficiencia de producción se hace más evidente. El uso de indicadores medioambientales relativos a la producción, como las emisiones de CO₂, que además de la contaminación supone un sobre-coste por la emisión significativo, pueden aportar ventajas competitivas notables.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA Y EQUIPOS UTILIZADOS

3.1.- INTRODUCCIÓN

Se ha evidenciado la dificultad del control de los procesos de producción continuos por las peculiaridades e inercias que tienen estos sistemas. Los sistemas de control instalados en este tipo de procesos productivos tienen la característica principal de ser muy robustos y fiables por la necesidad de llevar el proceso controlado dentro de los valores de los parámetros establecidos.

Habitualmente se confía en ellos la validación del proceso productivo. Por la forma de funcionamiento generalmente no se puede acceder a su configuración, mantenimiento y/o calibración mientras el proceso está en marcha debido a ser parte fundamental para controlar que el sistema está funcionando dentro de los valores esperados.

En esta situación es muy importante conocer en detalle el proceso continuo que se analiza, el sistema de control instalado y las características específicas de producción, para poder identificar los indicadores de eficiencia del proceso y escoger de entre ellos los indicadores clave de rendimiento (Key Performance Indicator, KPI) que nos permitan conocer cómo está funcionando la planta y que margen de mejora se puede obtener en el proceso.

Debido a lo específico de los sistemas de producción continuos en general y del proceso de fabricación de papel en particular, la forma de producir el mismo bien o tipo de papel puede variar en gran manera dependiendo del tipo de fábrica, del tipo de control instalado, de la estrategia de toma de datos e incluso del uso que se hace de los mismos, pudiéndose obtener rendimientos del proceso muy dispares entre dos plantas que producen el mismo tipo de papel. Este hecho queda constatado en el caso de la fabricación de papel, en establecimiento de *benchmark* de producto para diversos aspectos producidos como el uso de agua, las características del agua de vertido, el consumo energético, y las propias emisiones de CO₂ directas derivadas del proceso de producción.

Es este entorno se hace evidente la necesidad de tener un sistema de análisis adecuado para la toma de decisiones dentro del proceso, que permita no solo obtener un producto manufacturado que cumpla con los requisitos del cliente, sino que también permita evaluar la eficiencia del mismo y compararlo con otros procesos similares. En este sentido la introducción del indicador “t CO₂ / t Producción” puede ayudar a conseguir este objetivo, pero requiere de una sistemática de recopilación que le haga válido para este cometido.

3.2.- METODOLOGÍA DEL ESTUDIO DEL CASO

La presente Tesis ha adoptado la metodología del estudio del caso, para alcanzar los objetivos definidos en el Capítulo 1. Esta metodología está ampliamente aceptada en la literatura científica, y Fidel (1984) recomienda su uso cuando existen una gran cantidad de factores y relaciones en el fenómeno a estudiar, cuando los factores o relaciones se pueden observar o medir directamente, y sin esas premisas no se puede determinar su importancia. La sistemática en la recopilación de los datos proporciona rigor a la investigación y evita sesgos en la interpretación, el cual es una debilidad atribuida en ocasiones a esta metodología, pero salvable, de acuerdo con Flyvbjerg (2006).

Baxter y Jack (2008) recopilan diferentes tipos de estudios de casos para establecer una clasificación metodológica y en ella muestran el llamado “intrínseco” por Stake (1995), quien lo identifica “cuando los investigadores tienen un gran interés en el fenómeno objeto de análisis y su finalidad es su entendimiento de ese fenómeno a causa de su importancia, sin que necesariamente lleve a construir una teoría”.

Se ha tomado para el estudio en la Tesis los datos de una planta de fabricación de papel como referencia en la que se fabrica papel sin estucar. En concreto se ha estudiado más afondo los datos de su sección de secado de papel y las variables del proceso de producción directamente relacionadas con esta sección.

La fábrica utiliza gas natural, como combustible en una caldera que se emplea para generación de vapor. En el caso analizado, el vapor se consume en exclusiva en la sección de secado de la fábrica de papel. En nuestro caso es la sección responsable del

100% de las emisiones directas de CO₂ de esta fábrica que están bajo el esquema del comercio de emisiones ETS.

La sección de secado, como se verá más adelante, es el cuello de botella del proceso de producción de papel. La fábrica cuenta con datos históricos suficientes para hacer un análisis adecuado y extraer conclusiones con el estudio.

La fábrica se encuentra situada en España y por lo tanto se tomará la legislación que le aplica para el seguimiento de las normas relativas a la notificación y cálculo de emisiones. La fábrica cuenta con un nivel comparable al de su índice de referencia aplicable o *benchmark*, lo que significa que la fábrica tiene un bajo nivel de emisiones atendiendo a lo indicado anteriormente en lo relativo al establecimiento del valor de *benchmark*. Tiene tecnología actualizada y está situado en una zona con fuertes cambios de temperatura y humedad del aire exterior a lo largo de todo el año. La alta temperatura se corresponde a demás con una baja humedad del aire.

La fábrica cuenta con un sistema de control moderno, descrito en el apartado “3.10 Equipos utilizados”, en el que es factible registrar las variables de proceso significativas para este estudio e incorporar de forma rápida el registro de nuevas variables si fuese necesario.

En el estudio, y aprovechando el sistema QCS con el que cuenta la máquina de papel, se definen los datos del proceso que se van a registrar del proceso en general y de la sección de secado en particular, que es la que constituye el cuello de botella de la fabricación del papel. En este caso la sección de secado es la sección responsable del 100% de las emisiones directas de CO₂ de la fábrica debidas al consumo de gas natural y sujeto a ETS.

Para el análisis de las emisiones de CO₂ y la definición de los indicadores se han tenido en cuenta las principales variables físicas que intervienen en el proceso de secado de papel identificadas por Karlsson (2000). En relación con el consumo de energía térmica, los aspectos energéticos desde el punto de vista teórico el secado de papel (Sivil et al. (2005), Zvolinschi et al. (2006)), y para maximizar la recuperación de energía (Sivil y Ahtila (2009), Laurijssen et al. (2010)). Las reformas y pautas de mantenimiento propuestas, basadas en datos proporcionados por los indicadores definidos, son las que reducen el indicador considerado “t CO₂ / t Producción”.

En la Tesis se estudian diversos apartados del proceso de fabricación de papel y más concretamente de la sección de secado. Enumeraremos en apartados separados la metodología específica para cada uno de ellos. En la fabricación de papel, aunque los procesos son conceptualmente simples, existen numerosas particularidades de proceso que hay que considerar, empezando por la definición del propio indicador.

El proceso de secado no solo afecta a la eficiencia del proceso, también afecta significativamente a las características del papel producido, por lo que es necesario analizar también diversos factores como:

- Las pautas de mantenimiento que tienen influencia sobre las variables del proceso de secado.
- Las reformas llevadas a cabo en la instalación para mejorar aspectos que no están directamente relacionados con el proceso de secado.
- Las reformas llevadas a cabo para la mejora en la eficiencia.

Para ver si están bien planteadas y ejecutadas o pueden tener influencia tanto en la calidad del producto obtenido, en la reducción de rechazos internos y en la eficiencia del proceso.

Los datos han sido recogidos también del Sistema de Gestión Medioambiental EMS y el Sistema de Gestión Corporativa (CMS). La información inicialmente se recoge a través de la instrumentación del propio QCS de control máquina y se complementa con los datos de recogidos diariamente para los sistemas EMS y CMS.

Para poder comparar la eficiencia del proceso de fabricación de papel en general y el de secado en particular, se introduce el indicador “t CO₂ / t Producción”, que se obtiene como ratio directo entre las emisiones de CO₂ verificadas en cada periodo considerado y las toneladas de papel producido con la humedad del 6% en la fábrica (sub-instalación) considerada. En nuestro caso “Producción” significa tonelada de papel que se corresponde con el papel producido con la humedad estándar del 6%.

El indicador propuesto “t CO₂ /t Producción” cumple las premisas, para poder ser utilizado correctamente:

- Este unívocamente definida su obtención.
- Que sea reproducible y revisable en una misma instalación a lo largo del tiempo.
- Que sea reproducible en diferentes instalaciones.
- Que sea comparable entre distintas instalaciones o fábricas similares para poder establecer el *benchmark* de producto.

Tiene además un método definido concreto, publicado y validado (a nivel europeo) para su obtención.

El indicador se obtiene como cociente, en un periodo determinado seleccionado (hora, día, mes, año), de las emisiones de CO₂ y la producción en ese periodo del producto considerado respecto al que se va a realizar el seguimiento.

Los datos usados en el estudio, recopilados con una frecuencia adecuada, medidos de acuerdo a la legislación española vigente (Ley 1/2005, Real Decreto 1315/2005, Decisión 2007/589/CE), son los relativos a producción, emisiones, disponibilidad medida según Nakajima (1998), número de paradas y un gran número de variables relacionadas con la sección de secado. Dichas variables son analizadas estadísticamente para encontrar la relación entre ellas y el indicador considerado.

3.3.- DETERMINACIÓN DE LAS EMISIONES DE CO₂

La toma de datos relativos a producción, emisiones, disponibilidad, paradas y un gran número de variables relacionadas con la sección de secado posteriormente son analizadas estadísticamente para encontrar la relación entre ellas y el indicador considerado.

Los datos utilizados en la Tesis para el cálculo de las emisiones de CO₂ verificadas o producidas en una fábrica industrial, se realizan con la frecuencia adecuada y siguiendo las indicaciones del Real Decreto 1315/2005 (en su artículo 3) de 4 de noviembre por el que se establecen las bases de los sistemas de seguimiento y verificación de emisiones de gases de efecto invernadero en las instalaciones incluidas en el ámbito de la Ley 1/2005 (artículo 22), y la Decisión 2007/589/CE (que deroga a la Decisión 2004/156/CE) por la que se establecen las directrices para el seguimiento y

notificación de las emisiones de gases de efecto invernadero. Atendiendo a la Ley 1-2005 (anexo III) y que son las relativas a la producción, las emisiones, la disponibilidad, el número de paradas y un gran número de otras variables asociadas a la sección de secado. Estas variables posteriormente se analizarán con los medios adecuados y estadísticamente para determinar la relación entre ellos y el indicador de referencia “t CO₂/ t Producción”.

$$t \text{ CO}_2 = DA \times FE \times FO \quad (3.1)$$

Dónde:

DA corresponde a Datos de la Actividad: se refiere a la energía consumida (expresado en TJ) por la sección de secado en el período considerado.

FE corresponde a Factor de Emisión: se utilizará el indicado por España en el último inventario nacional presentado a la Secretaría de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Este factor se expresa en toneladas de CO₂ por TJ.

FO corresponde a Factor de Oxidación, se utilizará el valor 1, valor asignado a gas natural.

Para el cálculo de los “Datos de la Actividad” se tiene en cuenta el flujo de vapor (*S_f*) suministrada durante el período considerado a la sección de secado, la diferencia de entalpía entre el vapor suministrado a la sección de secado (suministrado a la temperatura (*S_t*) y la presión (*S_p*)) y la entalpía de retorno de condensados de la sección de secado (a temperatura (*C_t*) y (*C_p*) presión).

El factor de emisión y el factor de oxidación utilizados en el cálculo, corresponden al combustible gas natural (Ministerio de Medio Ambiente, 2011), correspondiente al combustible utilizado por la fábrica para producir el vapor necesario para secar el papel en la sección de secado.

Con los datos suministrados por el QCS para cada bobina, podemos calcular los Datos de la Actividad así como calcular también la Energía Consumida (TJ) de la sección de secado para la fabricación de la bobina madre de papel o “Jumbo”.

Para el cálculo de la producción de papel de la sub-instalación necesario para establecer el indicador en los períodos de referencia, se basa en las guías metodológicas publicadas por ECOFYS (2011a, 2011b) para la Comisión Europea.

En el cálculo de las emisiones de CO₂, para el caso del secado del papel de la fábrica analizada, se sigue la metodología indicada en el “Cálculo de emisiones y los factores procedentes del “Informe Inventarios GEI mayo 2011” (Ministerio de Medio Ambiente, 2011), Anexo 8, “Referencia del Inventario para la Aplicación de la Directiva de Comercio de Emisiones”

El cálculo de la producción de la sub-instalación con referencia de producto respecto al que se establecerá el indicador en los periodos de referencia definido para compararlo con el *benchmark*, se hará siguiendo las directrices indicadas en las guías metodológicas públicas por ECOFYS para la Comisión Europea, que se corresponden con las guías metodológicas ECOFYS (2011a, 2011b), European Commission, “Benchmarks for free allocation”:

- *Guidance document 1 General guidance febrero 2011*
- *Guidance document 2 Guidance on allocation methodologies febrero 2011*
- *Guidance document 9 Sector specific guidance_v13*

Para el caso de la fábrica analizada, emplearemos estos documentos para concretar de forma unívoca la producción en los periodos de referencia considerados, así como para fijar el método de cálculo para los siguientes periodos.

Las emisiones de CO₂ calculadas se han comprobado con las declaraciones anuales de las emisiones realizadas por la fábrica. Estos datos de emisiones por complejo industrial son públicos y se pueden consultar de acuerdo con las reglas establecidas por el “European Climate Registry” (Registro EU ETS), las normas aprobadas por el Comité de Cambio Climático y también comprobadas con otras declaraciones anuales como las del “European Pollutant Release and Transfer Register” (E-PRTR). El ámbito europeo registro proporciona información acerca de los datos ambientales de las instalaciones industriales particulares en cada uno de los Estados miembros de la Unión Europea que sustituye y mejora al antiguo EPER.

Respecto al consumo de combustible, la fábrica cuenta con un único proveedor de energía en forma de gas natural y toda esta energía se utiliza única y exclusivamente en el generador de vapor o caldera. Fruto de la combustión del gas natural se producen las emisiones directas de CO₂, que están sometidas al esquema de emisiones ETS.

El vapor generado por la caldera, alimenta en exclusiva al proceso de secado del papel. En este caso, y debido a la configuración de la fábrica, es posible asumir que la diferencia entre la energía utilizada y la necesidad teórica, son las pérdidas de energía que se pueden cuantificar, identificar y reducir.

3.4.- DETERMINACIÓN DE LOS DATOS HISTÓRICOS DE PRODUCCIÓN

El cálculo de la producción de papel de la sub-instalación para establecer el indicador en los periodos de referencia, se hará siguiendo las directrices indicadas en las guías metodológicas de ECOFYS (2011a, 2011b, 2013) para la Comisión Europea.

El sistema de producción de papel es un proceso continuo, y se ve obligado a interrumpirse dependiendo de la capacidad para almacenar papel al final de la sección de secado. Se produce una bobina madre o “Jumbo” a intervalos regulares dependiendo de la densidad superficial o gramaje de papel producido. En la fábrica que se analiza, este proceso se repite cada 50 - 55 minutos aproximadamente obteniéndose una bobina madre o “Jumbo” de unas 6 toneladas de peso. Esta bobina se traslada desde la Pope hasta la Bobinadora para ser posteriormente cortada en bobinas y/o rodajas más estrechas, embalándose según las necesidades del cliente.

La fábrica tiene implantado un sistema de registro de datos descrito en el apartado “3.10 Equipos utilizados” para el análisis en los diversos estamentos. Disponen también de un sistema de gestión implantado y consistente de indicadores de producción que aprovecharemos para hacer los estudios iniciales.

La fábrica dispone de un sistema CMS de recogida de datos en formato Excel de los datos históricos y registros asociados de producción, incidencias y consumos de energía. La información recopilada tiene la siguiente información;

Tipo de papel fabricado (COA, C1A, C2A, C3A, C4A, C5A y C6A).

Densidad superficial del papel (g/m^2).

Producción aceptada (kg).

Rechazo de producción (kg).

Tiempo de parada por mantenimiento o producción (Tfs).

Consumo de energía (kWh).

Se ha revisado la consistencia de los datos y se ha comprobado que son válidos para el estudio. Se han analizado los datos de producción y emisiones del periodo 2009 al 2014. No obstante para algún estudio específico se puede acotar más el periodo para que sea un periodo más representativo de producción en los que no han cambiado las condiciones de máquina ni se han realizado reformas que le cambien la capacidad y que puedan afectar a ese estudio particular.

El número de secadores, la capacidad de evaporación del sistema de secado y la necesidad de producir papel con una condición de sequedad controlada, determinan la velocidad del proceso y la diferencia entre la capacidad de producción teórica y real de la producción para un producto dado.

El indicador “ $\text{t CO}_2 / \text{t Producción}$ ” se obtiene, como ya se ha indicado, como cociente de las emisiones de CO_2 establecidos para cada período considerado y las toneladas de papel producido en la fábrica (sub-instalación) en el mismo período.

Tomaremos como periodo de referencia el menor periodo de tiempo posible que podamos grabar con el Sistema de Control de Calidad (en adelante QCS), y que corresponde al tiempo necesario para la fabricación de una bobina madre de papel (Jumbo) en la máquina y que es menor a una hora. Con estos datos podremos determinar el efecto de cada uno de los parámetros de funcionamiento en la sección de fabricación de papel, con suficiente cantidad de datos para el estudio.

La información recopilada, incluida la relacionada con los tiempos de producción, paros de maquinaria y ratio o cantidad de producto rechazado, las variaciones en la calidad, se recoge en las siguientes variables:

1. Especificaciones de producto:

Pg: tipo de producto fabricado.

Pd: Densidad superficial del papel (g/m^2).

Pwi: Ancho del papel a la entrada de la sección de secado.

2. Condiciones generales del proceso:

Producción de Papel.

Ms: Velocidad de máquina (m/min , en vez de m/s por ser el utilizado en el QCS).

3. Condiciones del papel a la entrada de la sección de la sección de secado:

Wt: Temperatura del agua a la entrada de la sección de secado.

Pti: Temperatura del papel a la entrada de la sección de secado.

Pmi: Humedad del papel a la entrada de la sección de secado.

4. Condiciones de la sección de secado:

Sf: Caudal de vapor a la sección de secado.

St: Temperatura de vapor a la sección de secado.

Sp: Presión de vapor a la sección de secado.

Ct: Temperatura de condensados extraídos de la sección de secado.

Cp: Presión de condensados extraídos de la sección de secado.

Eat: Temperatura del aire extraído de la campana de secado.

Eam: Humedad del aire extraído de campana de secado.

Ebt: Temperatura del aire de soplado a campana de secado.

Ebm: Humedad del aire de soplado a campana de secado.

Crt: Temperatura del retorno de condensados.

5. Condiciones del papel a la salida de la sección de secado:

Pto: Temperatura del papel a la salida de la sección de secado.

Pmo: Humedad del papel a la salida de la sección de secado.

6. Factores externos:

Ot: Temperatura del aire exterior.

Se ha revisado la consistencia de los datos y se consideran válidos, no hay lagunas de datos. El estudio se basa en los datos de producción y de emisiones de los años 2009, 2010, 2011, 2012 y 2013, ya que se considera un periodo de fabricación suficientemente representativo durante el cual no se han producido cambios las condiciones de funcionamiento de la maquinaria ajenas a las operaciones de mantenimiento, y no se han realizado modificaciones que afectaron su capacidad de producción de la sección de secado. El estudio se basa en el análisis de más de 15.400 registros de producción.

Con el fin de obtener el indicador “t CO₂ / t Producción”, se ha recopilado también la información sobre el consumo de energía del proceso de secado para cada bobina madre de pope o “jumbo”, y el indicador se ha establecido de acuerdo con las directrices establecidas en la subsección 3.3. Se ha demostrado que el método es

compatible con el informe anual de emisiones, y la suma de los valores individuales obtenidos corresponde a los datos de las emisiones de GEI declarados por la fábrica en los periodos considerados.

Hay secciones auxiliares del sistema de secado de papel, que tienen influencia en la energía requerida en el proceso de secado, en la eficiencia y sostenibilidad del proceso de producción. Se han teniendo en cuenta las subsecciones identificados por Kong et al. (2013) como oportunidades de mejora de la eficiencia energética del proceso de secado y que están directamente relacionados con las emisiones de CO₂. Las subsecciones son los siguientes:

1. El generador de vapor o caldera.
2. La recuperación de calor.
3. Control de la humedad del aire de extracción de campana.

A la que añadimos:

4. Transporte de vapor y retorno de condensados.

3.5.- DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE MÁQUINA

Para el análisis de la influencia de la disponibilidad de máquina se ha seleccionado el periodo 2009 – 2011, por considerarse un periodo representativo del proceso de producción.

En los datos históricos disponibles del sistema de registro de la fábrica, se han revisado las siguientes variables y parámetros:

- Días de trabajo en el año.
- Días de producción.

- Tfs en horas de paro debido a averías y mantenimientos programados.
- Disponibilidad de máquina.
- Pd Media de producción diaria.
- Producción anual.

Que confirman que el periodo considerado es lo suficientemente homogéneo en cuanto a producción como para realizar el estudio de variación del indicador. En el periodo considerado no ha habido variaciones significativas en las condiciones de máquina.

Entendemos en este estudio la disponibilidad de la máquina, como el porcentaje de tiempo que la máquina está útil (o disponible) para producción. El tiempo que está fuera de servicio o indisponible contempla toda paralización por mantenimiento correctivo o preventivo, desde el momento en que queda fuera de servicio hasta que vuelve a estar operativo y disponible para producción. La disponibilidad tomará un valor entre 0 y 1. Se calcula como:

$$Disponibilidad = \frac{(Tt - Tfs)}{Tt} \quad (3.2)$$

Donde Tt es el tiempo programado de producción previsto para la máquina, descontado el tiempo de inactividad o de espera por causas ajenas a producción (Tei). Tendremos en cuenta solamente los tiempos programados de producción, es decir eliminando los tiempos de espera (Tei) en los que la máquina está fuera de servicio por causas ajenas a la propia máquina y los que son debidos a situaciones coyunturales ajenas al proceso de fabricación como la disminución de la demanda estacional de los clientes.

$$T = Tt + Tei \quad (3.3)$$

$$Tt = Ts + Tp \quad (3.4)$$

Siendo

T_s tiempo de ajuste.

T_p tiempo producción.

T_{ei} tiempo de espera.

Donde T_{fs} es el tiempo en el que la máquina está fuera de servicio. Compuesto por los tiempos perdidos por mantenimiento y/o avería que afectan a la disponibilidad de fábrica.

$$T_{fs} = T_{ac} + T_{ad} + T_{am} + T_{mp} + T_{pp} \quad (3.5)$$

Siendo.

T_{ac} tiempo de producción parado por avería o mantenimiento correctivo de origen conocido.

T_{ad} tiempo de producción parado por avería o mantenimiento correctivo, origen desconocido.

T_{am} tiempo de producción parado por microparadas.

T_{mp} tiempo de producción parado por mantenimiento preventivo

T_{pp} tiempo de producción parado por requerimientos de producción

Al ser un proceso continuo, los tiempos de ajuste (T_s) se pueden considerar despreciables, la máquina ajusta la densidad superficial del papel de forma continua variando la velocidad y presión de los rodillos de trabajo, siendo considerado como pérdidas de calidad las unidades producidas y rechazadas en los cambios de producto.

El tiempo de espera (T_{ei}) tampoco tiene importancia en este estudio y se descuenta de tiempo total T_t ya que la disponibilidad se calcula sobre los días programados de producción y que varían respecto a los días totales, principalmente por causas ajenas a la máquina como la demanda de producto del mercado.

Indicar que T_s no se desestima completamente, se calcula indirectamente con la producción reprocesada por arrancada después de avería y/o parada técnica así como por cambio de producto, inevitable por ser proceso continuo y cuyo valor corresponde aproximadamente al 1,5% de la producción. Este valor se incrementa en periodos de crisis al realizar órdenes de fabricación más pequeñas.

Se han recopilado los datos de tiempos de funcionamiento y parada de los informes diarios de producción. Los datos de producción se han obtenido del informe mensual de producción donde se detallan las unidades producidas y las características de las mismas.

La máquina ajusta el tipo de producto de forma continua variando las condiciones de trabajo, los tiempos de ajuste T_{se} se consideran como pérdidas de unidades producidas y se calcula con la producción reprocesada al iniciar producción después de avería, parada o cambio de producto. El tiempo de espera (Te_i) no se considera al no evaluarse la planificación de producción. Como puede apreciarse en la ecuación (3.5), el tiempo fuera de servicio T_{fs} , aglutina todos los tiempos de parada, pero queda fuera del alcance del estudio la contribución particular de cada uno de ellos respecto al indicador considerado.

Se han eliminado también en este apartado, y se deberá estudiar aparte, los periodos transitorios de arranque de la máquina después de una parada larga por causas ajenas a producción, paradas de Navidad, fiestas patronales, huelgas y periodos de inactividad debidas a la disminución de la demanda estacional de los clientes. Debido a ser un proceso continuo y tener gran inercia se producen consumos significativos de energía para la puesta en servicio y precalentamiento de la sección de secado.

La instalación de producción analizada en general y la máquina de fabricación de papel en particular, tienen alta eficiencia de funcionamiento respecto a los tiempos de parada de máquina, hecho por el que se cuantifican las horas de paro mensuales para su comparación. El cálculo de la disponibilidad se realiza diariamente empleando las horas como unidad. Las horas de paro se corresponden con el T_{fs} . Para ello se tomarán los datos del QCS, que recoge los datos continuamente de las principales variables y parámetros de producción a estudiar, como se indica en la Figura 3.1 del QCS.

El QCS también recoge la información de las consignas de producción, que en este caso son el gramaje y la humedad final de la bobina. En el estudio se registrarán sus variaciones y se cotejará la información obtenida con la acumulada en el día.

Como se ha explicado anteriormente, la limitación de producción en esta máquina lo constituye la capacidad de evaporación de agua del papel en la sección de secado. El sistema irá aumentando la velocidad general de máquina hasta conseguir que la humedad final del papel sea igual a la de consigna.

QCS Datos

Nº Rollo: 6590 Órdenes de Producción: OF015928

Contramaestre: F. Jacoste

Fecha Navegación: 18/09/12

Código Papel Bobina: 1000100 Fecha Inicio: 18/09/2012 Fecha Fin: 18/09/2012

Nº Fabricación Bobina: 6590-1-OF... Hora Inicio: 17:59:12 Hora Fin: 18:46:00

Calidad: C2A GR.355 A.0127 SONOCO PINA

Calibre: 550

Gramaje: 355

Ancho: 127,00

Cantidad: 15.000,00

Humedad: 6% HUMEDAD

LISA:

Composición:

Cliente: 172

Anchura Hoja Bobina: 1.949,35 Nº Bobina Informe: 1

Longitud Hoja Bobina: 6.472,95 Nº Roturas PS: 0

Peso Bobina: 4.584,46 Nº Roturas PH: 0

Producción: 5,98 Velocidad Máquina: 140,72

Caudal Vapor: 2.441,48

Humedad TEM SEC: 53,73

Temperatura TEM SEC: 35,09

Temperatura POPE: 81,74

Temperatura Agua Mesa: 34,92

Temp. Extracción Campana: 83,86

Humedad Extracción Campana: 14,65

Temperatura Aire Soplado: 83,42

Temperatura Condensados: 46,59

Horas	Minutos
0	46
0	0
0	0
0	0

Consigna	Media	Mínima	Máxima	Desv. Trans.	Desv. Long.	Factor
365,00	363,33	350,58	373,53	4,74	1,07	1,04
6,30	6,45	5,43	8,61	0,61	1,16	1,01
700,00	708,13	691,76	708,13	8,81	0,24	0,05

Lote	Peso	Nº Rodajas
545120/12	1218	12
545121/12	1226	12
545122/12	1203	12
545123/12	1205	12
545124/12	1210	12
545125/12	1219	12
545126/12	1212	12
545127/12	1220	12
545128/12	1195	12
545129/12	1201	12
545130/12	1189	12
545131/12	1194	12
545132/04	399	4

Figura 3.1 Datos del QCS con detalle de los parámetros extraídos.

Si la velocidad de máquina aumenta, al mantenerse constante la capacidad de evaporación de la sección de secado y entrar más agua a la misma contenida en el papel, aumenta la humedad de salida del mismo. Si la velocidad de máquina disminuye, disminuye también la humedad del papel por disminuir la cantidad de agua que hay que eliminar de la hoja húmeda. En función de la humedad de entrada del papel a la sección de secado y las condiciones operativas y de mantenimiento de la instalación considerada, se podrá trabajar a una mayor o menor velocidad lo que trae como consecuencia obtener una mayor o menor producción. Esta sección es por tanto el cuello de botella del proceso en esta fábrica.

Con la información recopilada del sistema de control y el resto de variables que se intuyen influyen en el indicador analizado “t CO₂/ t Producción”, se obtienen los datos indicados en la Tabla 3.1, donde se analiza sobre cada variable si es:

- Parámetro definible: cuando se puede fijar de antemano su valor.
- Parámetro controlable; cuando puedes cambiar la configuración o regulación de máquina para tener su valor.
- Variable de estudio; si se estudia su valor en relación con el indicador “t CO₂/ t Producción”.

Información extraída del QCS				
Notación	Parámetro o Variable	Parámetro Definible	Controlable	Objeto de estudio
<i>Pwi</i>	Ancho hoja	si	si	si
Producción	t /hora	no	no	si
<i>Sf</i>	Caudal vapor	no	si	si
<i>Tac</i>	Tiempo rotura parte húmeda	no	no	si
<i>Tad</i>	Tiempo rotura parte seca	no	no	si
<i>Tfs</i>	Tiempo máquina parada	no	no	si
	Número roturas parte húmed	no	no	si
	Número roturas parte seca	no	no	si
<i>Ms</i>	Velocidad máquina	si	si	si
<i>Pmi</i>	Humedad salida prensas	no	si	si
<i>Pti</i>	Temperatura salida prensas	no	si	si
<i>Pto</i>	Temperatura Pope	no	no	si
<i>Wt</i>	Temperatura Agua mesa	si	si	si
<i>Eat</i>	Temperatura extracción campana	no	no	si
<i>Eam</i>	Humedad extracción campana	no	no	si
<i>Ebt</i>	Temperatura aire soplado	no	no	si
<i>St</i>	Temperatura condensados	no	no	si
<i>Ot</i>	Temperatura aire exterior	no	no	si
<i>Om</i>	Humedad aire exterior	no	no	si

Tabla 3.1. Información extraída del QCS.

Con toda esta información se obtendrán las variables a optimizar (y que luego serán objeto del estudio de regresión) para ver cómo afectan al indicador seleccionado “t CO₂ / t Producción”. A parte de la bobina de producción, que es la unidad mínima que se puede estudiar, hay otras variables que pueden influir en el análisis de la información. En la fábrica se manufacturan 7 tipos de papel básicos que se diferencian

básicamente por la resistencia que el papel ofrece a la des-laminación entre sus capas, de referencias C0A, C1A, C2A, C3A, C4A, C5A y C6A.

El ensayo que determina esta variable se realiza según la Norma TAPPI - T569 pm-00 y Norma UNI 9439, ambas comúnmente aceptadas por el sector y que no tienen transposición a normas ISO o UNE y se mide en $J m^2$. Como referencia, la el producto o calidad más bajo tiene un valor de $200 J m^2$ mientras que el más alto tiene un valor superior a los $1000 J m^2$.

3.6.- DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL TIPO DE PAPEL EN LAS EMISIONES DE CO₂

Cada tipo de producto que se fabrica tiene una formulación distinta tanto de materia prima como de productos añadidos (principalmente almidón), lo que hace que tenga una característica específica en de facilidad de eliminación del agua que contiene y por lo tanto un nivel de indicador “t CO₂/ t Producción” de partida distinto.

Para que el estudio sea correcto, hay que tener en cuenta el tipo de papel que se fabrica. Atendiendo a los tipos de papel fabricados en un año estándar, la distribución de producción puede observarse en la Tabla 3.2.

Datos	
Código producción	Porcentaje
COA	73,92
C1A	5,54
C2A	15,83
C3A	0,98
C4A	3,05
C5A	0,59
C6A	0,10
Total	100

Tabla 3.2. Distribución de producción por tipo de papel.

Como puedes observar, solo son significativas la primera C0A con el 73,92% de la producción y la C2A con un 15,83%. Entre los dos son el 89,7% de la producción. Y básicamente basaremos el estudio sobre ellos.

Rango gramaje	C0A (kg)	%	C1A (kg)	%
150-200	233.888	0,515	43.020	0,095
200-250	2.750.891	6,056	117.297	0,258
250-300	252.515	0,556	667.669	1,470
300-350	9.438.742	20,778	333.154	0,733
350-400	6.731.473	14,861	700.333	1,542
400-450	5.657.512	12,454	2.569.738	5,657
450-500	6.510.350	14,332	2.759.735	6,075
500-550	552.690	1,217		
550-600	660.848	1,455		
600-650	770.875	1,697		
	33.579.318	73,920	6.712.612	14,777
Total producción cubierta			89,7	%

Tabla 3.3. Distribución de producción, kg producidos de cada tipo de papel y gramaje en un año.

Dentro de cada tipo de producto, también hay diferencias en la facilidad de eliminación de agua atendiendo a la densidad superficial del papel (comúnmente conocido como gramaje del papel, ya que siempre se asume la superficie de 1 m²), siendo más efectiva la producción en los gramajes centrales (entre 350 y 550) siendo menos eficiente (aparentemente) en los rangos extremos de la producción.

Se ha analizado la producción de ambas calidades en función de los gramajes de producción, Tabla 3.3. Se van a considerar inicialmente 10 rangos que dividen la producción entre los mínimos y máximos gramajes de producción con intervalos de 50 gramos. Posteriormente en el estudio detallado habrá que constatar si están bien establecidos (ver Figura 3.2 y Figura 3.3).

Con esta selección se cubre casi el 89,7%, solo el C0A cubre el 73,92%. Respecto a la elección de los rangos de gramaje, se han seleccionado después de analizar en profundidad los datos de producción por gramajes, se ha graficado la producción frente al gramaje en todos los casos Figura 3.2 y Figura 3.3. Como se puede observar la producción no es lineal en todos los gramajes, sea la calidad C0A o la C1A, por lo que para establecer los intervalos de gramajes comparables en el estudio habrá que tener en cuenta la forma de las figuras, no debiéndose comparar producciones de

600 a 650 g/m² con las que están en torno a 300 – 350 g/m². Este hecho afectará al indicador considerado “t CO₂ / t Producción”.

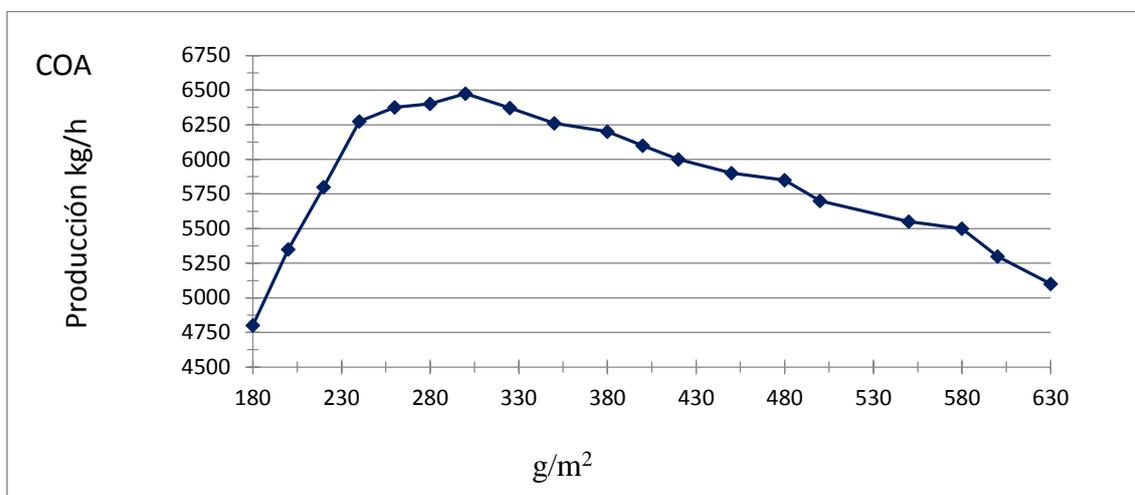


Figura 3.2. Producciones por gramaje para el tipo de papel C0A

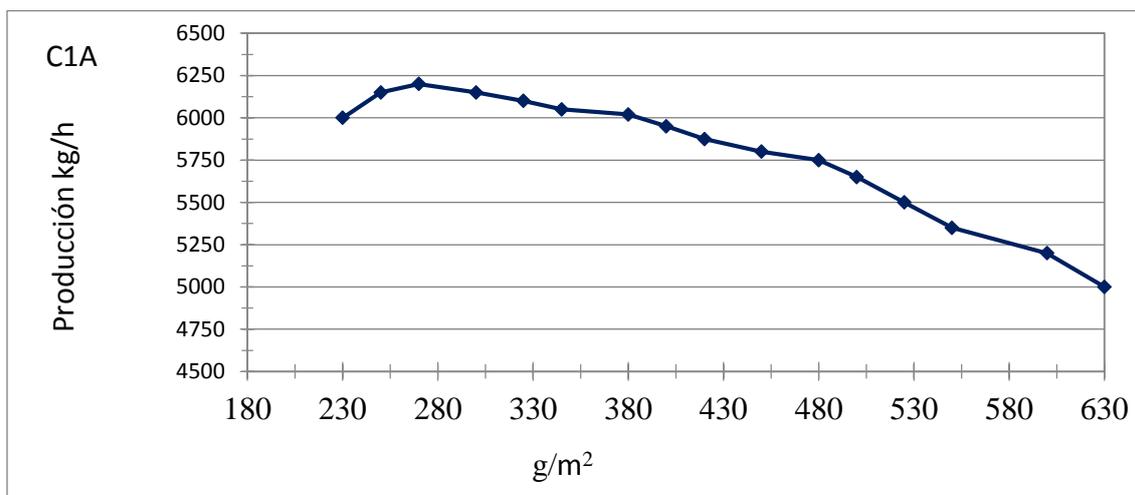


Figura 3.3. Producciones por gramaje para el tipo de papel C1A.

Si se revisan los datos de la Tabla 3.2, se puede observar que la producción más extendida es la C0A, mientras que la de C1A tiene un rango de gramajes menor. Prácticamente comienza en los 230 g/m² frente a los 180 g/m² del C0A. Lo que ayudará a establecer los rangos de estudio con producciones estándar comparables. La velocidad de máquina es la consecuencia de la actuación sobre los parámetros de máquina o el

mantenimiento de las instalaciones, los parámetros definidos que se recogen en la Tabla 3.1, la mayoría se pueden observar en la Figura 3.1.

3.7.- PROCEDIMIENTO ESTADÍSTICO DE DATOS

Los datos obtenidos del indicador en cuanto a los tipos de papel, el gramaje del mismo y la temperatura exterior y los recopilados por el QCS, han sido sometidos a un análisis de la varianza (ANOVA) con el objeto de determinar si alguno de ellos tiene un efecto significativo en los resultados finales, lo que puede ser determinado en el caso de que P-valor sea menor de 0,05 para un nivel de confianza del 95,0%, una vez realizado el test de Fisher-Snedecor (Spiegel, Schiller y Srinivasan, 2012). Además se han llevado a cabo un análisis de regresión, aplicando modelos generales lineales ya que permiten encontrar relaciones entre factores cuantitativos y cualitativos. Finalmente, se ha aplicado el test de Student-Newman-Keuls con el objeto de encontrar los niveles de cada factor que son estadísticamente similares. El software empleado ha sido Statgraphics.

Los datos recopilados del QCS también serán procesados estadísticamente usando el análisis de varianza basado esta vez en el diseño experimental de Taguchi, que permite estudiar la influencia de cada uno de los factores individuales en el indicador considerado.

Cada tipo de producto se estudia mediante regresión lineal teniendo en cuenta los factores cuantitativos y cualitativos de cada producto o tipo de papel, con el objeto de encontrar si se puede realizar alguna agregación de productos en el estudio.

Por otra parte, se ha realizado una regresión lineal entre los datos del proceso y la temperatura exterior. Posteriormente, podremos identificar las variables más importantes en el proceso, cuantificarlas y establecer después las condiciones de funcionamiento del proceso que minimicen el indicador “t CO₂ / t Producción”.

Se diseñan los experimentos basados en proyecciones ortogonales que permiten evaluar simultáneamente los efectos de cada factor en términos de sus diversos niveles y las interacciones entre ellos.

En línea con el método Taguchi, tanto los factores controlables como los incontrolables se introducirán en el experimento con el fin de evitar las pérdidas y reducir la variabilidad del proceso.

Con el uso del análisis de varianza (ANOVA), se calculará el porcentaje que cada factor contribuye al indicador “t CO₂ / t Producción”. La tabla de ANOVA se construirá a fin de determinar la influencia de cada factor sobre el indicador (Spiegel et al., 2012).

Cuando se determinen los factores de mayor influencia, se analizará la manera de tratar con cada uno de ellos, si se trata de un factor controlable, o la forma de reducirla si es un problema de ruido, con el fin de minimizar el indicador “t CO₂ / t Producción”.

Los datos obtenidos serán procesados estadísticamente mediante el software Statgraphics (Statpoint Technologies, Inc. Warrenton, Virginia) para sacar conclusiones utilizando diseños “*Iner/Outer Arrays*” para determinar la combinación de factores controlables que reducen la sensibilidad a las fuentes de ruido incontrolables de variabilidad (Taguchi, 1990).

Los factores incontrolables son variaciones en las condiciones ambientales tales como la temperatura y la humedad. En este caso, estos pueden afectar el valor del indicador. Para minimizar los efectos de las fuentes de ruido, se utiliza una técnica de diseño de matrices combinadas, con los dos factores controlables e incontrolables.

3.8.- SISTEMA DE GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL Y CORPORATIVA

El sistema de gestión lleva implantado en la fábrica objeto de estudio desde antes del año 2001. El sistema de gestión registra los datos de los indicadores tanto medioambientales como de producción. Este sistema de gestión utiliza indicadores básicos de gestión diaria como la media diaria de fabricación de papel “t Producción”, el tiempo de inactividad de la máquina, tipo y duración de las averías de máquina así como tiempo empleado en mantenimiento correctivo.

El sistema de gestión implantado recoge también otros datos como la energía eléctrica y térmica (en forma de consumo de gas natural) que se utilizan para establecer ratios básicos como el relativo al uso de la energía tanto eléctrica como térmica, ambos en kWh, como “kWh /t Producción”, su coste “€/t Producción”, respectivamente.

Dichas ratios se revisan constantemente por la Dirección con el objetivo final de tener un conocimiento de los costes energético de referencia por unidad de producto fabricado. Las ratios se venían obteniendo como una relación directa entre la energía facturada de gas natural (kWh) por los proveedores en el periodo indicado y papel producido neto vendible en ese mismo periodo.

Es necesario tener en cuenta la consideración ya indicado que la fábrica bajo estudio tiene un único suministro de energía térmica en forma de gas natural, que se utiliza en una caldera para generar vapor utilizado exclusivamente en la sección secado.

Inicialmente en 2005, con la entrada en vigor del primer Protocolo de Kioto (Naciones Unidas, 1998) y el inicio del primer plan de asignación de derechos de emisión, las ratios conocidas fueron utilizadas por el personal de producción y gestión para la estimación de las emisiones de instalaciones y solicitar así mismo la asignación inicial gratuita de derechos de emisión.

En este momento en que se estableció inicialmente el indicador “t CO₂ / t Producción”. En esta primera aplicación el indicador sólo mostraba una relación construida con los datos históricos, que eran un resultado del cociente entre la energía térmica facturada (con la corrección a emisiones de CO₂) y las toneladas de papel producido con la humedad del 6%. Este indicador inicialmente no aporta valor sobre el control del proceso o para medir la eficiencia del mismo.

Desde entonces, y con la expectativa del segundo período de asignación gratuita de derechos de emisión, se utilizó el indicador mencionado para hacer una proyección de las necesidades de emisiones con el pronóstico, y servir como línea de base para la aplicación inicial de derechos de emisión el próximo período 2008-2012. Posteriormente a lo largo del segundo periodo ha demostrado ser útil y se ha desglosado en componentes sobre los cuáles es posible actuar.

El hecho de la no gratuidad de los derechos de emisión en el período 2008-2012, aunque la situación de los precios de compra fuese muy baja y no afectando en gran

medida al coste del producto final, hizo reconsiderar la importancia de este indicador en un futuro próximo.

Estudiando más en detalle el ciclo de la energía utilizada en la fabricación de papel, y sobre todo el uso de la energía térmica, Kong et al. (2013) identificaron que de todos los usos, la generación de vapor y la sección de secado son las áreas con mayor potencial de mejora y que por consiguiente se pueden tener un alto potencial de reducción de las emisiones de CO₂.

Los sistemas de gestión en general y la fábrica tomada como base para este estudio en particular, suelen tener una estructura en la que los indicadores empleados para la gestión de fábrica se fijan por la Dirección, principalmente basados en razones económicas y de gestión.

El despliegue de la recogida de información y control de dichos indicadores tiene varios niveles de acción:

El primer nivel de acción, generalmente en el que más transacciones de información se producen, compuesto por los operadores de fábrica. Este nivel se encarga generalmente de la recolección de los datos.

El segundo nivel de acción, revisa estos datos con una perspectiva temporal mayor, compuesto por técnicos y mandos intermedios. Este nivel se encarga frecuentemente de comprobar que los datos recogidos por el nivel anterior están dentro de las directrices establecidas.

El tercer nivel de acción, revisa los datos ya recopilados y pre-analizados, ven su evolución y plantean directrices a los niveles inferiores, compuesto por personal de dirección.

En el presente estudio se contará con la documentación generada en los procesos tanto de recopilación de información del primer nivel como los relativos al análisis y toma de decisiones de los otros dos niveles.

Con toda esta información, se podrán identificar indicadores auxiliares y analizar como la variación de estos indicadores auxiliares afecta al indicador propuesto “t CO₂/ t Producción”.

3.9.- DETERMINACIÓN DE LOS FLUJOS DE AIRE RELACIONADOS CON EL PROCESO DE SECADO

En este apartado se describen los métodos para la medida de la energía contenida en los flujos de aire, así como otras variables relativas a sus características (humedad, temperatura, etc.).

Como punto de partida del estudio, se identificarán las corrientes de aire significativas y que puedan tener afección tanto con el proceso de fabricación de papel como con los flujos internos de la propia campana de secado.

3.9.1.- Cálculo de los flujos de aire de la nave

En primer lugar debemos identificar los elementos y características significativas de la nave de producción, su dimensión, volumen, aberturas por donde entre y salga el aire (puertas, ventanas, aperturas del techo, etc.) distinguiendo entre los dos tipos de flujos respecto a la nave, los entrantes y los salientes debidos tanto a la convección o termosifón y a la extracción forzada.

Para determinar el flujo a través de las aberturas de la nave situadas en la parte superior debidos al efecto termosifón, se identifican las características de las aberturas inferiores por donde entra el aire y la altura relativa entre cada uno con el fin de calcular la presión diferencial (ΔP Pa) debido a la fusión térmica.

El efecto termosifón depende de la diferencia de densidad del aire, debido a las diferentes temperatura entre cada tipo de aire (el del interior más caliente y el del exterior más frío), y la diferencia de altura entre estas aberturas (h).

El efecto termosifón sigue la ecuación (3.6).

$$\Delta P = 35,98 \times \Delta h \times \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_h} \right) \quad (3.6)$$

El cálculo del flujo de aire a través de las aberturas, será calculado como en el caso teórico de una placa delgada con una sección A_x (m^2), el caudal Q (m^3/s) viene dada por la ecuación (3.7).

$$Q = 0,827 \times (A_1 \times A_2 \times \dots \times A_N) \times \left[\frac{\Delta P}{A_1^2 \times A_2^2 \times \dots \times A_N^2} \right]^{0,5} \quad (3.7)$$

Donde A_x corresponde a cada una de las aberturas de área $A_1 \dots A_N$.

Para determinar el flujo debido a la extracción forzada de aire de la nave, es necesario conocer de cada ventilador, las características de funcionamiento y el consumo eléctrico para calcular mediante las curvas características del ventilador el punto de trabajo y en consecuencia el flujo de aire saliente.

Mediremos las principales variables de las corrientes de aire, como su temperatura (T_i), la humedad relativa (HR). Utilizaremos el diagrama de Mollier (1929) para determinar el resto de las características de aire. El objetivo principal es determinar su entalpía (kJ/kg), que se utilizará como base de cálculo la energía añadida a esas corrientes y su origen, que corresponde principalmente a las pérdidas térmicas de la sección de secado y las necesidades de refrigeración de los accionamientos eléctricos y pérdidas en las conducciones eléctricas de los cables por efecto Joule.

La diferencia entre las entalpías de cada flujo de aire, obtenida mediante el diagrama de Mollier (1929), determinará la energía suministrada a cada una de las corrientes de aire en la nave de fabricación.

El proceso continuará con la identificación de las fuentes de calor de la instalación, que transmiten calor a las corrientes de aire. En nuestro caso, la fuente más importante de aporte de energía, lo constituyen principalmente las pérdidas de energía en el cerramiento de la campana de secado debido a los fallos de aislamiento y aperturas no deseadas debido a los fallos de ajuste de los paneles.

Para el cálculo de las pérdidas en los paneles de techo y cierre lateral de la campana, principalmente por medios de convección y radiación, se utilizan las fórmulas

de transferencia de calor tradicionales que han sido también contrastadas con el software AISLAM (2013), software específico desarrollado por Atecyr y Universidad Politécnica de Valencia para el cálculo de pérdidas por aislamiento, recomendado, utilizado y distribuido por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) dependiente del Ministerio de Industria, Energía y Turismo de España.

3.9.2.- Cálculo de las emisiones de CO₂ asociadas a las pérdidas de energía

Para calcular la energía añadida a las corrientes de aire, tomaremos en cuenta la entalpía del aire a la entrada de la sala de producción, con sus características específicas de temperatura (T_i) y humedad relativa (H_r) y la entalpía del aire en cada uno de las salidas de ellas con sus características de temperatura (T_h) y humedad relativa (H_r). La diferencia entre la entalpía de entrada y de salida corresponde a la energía añadida, debido principalmente a las pérdidas de energía, ya que la nave de fabricación no dispone de acondicionadores de aire ni sistema de calefacción.

Los datos utilizados en el estudio se han compilado con una frecuencia adecuada y siguiendo la metodología indicada en el apartado “3.4- *Determinación de los datos históricos de producción*”. Las emisiones de CO₂ asociadas a la energía añadida a estos flujos de aire se calcularán siguiendo la metodología indicada en el apartado “3.3- *Determinación de las emisiones de CO₂*”, calculándose los primero como *DA* o dato de actividad los TJ de energía proporcionada a los flujos de aire caliente y que se extraen tanto forzosamente por los extractores y ventiladores como por el efecto termosifón debido a las aberturas de la nave de producción.

Estas pérdidas calculadas de energía y emisiones de CO₂ procedentes del aire de salida de la nave de fabricación, se compararan con el indicador establecido definido en esta Tesis "t CO₂ / t Producción" para determinar la relevancia que tienen las pérdidas de energía de los flujos de aire en relación con el indicador general definido.

En este caso se compararan las emisiones asociadas a la producción media anual de papel, en funcionamiento normal, con las emisiones asociadas con el calentamiento del aire de extracción de la nave en el mismo período.

3.10.- EQUIPOS UTILIZADOS

La máquina de papel sobre la que se hace el estudio tiene un ancho útil de producción de papel de 2 metros y una capacidad de producción teórica de 55.000 toneladas año. Emplea como materia prima papel 100% reciclado y produce papel denominado cartón sin estucar.

El rango de gramajes está comprendido entre 150 y 650 g/m² con un rango de velocidades de máquina para la producción de estos papeles entre 1,33 m/s para los papeles de más gramaje y de 4,16 m/s (en la planta la unidad habitual de medida de la velocidad son los m/min para no utilizar decimales, desde 80 a 240 m/min) correspondientes a los de menor gramaje. Esta elevada variabilidad en los tipos de papel producido y amplio rango de gramajes para cada tipo de papel, que no es habitual encontrar en la fabricación de papel, servirá para poder analizar los datos en una gran cantidad de configuraciones distinta.

La máquina está compuesta por:

- Mesa de fabricación tipo *fourdrinier*.
- Sección de prensas, compuesta por cuatro prensas.
- Sección de secado compuesta por una campana cerrada que aísla el exterior del interior, donde se sitúan 5 baterías divididas en 5 grupos térmicos de regulación.
- Sección de terminación o lisa.
- Enrolladora denominada Pope, donde se obtiene la bobina madre o jumbo.
- El papel producido se corta en una bobinadora y se coloca en palet según las especificaciones del cliente.

El sistema responsable en esta fábrica del 100% de las emisiones directas de CO₂ sometidas al ETS lo constituye la sección de secado. Como hemos comentado está compuesta por 5 baterías con regulación independiente de la presión de vapor en cinco grupos térmicos, un sistema de recirculación de aire y un sistema de extracción de vahos.

La instrumentación de control de la máquina y con la que se va a contar para el estudio está basada en autómatas con hardware BECKHOFF, con un software para Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA) WONDERWARE (Inversys Systems, Inc., Boston, EE. UU.). Está compuesto por un Sistema de Control de Calidad y de Proceso de nueva generación "SMARTCONTROL", cuyas prestaciones han sido mejoradas llegando a velocidades de procesador inferiores a 1 milisegundo. En la Figura 3.4. puede verse la información en tiempo real mostrada. Frecuencia adecuada para observar las variaciones con suficiente precisión y teniendo en cuenta la inercia del sistema.

El sistema de fabricación de papel sigue una rutina bien establecida y los cambios en el proceso no se producen de manera inmediata. El sistema registra constantemente las variables del proceso y genera un informe automático cada vez que se produce una bobina madre.

La frecuencia con la que se registra la información está adaptado para este proceso en concreto. Una tasa de registro más rápido y diferente del denominado "tack-time" de la máquina se traduciría en una mayor cantidad de datos, que no proporcionaría información relevante y haría más difícil su análisis. Actualmente cada bobina madre identifica que orden de producción se está realizando y las características de calidad requeridas para la misma. La bobina madre posteriormente se corta en la sección de bobinado y se envasa de acuerdo a los requerimientos del cliente.

El SCADA está equipado con:

Sensores OPTRIS CT-LT y MCT-360, para la medida de humedad con tecnología de infrarrojos y temperatura del papel a la entrada de la sección de secado, una imagen se puede ver en la Figura 3.5.

Sensores Endress+Hausser TT RTD Pt100 para medir temperatura en diversos puntos de máquina, Figura 3.6.a.

Sensores Endress+Hausser PT EL 2610 para medir Presión en diversos puntos de máquina.

Mide la temperatura y humedad del papel a la salida de la sección de secado mediante un sensor Scampro DS-30 con tecnología de infrarrojos, que emplea una unidad Scampro SA-150 para procesar la señal y un transmisor de temperatura OPTRIS CT-LT, una imagen del sistema se puede ver en la Figura 3.7.

Dispone para medir los diversos parámetros relacionados con el suministro de vapor, de un caudalímetro Spirax Sarco FM Giflo ILVA DN150 que incorpora para la medida de energía un procesador de señal M280 al que se le incorpora compensación de presión y temperatura. Con este sistema se determinan S_f , S_t , S_p , C_t y C_p , Figura 3.6.b, Figura 3.8. y Figura 3.9.

Para medir las características del flujo de aire de extracción de campana (denominados extracción de vahos) dispone de un termo-higrómetro Spirax Sarco mediante el que se determinan la temperatura y humedad del aire extraído y los siguientes parámetros Eat , Eam , Ebt y Ebm .

Se dispone para la medida de caudales de agua en caldera de sensores Siemens Sitrans FM de diámetro DN 150 para alimentación de caldera y DN 50 para purgas y otros caudales.

El Sistema cuenta con un sistema de medida de energía consumida por el quemador de caldera compuesta por una turbina Elster TRZ2 tamaño G-250 y un conversor volumétrico con compensación de presión y temperatura Elster EK-230.

La información de producción la recoge el SCADA a nivel de bobina. Calcula el peso mediante un sensor integrado que mide en continuo longitudinal y transversalmente el gramaje del papel, un sensor que mide en continuo longitudinal y transversalmente la humedad del papel y sendos *encoders* que determinan la anchura de la hoja y la velocidad de producción.

En la Figura 3.4. se puede ver la monitorización en continuo de las siguientes variables:

- Variables de proceso generales: Pd and Ms .

- Condiciones del papel a la entrada de la sección de secado: W_t , P_{ti} and P_{mi} .
- Condiciones del papel en la sección de secado: S_f , S_t , S_p , C_t , C_p , E_{at} , E_{am} , E_{bt} and E_{bm} .
- Condiciones del papel a la salida de la sección de secado: P_{to} and P_{mo} .

Los valores de las variables se toman instantáneamente y son utilizados por el QCS para ajustar la velocidad de la máquina M_s y obtener el papel a la salida de la sección de secado con la humedad de papel (P_{mo}) requerida por el cliente. Si aumenta P_{mo} , M_s se reduce para mantener el papel más tiempo dentro de la sección de secado. Si P_{mo} disminuye, M_s aumenta para mantener el papel menos tiempo en la sección de secado. Cuanto más tiempo está el papel en la sección de secado, más cantidad de agua se evapora del papel. Por lo tanto, los principales parámetros para ajustar son P_{mo} y la M_s . M_s tiene limitación mecánica que no se alcanza en los papeles denominados finos, en las que la densidad superficial llega a 150 g/m^2 . Por esta razón, la sección de secado es el cuello de botella en el proceso.

Los datos de producción instantáneos y acumulados se recoge continuamente por el sistema SCADA que calcula la densidad superficial del papel mediante un sensor KR-NER-8170 equipado con una fuente radiactiva de krypton 85 para la medida del gramaje del papel. El SCADA cuenta con otros sensores que miden continuamente el contenido de humedad del papel P_{mo} , la longitud y la anchura de la hoja (P_{wi}). Con estos datos y la velocidad de máquina (M_s), se determina la producción de papel. Las Figuras 3.1 y 3.4. incluyen ejemplos de la información recogida por el SCADA y un ejemplo de los datos extraídos del sistema de la producción mínima controlable, que es la bobina madre y cuya duración es inferior a una hora. En la Figura 3.7. puede verse en detalle el sistema mecánico que aloja los sensores que miden las características longitudinales y transversales de la hoja de papel producido.

La información obtenida será tratada estadísticamente mediante el software Statgraphics (Statistical Graphics Corp. Statpoint Technologies, Inc. Warrenton, Virginia) para extraer las conclusiones del estudio.

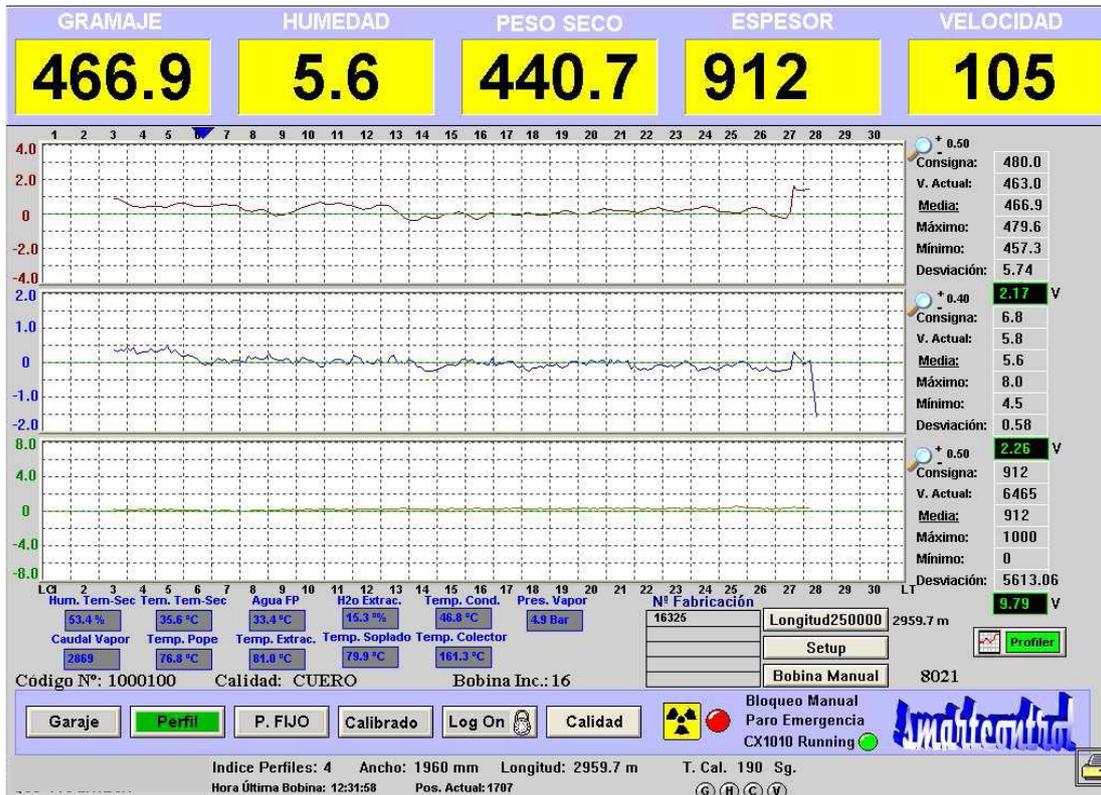


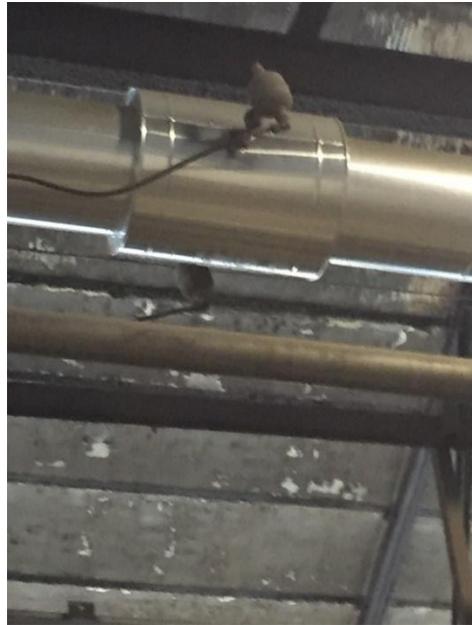
Figura 3.4. Ejemplo de los datos recogidos por el QCS.



Figura 3.5. Medición de humedad (P_{mi}) y temperatura (P_{ti}) del papel recogidos por el QCS.



(a)



(b)

Figura 3.6. Control de temperatura (P_{ti}) y caudal vapor (S_f) recogidos por el QCS.



Figura 3.7. Medición de densidad superficial (Pd), humedad (Pmo) y temperatura (Pto) del papel recogidos por el QCS.



Figura 3.8. Medición de las características del retorno de condensados (C_t, C_p) recogidos por el QCS.



Figura 3.9. Medición de las características del vapor (S_f, S_t, S_p) recogidos por el QCS y sistema de distribución y regulación de vapor.

La Figura 3.4. muestra un ejemplo de los datos obtenidos por el QCS, en este caso el valor de los parámetros establecidos y las variables listadas en la Figura 3.1. Los valores corresponden a la media de cada uno de ellos para la bobina madre producida por la máquina de papel en la sección de la enrolladora pope previa a su traslado a bobinadora para ser cortada según las especificaciones del cliente y que son necesarios para el cálculo de “Dato de Actividad” de la Eq (3.1), y la producción neta vendible de la actividad necesarias para establecer el valor del indicador en este periodo. El establecimiento de un conjunto de parámetros de control puede hacer aumentar la capacidad de evaporación de agua de la sección de secado, por consecuencia la producción en el cuello de botella del proceso de fabricación de papel, manteniendo los requisitos de tipo de papel establecidos por los clientes

Utilizamos también para la determinación para medir la velocidad del flujo de aire en áreas abiertas, ventanas y aberturas en el techo un anemómetro AMR Almemo, tipo 2590-3S, SN- H09030308 equipado con sensor Hontzch HFA, tipo ZS25GA-mn40 / 140 / p6, SN- mn40 8555.

Se utiliza para medir la humedad del aire un termo higrómetro Almemo, Tipo 2090-1, SN- H02111196K + 18 con termopar K.

La presión atmosférica se determina por un manómetro digital COMARK, modelo C9553, SN-71458/15.

La temperatura externa de los paneles de la campana de secado se determina con un termómetro digital AMR AHLBORN Almemo, tipo 2390-3, SN H06060337.

Con una cámara de imagen térmica FLIR E60, SN 49000146 se obtienen las imágenes térmicas de la campana de secado. La cámara y sus imágenes térmicas se han utilizado para determinar la temperatura del exterior en cada una de las áreas de los paneles que forman la campana, para estimar las pérdidas de energía debidas a conducción, convección por métodos convencionales que son transferidos al flujo de aire. Este método se utiliza para validar el método introducido en la Tesis de análisis de los flujos de aire con sistema tradicional basada en el cálculo de la energía que se pierde por conducción entre los paneles exteriores de la campana y el aire circulante.

Estas imágenes también serán utilizadas para encontrar las áreas de mayor pérdida térmica, con lo que se podrán identificar las prioridades para la reparación y obtener una reducción en el consumo de energía.

3.11.- CONSIDERACIONES FINALES

Teniendo en cuenta los requisitos especiales del proceso a investigar en la Tesis, que se han puesto de manifiesto en la sección 2.7 *Consideraciones finales* por lo especial del proceso y teniendo en cuenta los medios disponibles para llevar a cabo un estudio en profundidad del proceso respecto al indicador considerado “t CO₂ / t Producción” a lo largo de este Capítulo, podemos concluir que los medios de recogida de datos son adecuados para poder establecer con garantías el indicador objeto de estudio en la Tesis.

En el Capítulo 4 se describe en detalle el proceso de fabricación de papel. Si nos centramos en concreto en la sección de secado, se puede observar que las variables significativas del proceso se han tenido en cuenta a la hora de tomar los datos del sistema.

Se ha comprobado que el estado de revisión y mantenimiento de los equipos de medida se realiza conforme a las normas establecidas en el sistema de gestión implantado en la fábrica objeto de estudio. En la fábrica el EMS y el CMS establecen una frecuencia de comprobación de los equipos de medida por parte de un laboratorio externo con una frecuencia máximo anual. En concreto el SCADA y la instrumentación asociada al mismo se revisan y ajusta en caso necesario con una periodicidad semestral por parte del fabricante y cada hora se contrastan las medidas con el laboratorio de fábrica.

La frecuencia de muestreo es adecuada y mucho más rápida que el proceso a controlar, y el estado de mantenimiento de los equipos de medida nos permitirá registrar los valores de las variables y poder construir el indicador de manera que pueda servir en un futuro para la toma de decisiones del proceso de producción, uno de los objetivos de la presente Tesis.

CAPÍTULO 4. EL PROCESO DE FABRICACIÓN DEL PAPEL

La fábrica de papel objeto de estudio tiene un ancho útil de producción de papel de 2000 mm y una capacidad teórica de producción de 55.000 toneladas con la humedad del 6% al año de papel denominado cartón sin estucar (*Uncoated Carton Board*).

El papel fabricado tiene un rango de gramajes de 150 a 650 g/m². Hay que tener en cuenta que en el sector de fabricación de papel se utiliza la densidad superficial de acuerdo a lo establecido por la norma ISO 536 (2012), que es la referencia utilizada internacionalmente por el sector.

La máquina utilizada para producir estos papeles opera a velocidad variable entre 1,33 m/s (80 m/min) para los gramajes más altos y 4,17 m/s (250 m/min) para los gramajes más bajos.

La instalación fabrica papel a partir de materia prima 100% reciclada proveniente de la recogida selectiva de cartón tanto domestica (contenedor azul) como industrial. La materia prima tiene bastantes impurezas o elementos no deseados denominados impropios. El proceso es el siguiente:

4.1.- FASES DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DEL PAPEL

La fabricación de papel puede dividirse en cuatro fases principales;

4.1.1.- Preparación de pasta

El proceso comienza con la desintegración del papel reciclado en una máquina denominada pulper para obtener pasta de papel con las impurezas.

En esta primera etapa la pasta se depura para eliminarle los impropios de gran tamaño (botes, plásticos, metales, madera, etc.).

Para favorecer el proceso de desintegración de las fibras se añade agua para obtener una masa de fibras en suspensión lo más homogénea posible con una consistencia del 8% aproximadamente.

En esta sección se añaden también a la solución fibrosa aditivos químicos que le confieren a la suspensión las características específicas para el proceso posterior.

En una segunda fase, la pasta pasa por una etapa de depuración donde se eliminan las partículas de pequeño tamaño que quedan en suspensión (plásticos, corchos, grapas, etc.). Se le realiza una primera regulación de consistencia al 4% y se almacena en unos depósitos para su uso en la máquina de papel.

La pasta posteriormente se distribuye en una máquina, en la que comienza el proceso de eliminación controlada de agua. La máquina consta de varias secciones en función del método de eliminación de agua empleado.

4.1.2.- Formación de la hoja

En esta sección se acaba de acondicionar la pasta de papel y se le añaden los aditivos necesarios para que tenga las características requeridas para el tipo de papel a fabricar. Posteriormente se forma la hoja utilizando diferentes tecnologías. El proceso habitual simplificado consiste en depositar la pasta lo más uniformemente posible en una tela sinfín donde se le elimina el agua en primer lugar por gravedad el agua y luego por medio de la aplicación de vacío.

Mesa forudrinier, en el que se deposita la pasta una vez acondicionada con una consistencia aproximada del 99% (es decir el 99% de agua y el 1% de fibras de papel) sobre una tela porosa en el que se va eliminando el agua de manera paulatina y se empieza a formar la hoja de papel.

Inicialmente el agua se elimina por gravedad natural para posteriormente aplicarle un vacío progresivo. En esta sección, la sequedad final esta entrono al 25-30%. La hoja de papel formada tiene suficiente consistencia como para ser arrastrada a la sección siguiente.

Cuando por vacío no se puede (o no es rentable) eliminar más agua, comienza un prensado mecánico progresivo por el que se elimina el agua hasta obtener una sequedad entorno al 52%.

4.1.3.- Sección de secado del papel

En la sección de secado el agua que queda en la hoja de papel (con un contenido de humedad de alrededor del 52%) y se elimina mediante procesos térmicos para producir papel con una sequedad final del 6%.

La sección de secado, está compuesta, para la fabricación de este tipo de papel, por una serie de cilindros secadores de gran diámetro calentados interiormente mediante vapor, en la que la hoja va entrando en contacto alternativamente por sus dos caras con los cilindros secadores, elevándose su temperatura hasta unos 85°C para eliminarle la humedad hasta obtener papel al 6 – 6,5% indicado anteriormente.

Eventualmente el proceso puede tener una sección de acabado: alisado y/o calandrado para darle unas características superficiales especiales. En esta sección no hay cambio en los niveles de humedad de papel

4.1.4.- Sección de terminación y embalado

Los rollos de papel pasan en última instancia por la bobinadora para cortarlos a la medida solicitada por el cliente y embalarlos para su posterior expedición.

De las diversas secciones con las que cuenta la máquina de papel, la sección de secado constituye en la mayoría de los casos el factor limitante o cuello de botella de la instalación. Debido tanto a sus características como a sus dimensiones, la necesidad de estar aislada térmicamente del exterior y con una atmosfera controlada, hacen que la inversión en ampliar sección de secado sea muy costosa y generalmente es la parte de máquina que primero llega al límite y condiciona la capacidad de producción.

El número de secadores y la capacidad de evaporación del sistema de secado y la necesidad de obtener un papel con una sequedad del 6 – 6,5% al final condicionan la velocidad de la máquina. El parámetro de regulación principal es la velocidad, que se va modificando continuamente para obtener el papel con la humedad deseada.

4.2.- ASPECTOS OPERATIVOS DE LA SECCIÓN DE SECADO

La sección de secado es la parte del proceso de fabricación de papel en el que se elimina el agua de la hoja por medios térmicos, y donde se centra nuestro estudio.

La sección de secado analizada, está compuesta por 38 cilindros de secado que se calientan internamente con el vapor procedente de la caldera o generador de vapor. La energía contenida en el vapor se transfiere a la superficie del cilindro y de esta por contacto a la hoja de papel. El proceso de secado comienza cuando la hoja húmeda de papel entra en contacto con los cilindros de secadores y se calienta paulatinamente. Este calentamiento de la hoja de papel y el agua contenida en el mismo hace que el agua se evapore y la hoja se seque.

La eliminación del agua de la hoja se hace por evaporación a menor temperatura que la de ebullición del agua, máxima a 85°C. La evaporación se produce transfiriendo humedad al aire circulante en unas condiciones especiales, este hecho implica el uso de un sistema de ventilación que controla las variables asociadas con la circulación de aire dentro de la campana.

Entre los sistemas de control de aire de la campana, está el sistema de recuperación de calor que precalienta el aire exterior para introducirlo nuevamente a la campana a temperatura lo más altas posible y que asegura una disminución notable en el uso de la energía necesaria para el secado del papel. La recuperación de la energía para calentar el aire de compensación de la campana afecta directamente al consumo de energía y a las emisiones de CO₂ del proceso.

Otros parámetros importantes en el proceso de secado lo constituye la presión del vapor en el interior de los cilindros secadores, que en el caso del vapor saturado tiene una relación directa con su temperatura. Frecuentemente los cilindros secadores se

agrupan en tres o más grupos térmicos que permite ajustar la presión en cada una de las secciones con el objetivo de producir un calentamiento progresivo del papel que maximice la evaporación y minimice los costes energéticos del proceso.

Las condiciones tanto de regulación de la presión de vapor en cada una de las secciones térmicas, como de los parámetros del aire en el interior campana de secado, afectan a la capacidad de evaporación del sistema de secado, a la velocidad del proceso y por consiguiente a la producción real de la máquina.

Los parámetro de producción, establecidos voluntariamente o limitados por las condiciones de mantenimiento y el estado de la máquina, determinan la diferencia entre la capacidad teórica de producción y la realmente obtenida.

A parte de las pérdidas de producción, conducen a producir consumos energéticos superiores a los inicialmente establecidos, que afectan al indicador "t CO₂ / t Producción" y consecuentemente a las emisiones de CO₂.

Como se ha observado en la sección "3.6- *Determinación de la influencia del tipo de papel en las emisiones de CO₂*", la producción en la fábrica objeto de estudio varía significativamente en función de dos parámetros, el tipo de producto fabricado (*Pg*) y el gramaje del mismo, como puede observarse en las Figuras "3.2. *Producciones por gramaje para la calidad COA*" y "3.3. *Producciones por gramaje para la calidad CIA*". Este hecho sin embargo, no se traduce en una diferencia clara en el consumo de energía necesario para secar el papel, aunque sí influye en las características específicas del control del proceso.

4.2.1.- Sistema de agua fría añadida al circuito de la caldera

En la sección de secado se calienta la hoja de papel para eliminar el agua por medios térmicos. La energía se suministra con el vapor generado en la caldera. Cuando el calor latente del vapor se transfiere para calentar la hoja de papel, el vapor se condensa en agua, que también se conoce como "condensado". La fábrica tiene un circuito cerrado para recuperar la mayor cantidad de condensado generado en la sección de secado.

La mayor parte de este condensado también se utiliza para calentar aire soplado a la campana de secado antes de que sea conducido al tanque nodriza de alimentación de la caldera para ser convertido nuevamente en vapor.

Aunque idealmente el circuito es cerrado y se recupera el 100% del vapor condensado en el proceso de secado, hay una fracción que no se puede recuperar debido a pérdidas en la instalación como fugas de vapor, etc.

El tanque nodriza de alimentación (en adelante tanque nodriza) de la caldera es el punto en el que se mezcla el agua fría de reposición al circuito debido a las pérdidas en la instalación y purgas de caldera, y el agua caliente constituida por el retorno de condensado de la máquina de papel.

El tanque nodriza proporciona una reserva de agua suficiente para cubrir la eventual interrupción del suministro de agua fría. Este tanque también debe tener capacidad suficiente por encima de su nivel normal de trabajo para dar cabida a las posibles variaciones del caudal de retorno de condensado de la sección de secado.

El vapor antes de llegar a los cilindros secadores, pasa por varios elementos como;

Válvulas de regulación para ajustar la temperatura del secador.

Juntas rotativas que introducen el vapor en el cilindro secador.

Sistema de extracción de condensados del propio secador que lo vuelve a sacar a través de una junta giratoria al circuito de condensados.

Depósitos intermedios de regulación y expansión donde se vuelve a re-vaporizar parte del condensado a menor presión.

Intercambiadores de calor agua aire para el soplado.

Bombas de conducción de los condensados.

El propio tanque nodriza de alimentación.

El agua de retorno de condensado es un agua de muy buena calidad por ser caliente y con muy poca o casi nula conductividad por estar libre de sustancias disueltas.

El agua de condensado es muy importante también económicamente por estar a temperatura muy elevada respecto al agua fresca de alimentación y tener menos salto térmico respecto a la temperatura de producción de vapor.

En realidad, es casi imposible recuperar todo el condensado debido a las pérdidas de la instalación por los elementos indicados anteriormente, a lo que hay que añadir las pérdidas por las propias purgas de la caldera o generador de vapor.

Una tasa de retorno de condensado muy alta o anormal puede ocurrir en el proceso de arranque de la sección de secado o después de una rotura de papel, ya sea en la sección de secado o por otras causas. En estos periodos pueden provocar la pérdida de condensados a través del sistema de desbordamiento del propio tanque nodriza.

4.2.2.- Control de temperatura del aire soplado a campana

La evaporación del agua contenida en la hoja de papel, se realiza a temperatura inferior a la de ebullición del agua. La temperatura del papel y el agua (P_{mo}) que contiene a la salida de la sección de secado está en torno a los 80°C (P_{to}). La evaporación se produce por transferencia de humedad al aire circulante.

La campana de aislamiento de la sección de secado objeto de estudio, cuenta con dos extractores de aire caliente desde el interior de la campana hacia el exterior (E_{at} , E_{am}), y un ventilador que sopla aire caliente (E_{bt} , E_{bm}) para compensar el aire extraído.

El flujo de aire introducido en la campana pasa a través de una serie de intercambiadores de calor que aprovechan la energía calorífica contenida en diversos flujos extraídos de campana como son la corriente de aire de extracción (E_{at}), el vapor flash generado en el tanque de recogida de condensado del último grupo térmico y por

último el calor contenido en el agua de retorno de condensados (*Crt*) que vuelve al tanque nodriza de alimentación a caldera.

El calor necesario para el proceso de secado del papel consta de:

El calor absorbido por la hoja de papel y el agua para incrementar su temperatura desde la entrada de la sección de *Pti* a *Pto* y la necesaria para evaporar la humedad desde *Pmi* a *Pmo* que corresponde al calor de vaporización del agua.

En la Figura 4.1 se puede ver esquemáticamente el proceso de fabricación de papel, en el que se indican explícitamente los flujos de energía desde y hacia la campana de secado del papel.

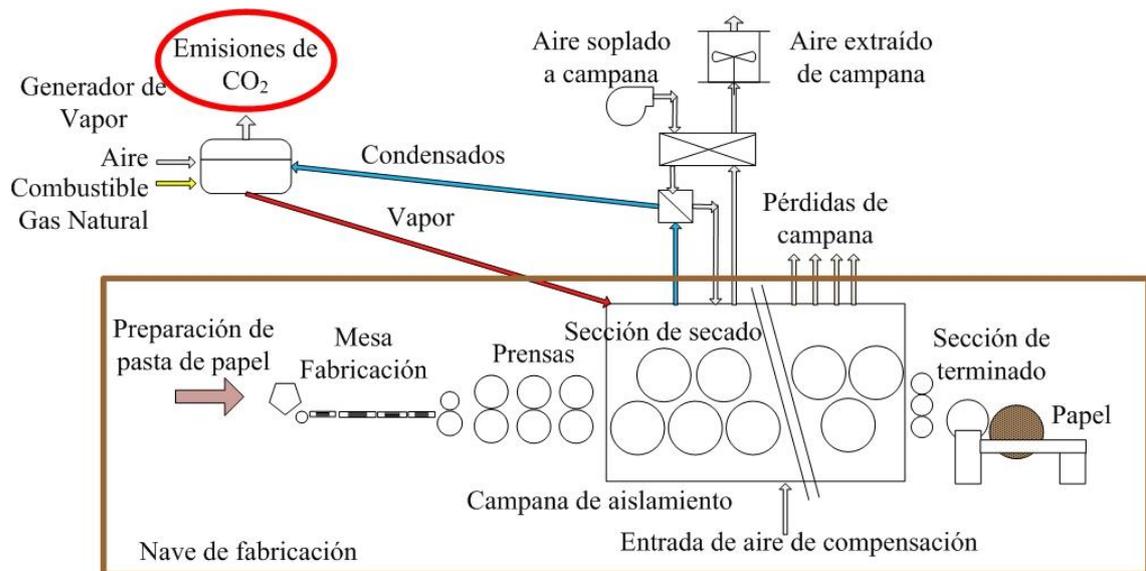


Figura 4.1. Diagrama del proceso.

4.2.3.- Control de temperatura y humedad del aire del interior de campana

En el apartado “2.6.2.- Influencia del Mantenimiento en las emisiones de CO₂”, uno de los aspectos más importantes energéticamente hablando lo constituye las características del aire circulante en el interior de la campana de secado. El secado del papel se produce por transferencia de humedad desde el papel hacia el medio circundante compuesto por aire.

Una variable fundamental en el sistema de control de campana según, Laurijssen et al. (2010) lo constituye el punto de rocío o “*Dew point*” (*Dp*), que es el punto en el que el aire en el interior de la campana se satura y la humedad contenida en el aire condensa. El aire caliente puede contener mucha más cantidad de agua que el aire frío. El “*Dew point*” indica a que temperatura empezaría a condensar el agua contenida en el aire y se precipita tanto sobre el papel como sobre la propia maquinaria.

Para evitar la salida de aire caliente y húmedo desde el interior de la campana a la nave de fabricación, donde están tanto los operarios como los diversos sistemas auxiliares, la campana de secado se hace trabajar en depresión. El caudal de aire extraído es superior al soplado de compensación. Este hecho hace que se produzcan corrientes de aire a baja temperatura desde el exterior al interior de la misma. Las faltas de estanqueidad de la campana de secado provocan este tipo de insumos de aire. La mezcla localizada de una corriente de aire fría con el aire caliente más húmedo puede provocar condensaciones localizadas muy perjudiciales tanto para el proceso de secado como para la eficiencia del mismo.

Uno de los parámetros de funcionamiento consiste en mantener constante la temperatura del aire en el interior de la campana y controlar que la mezcla de las corrientes de aire principales de soplado y la de los insumos de aire provenientes de las aberturas por falta de ajuste del sistema de cierre y fallos de aislamiento. La temperatura debe permanecer siempre por encima del punto de rocío para que no se produzca condensación de agua en el interior de la campana.

Teniendo en cuenta que la temperatura de extracción es prácticamente constante situándose entre los 92 y 95°C, independientemente de la temperatura de soplado pone de manifiesto la importancia de la recuperación de calor. Cuanto más deficiente o peor mantenido este el sistema de precalentamiento y el de aislamiento para evitar insumos,

mayor cantidad de aire habrá que calentar por medio del vapor suministrado a los cilindros secadores.

Hay una relación entre el punto de rocío y la cantidad de vapor de agua puede contener el aire de la campana lo que implica que a mayor punto de rocío menor cantidad de aire necesario para eliminar la misma cantidad de agua del ambiente.

Otra relación importante viene por la energía contenida en el aire extraído. En los intercambiadores de calor aire-aire empleados para precalentar el aire soplado, el principal aporte energético lo constituye la condensación del agua contenida en el aire de extracción. A mayor cantidad de humedad contenida más fácil será de recuperar.

Laurijssen et al. (2010) establecieron que el aumento del punto de rocío en el interior de la campana puede hacer reducir el uso de energía necesaria para el secado del papel de manera significativa.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

5.1.- INTRODUCCIÓN

Para comenzar el estudio, se realiza un análisis previo de los datos para comprobar la posible incidencia de los parámetros indicados en el apartado “3.2 *Metodología del estudio del caso*”, realizando un análisis básico de los principales parámetros y variables para ver su correlación con el indicador considerado y objeto de estudio. Se analizan los registros correspondientes a los informes diarios de producción de los años 2009 hasta diciembre de 2013 que contienen dicha información.

El estudio general se inicia con los datos de 30 meses, correspondientes al periodo 2009, 2010 y primer semestre del 2011 por considerarse un periodo representativo de producción en los que no han cambiado las condiciones de máquina ni se han realizado reformas que le cambien significativamente las características de la máquina. De la misma manera se lleva a cabo el estudio de detalle en base en los datos recopilados con los registros horarios de la producción durante el año 2012. Este periodo también se considera representativo.

Se han recopilado datos diarios de la producción neta vendible, producción total diaria que incluye los rechazos internos, los tiempos que la máquina ha estado fuera de servicio (*Tfs*) necesarios para determinar la disponibilidad siguiendo la metodología explicada en el apartado “3.5- *Determinación de la disponibilidad de máquina*”.

Para la obtención de las emisiones se ha recopilado información de los consumos diarios de energía en el proceso de secado y se ha obtenido el valor del indicador siguiendo las pautas establecidas para la definición del indicador, Se ha comprobado que su valor es correcto y coincide con los datos de emisiones de GEI declarados por la empresa para lo cual se ha seguido la metodología indicada en el apartado “3.3- *Determinación de las emisiones de CO₂*”.

Para facilitar el análisis de los datos y la posterior interpretación, se emplearán gráficos donde se evidencian de manera clara la variación del indicador con cada uno de los aspectos que puedan afectarle.

5.2.- VARIACIÓN DEL INDICADOR, ANÁLISIS PREVIO

En una primera aproximación analizaremos la variación mensual del indicador propuesto partiendo de los datos de medias mensuales. Consideraremos en primer lugar la variación del indicador respecto a la disponibilidad global de máquina, sin considerar la productividad y calidad. Analizaremos dicha información comparando los datos de cada año, obteniendo los resultados del Figura 5.1 Donde se observa que el comportamiento de la disponibilidad de máquina y el indicador seleccionado tiene un comportamiento similar para las series de datos de los años 2009 a 2011 y graficado hasta 2013. Se observa que a mayor disponibilidad mensual, la media mensual del indicador es menor que en los periodos con disponibilidad baja.

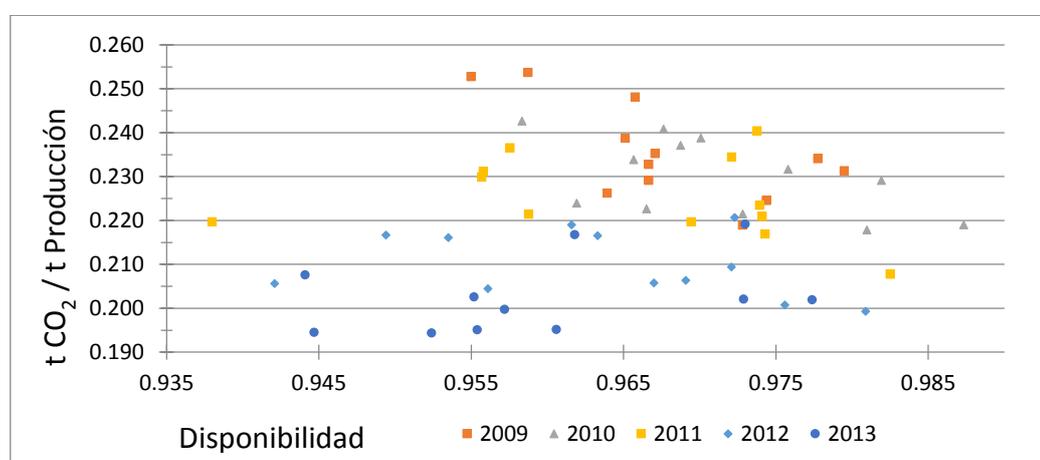


Figura 5.1. Disponibilidad por años – “t CO₂/ t Producción”.

En la Figura 5.2 también para las series de datos de los años 2009 a 2013. Se observa la variación del indicador en todos los años con el número de días de parada sin considerar en este caso la duración de las mismas. Se observa también que no hay diferencia apreciable entre los tres años analizados y la correlación entre las horas de paro mensuales y el indicador es similar en los tres años considerados. A mayor número de horas de paro mayor es el valor del indicador.

En este caso, las horas de paro pueden provenir de una sola parada de larga duración o de la suma de los tiempos debidos a varias paradas pequeñas.

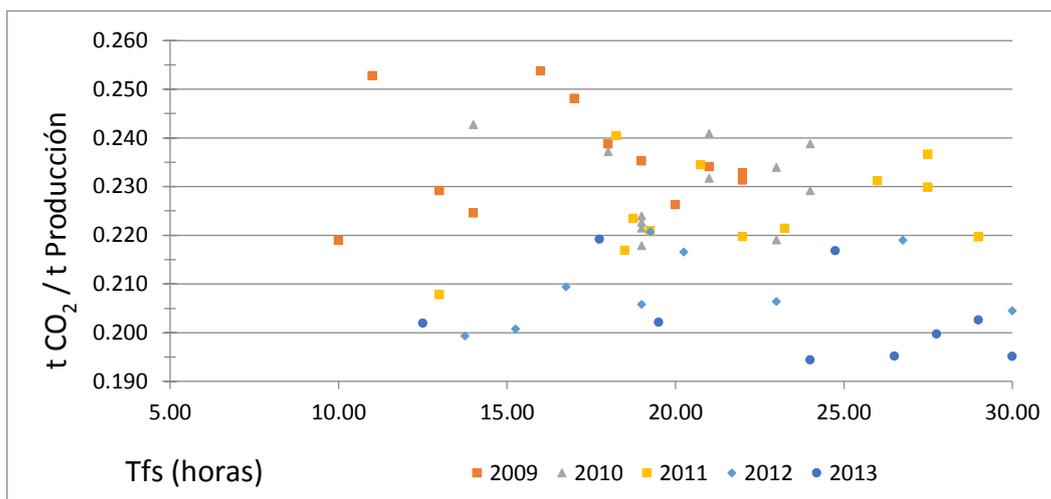


Figura 5.2. Tfs (horas) paro por años – “t CO₂/ t Producción”.

Para analizar la información de la variación del indicador (en media mensual) se construye la Tabla 5.1 en la que se considera primeramente el indicador “t CO₂ / t Producción” considerando los datos globales del mes (producción, disponibilidad y emisiones) y se repite el cálculo para el mismo mes considerando únicamente los días del mes en los que la disponibilidad ha sido menor al 100% o a 1 haciéndolo relativo a la unidad como disponibilidad plena y atendiendo a la fórmula indicada en el apartado “3.5- Determinación de la disponibilidad de máquina”, calculándose nuevamente el indicador “t CO₂ / t Producción”. La información mensual recopilada en la Tabla 5.1 incluye en columnas y para cada mes la siguiente información:

Año MES: periodo mensual considerado.

Número días producción: (Tt) número de días de producción en el mes.

Número Días 100%: número de días sin ninguna parada de producción. Estos son los días en los que $Tt = Tp$, indicado en días.

Tfs: tiempo fuera de servicio, definido en la ecuación 3.5.

Disponibilidad: disponibilidad media mensual de máquina.

Número de Paradas: número de días con parada en el periodo considerado.

Duración Media: indica la duración media de las paradas expresada en horas.

t CO₂ / t Producción mensual: corresponde al valor que toma el indicador en el periodo considerado, media mensual del indicador.

t CO₂ / t Producción no 100: corresponde al valor que toma el indicador en los días en los que la disponibilidad <100 y que corresponde a los días donde $T_p < T_t$.

% Incremento: porcentaje de incremento del indicador en días de disponibilidad <100.

Se recopilan los datos de las medias mensuales en vez de diarias por considerar que el periodo mensual es más representativo respecto a la producción que los periodos diarios y que incluyen ciclos de producción comparables. El ciclo de producción en cualquiera de los casos oscila entre 14 y 21 días dependiendo de la demanda del mercado.

En la Tabla 5.1 se observa que en todos los casos, excepto en enero de 2010, la media del indicador “t CO₂ / t Producción” en los días de disponibilidad inferior al 100% es superior a la media mensual general de dicho indicador. Este hecho confirma a priori que la disponibilidad de máquina está relacionada con el valor del indicador considerado.

Hay que resaltar el caso especial de enero de 2010 en el que el valor del indicador es menor en los días con disponibilidad menor que en la media mensual, no se puede justificar actualmente. El indicador tiene también variación previsiblemente, aparte de con la disponibilidad, con la productividad y el tipo de papel que se analizarán posteriormente, lo que puede justificar este valor.

Analizando la información de forma gráfica intentaremos ver la relación por separado de cada una de estas variables con el indicador considerado. La Figura 5.3, duración media de la parada para las series de datos de los años 2009 a 2013 – Indicador, analiza la variación del indicador con las horas de duración media de la parada en el mes.

En este último caso se observa una débil correlación entre ambos que no se puede tomar como valor concluyente para predecir el incremento o decremento del

indicador. Si se observa una tendencia del indicador a incrementarse cuanto mayor es la duración de la parada.

Año - mes	Días producción	Días 100%	Tfs (horas)	Disponibilidad	Número paradas	Duración media (horas)	“t CO ₂ / t Producción”		% Incremento del indicador
							mes	no 100%	
09-01	25	11	27,00	0,955	14	1,93	0,2528	0,2587	102,33
09-02	28	17	23,00	0,966	11	2,09	0,2481	0,2596	104,63
09-03	26	16	25,75	0,959	10	2,57	0,2537	0,2575	101,50
09-04	25	19	19,75	0,967	6	3,29	0,2353	0,2420	102,85
09-05	26	20	22,50	0,964	6	3,75	0,2263	0,2281	100,79
09-06	25	14	11,50	0,974	11	1,04	0,2246	0,2237	99,60
09-07	25	10	10,50	0,973	14	0,78	0,2189	0,2419	110,51
09-08	21	13	17,00	0,967	8	2,06	0,2291	0,2309	100,78
09-09	30	22	24,00	0,967	8	3,00	0,2328	0,2369	101,76
09-10	31	22	15,25	0,980	9	1,69	0,2313	0,2441	105,53
09-11	30	21	16,00	0,978	9	1,78	0,2341	0,2424	103,54
09-12	23	18	19,25	0,965	5	3,85	0,2387	0,2519	105,53
10-01	28	23	8,50	0,987	5	1,70	0,2191	0,2241	102,28
10-02	28	21	21,75	0,968	7	3,11	0,2409	0,2607	108,22
10-03	31	24	22,25	0,970	7	3,18	0,2388	0,2864	119,93
10-04	27	23	22,25	0,966	4	5,56	0,2339	0,2453	104,87
10-05	31	24	13,00	0,982	7	1,86	0,2292	0,2721	118,72
10-06	29	19	22,50	0,967	10	2,25	0,2227	0,2344	105,25
10-07	24	19	21,50	0,981	5	4,30	0,2179	0,2233	102,48
10-08	28	19	18,25	0,973	9	2,03	0,2215	0,2265	102,26
10-09	29	19	26,50	0,962	10	2,65	0,2240	0,2315	103,35
10-10	31	21	18,00	0,976	10	1,80	0,2317	0,2385	102,93
10-11	30	18	22,50	0,969	12	1,87	0,2372	0,2407	101,47
10-12	23	14	23,00	0,958	9	2,56	0,2427	0,2442	100,62
11-01	29	25	18,25	0,974	4	4,56	0,2404	0,2479	103,12
11-02	27	19	27,50	0,958	8	3,44	0,2366	0,2394	101,18
11-03	31	25	20,75	0,972	6	3,46	0,2345	0,2494	106,35
11-04	30	22	18,75	0,974	8	2,34	0,2235	0,2323	103,94
11-05	31	22	19,25	0,974	9	2,14	0,2209	0,2308	104,48
11-06	30	22	18,50	0,974	8	2,32	0,2169	0,2278	105,02

Tabla 5.1 Incremento del indicador en porcentaje en los días que hay parada con respecto a la media mensual del indicador.

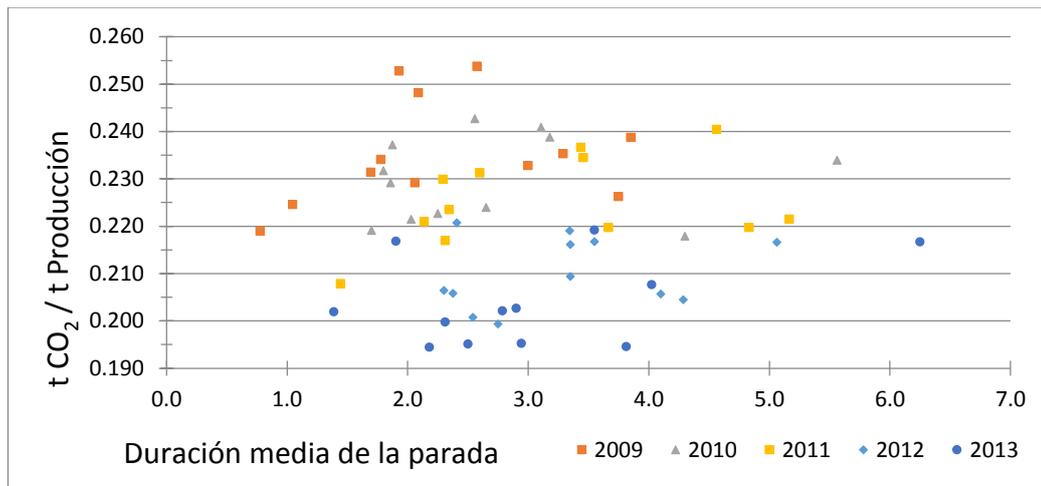


Figura 5.3. Duración media de la parada por años - indicador.

En este análisis preliminar, se comprueba que hay relación entre el indicador propuesto, la producción y las paradas o incidencias en máquina siendo el comportamiento en los tres años considerados muy similar.

Continuando con el estudio, se planifica la recolección de datos relativos a producción con una cadencia inferior a la estudiada hasta ahora. Se utiliza el equipo de control de calidad QCS para la recolección de los datos de la unidad más pequeña de producción, la bobina de pope según se describe en el apartado “3.10 Equipos utilizados”.

El proceso de fabricación de papel analizado es continuo y tiene una gran inercia a los cambios. Las variaciones en los indicadores principales tienen una variación muy lenta, apenas diferenciable en la producción de una bobina. El sistema térmico tiene un tiempo de calentamiento elevado y, por el mismo motivo, no le afectan las variaciones puntuales como las micro-paradas.

Esta afirmación se constata por el estudio en el Figura 5.4 donde se ha analizado la variación del indicador con las paradas de menos de una hora. En este caso el comportamiento en estos tres años es similar según los informes diarios de producción. Se puede observar en los tres años que la inercia del sistema hace que el indicador sea insensible a las micro-paradas y/o paradas cortas de menos de una hora.

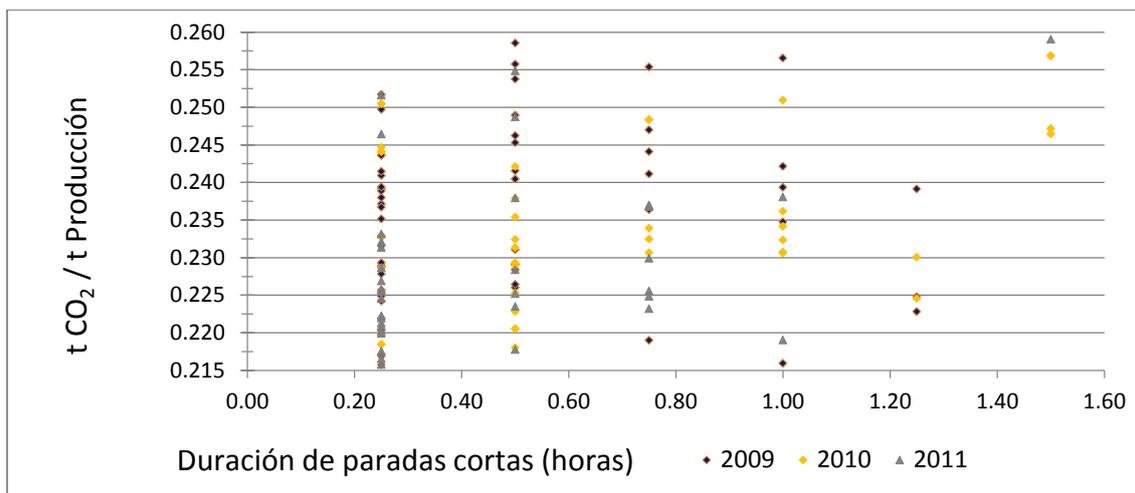


Figura 5.4. Duración de la parada por años - indicador.

Como se observa que la información tratada de esta forma es insuficiente, se plantea la recolección de la información en la unidad mínima de producción, la bobina, cuya duración es inferior a la hora. En este caso se analizarán los registros extraídos del QCS y se corresponden con la producción de la bobina Jumbo en la sección de máquina llamada pope.

5.3.- EL INDICADOR “t CO₂/ t PRODUCCIÓN” FRENTE A LA DISPONIBILIDAD

Como se ha observado que el comportamiento del proceso durante los diversos años analizados inicialmente es muy similar, se elimina la información disgregada por años y se vuelve a realizar el cálculo teniendo en cuenta la información del valor del indicador y las diversas variables asociadas a la disponibilidad. Como en el caso anterior, se comparará el indicador “t CO₂/ t Producción” con cada uno de los aspectos que puedan afectarle, como son la disponibilidad, el tiempo de parada, la duración media de la parada, la duración de las paradas cortas, así como la relación entre el indicador señalado considerando las emisiones de CO₂ por unidad de producción mensual y las emisiones de CO₂ por unidad de producción en los días con parada.

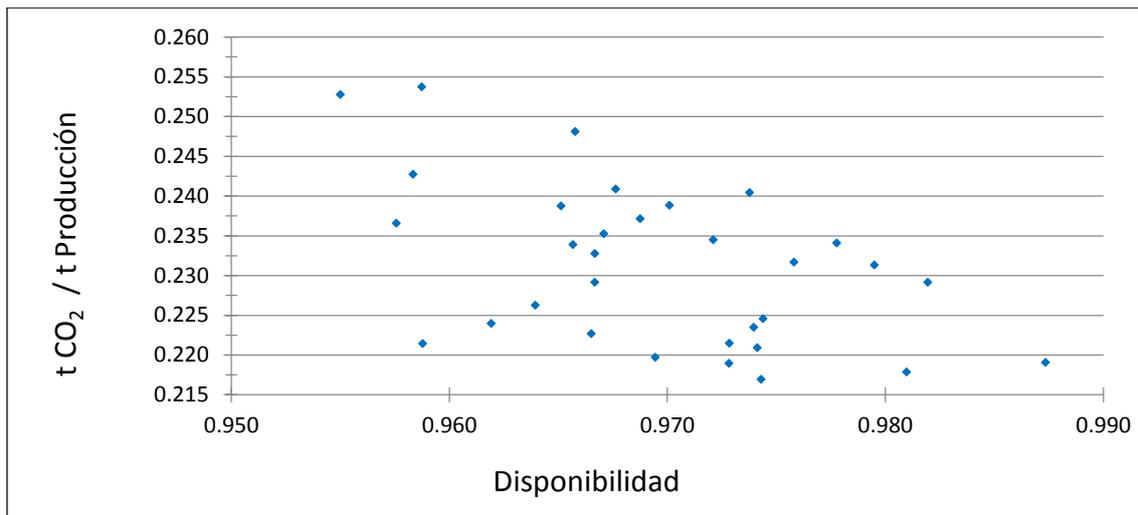


Figura 5.5. Disponibilidad – emisiones “t CO₂ / t Producción”

Se considera en primer lugar la variación del indicador respecto a la disponibilidad global de máquina, sin tener en cuenta la productividad y calidad. Analizaremos dicha información inicialmente según medias mensuales, obteniendo los resultados de la Figura 5.5.

En dicha Figura 5.5, se observa relación entre la disponibilidad de máquina y las emisiones de CO₂. Se aprecia que a mayor disponibilidad mensual, la media mensual del indicador es menor que en los periodos con disponibilidad baja. En una primera aproximación, las paradas de máquina parecen una fuente de emisiones de CO₂.

5.4.- EL INDICADOR “t CO₂ / t PRODUCCIÓN” FRENTE AL TIEMPO DE PARADA

La Figura 5.6, Tiempo de parada – Emisiones “t CO₂ / t Producción”, analiza la variación del indicador con el número de horas de parada.

A mayor número de horas de paro, mayor es el valor del indicador, lo que corrobora la información de la Figura 5.5. No obstante, las horas de paro pueden

provenir de una sola parada de larga duración o de varias paradas pequeñas, aspecto no desglosado en esta Figura 5.6, al igual que el origen de las mismas.

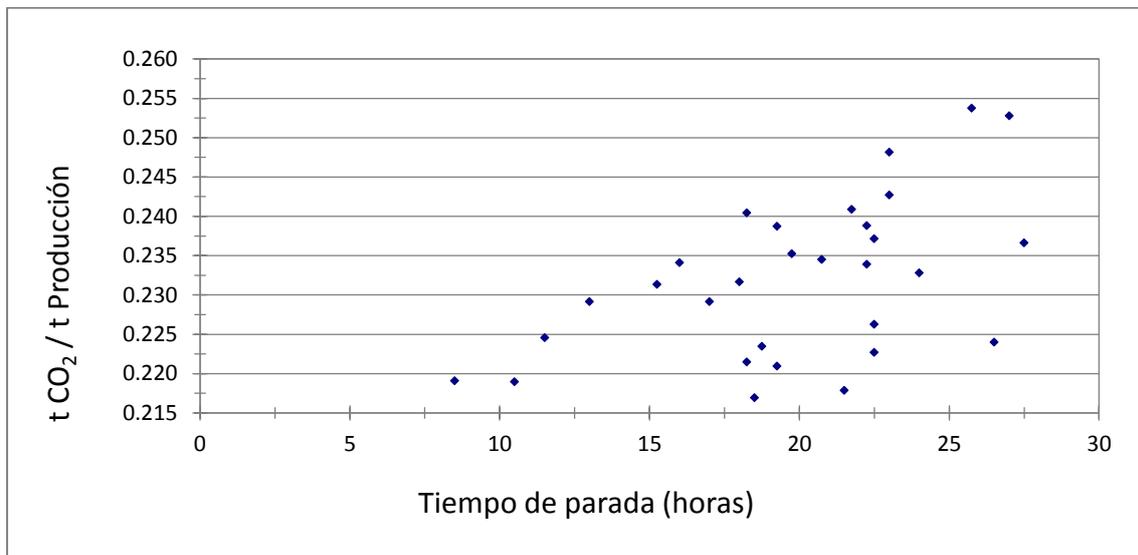


Figura 5.6. Tiempo de parada – emisiones “ t CO₂ / t Producción”

5.5.- EL INDICADOR “t CO₂ / t PRODUCCIÓN” FRENTE A LA DURACIÓN DE PARADA.

Para analizar la información de la variación del indicador (en media mensual) se considera primeramente el indicador de emisiones “t CO₂ / t Producción” considerando los datos globales del mes (producción, disponibilidad y emisiones) y se repite el cálculo para el mismo mes considerando únicamente los días del mes en los que la disponibilidad ha sido menor a 1, calculándose nuevamente el indicador señalado.

En la Figura 5.7 se observa que en todos los casos la media del indicador de emisiones “t CO₂ / t Producción” en los días de disponibilidad inferior a la unidad es superior a la media mensual general de dicho indicador. Este hecho confirma a priori que la disponibilidad de máquina está relacionada con el valor del indicador considerado. También se observa un comportamiento cíclico en las emisiones, que da lugar a tener que considerar en el futuro variables externas que influyen en la fabricación del papel, pues en general, los meses con mayores emisiones (meses 1, 2, 3,

12, 14, 23, 24, 25 y 26) se corresponden con periodos de menor temperatura y mayor humedad externas.

La Figura 5.8, “Duración media de parada – Emisiones “t CO₂ / t Producción” analiza la variación del indicador con las horas de duración media de la parada en el mes. En el caso de la duración media de la parada con el indicador, se observa una débil relación entre ambas que no se puede tomar como valor concluyente para predecir la variación del indicador. Si se observa una ligera pero no constante tendencia del indicador a incrementarse cuanto mayor es la duración de la parada.

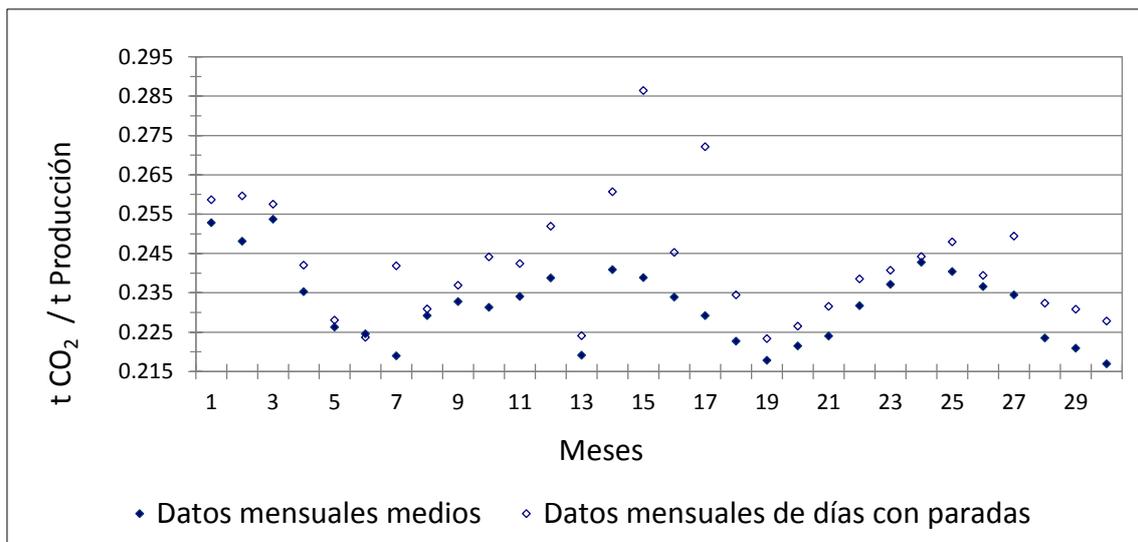


Figura 5.7. Comparación de los valores mensuales y medios de días con paradas “t CO₂ / t Producción”

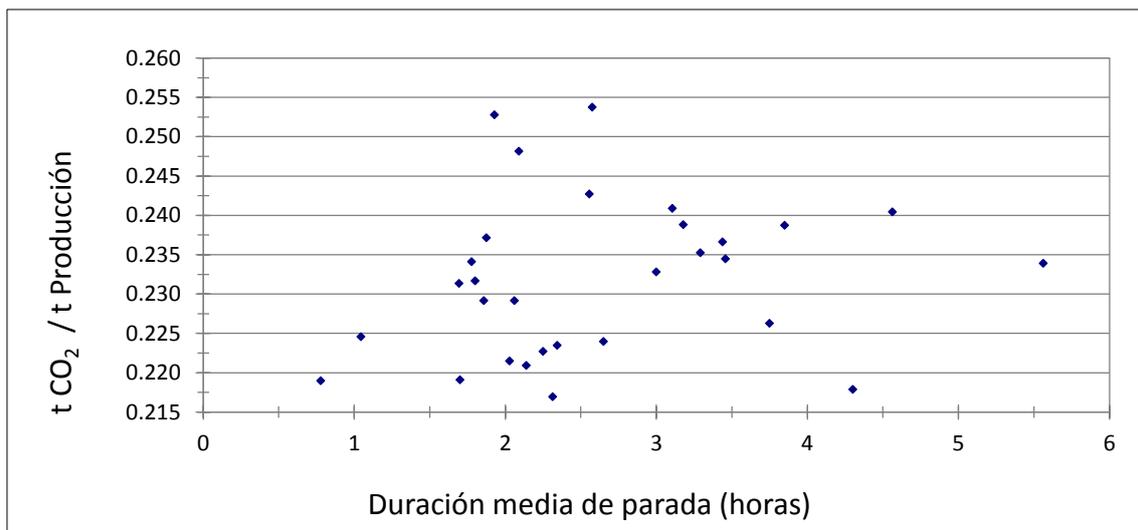


Figura 5.8. Duración media de parada – emisiones “t CO₂ / t Producción”

El proceso analizado es continuo y tiene una gran inercia a los cambios. Las variaciones en los indicadores principales tienen una variación muy lenta, apenas diferenciable en la producción de una bobina que dura una hora aproximadamente. El sistema térmico tiene un tiempo de calentamiento elevado y, por el mismo motivo, no le afectan las variaciones puntuales como las micro-paradas.

Esta afirmación se constata por el estudio en la Figura 5.9 donde se ha analizado la variación del indicador con las paradas cortas o micro-paradas de menos de una hora según los informes diarios de producción. Se puede observar que la inercia del sistema hace que el indicador sea insensible a estas micro-paradas y/o paradas cortas de menos de una hora.

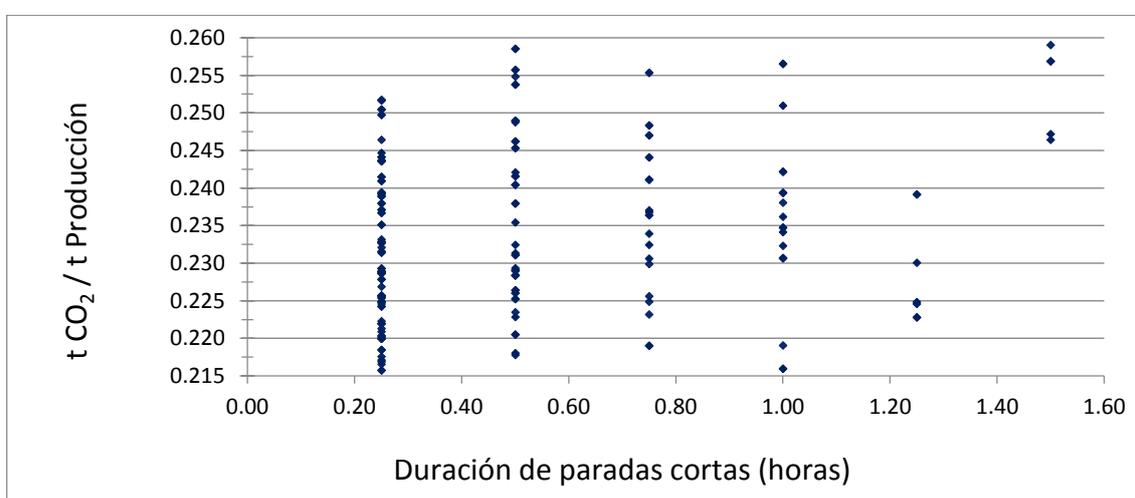


Figura 5.9. Duración de paradas cortas – emisiones “t CO₂ / t Producción”

5.6.- AJUSTE DEL INDICADOR “t CO₂ / t PRODUCCIÓN” FRENTE A VARIABLES DE DISPONIBILIDAD

La cuantificación de los datos para la disponibilidad, el tiempo de parada y la duración media frente a las emisiones “t CO₂ / t Producción” mensuales (Ind_100) y a las emisiones “t CO₂ / t Producción” en los días de parada (Ind_<100) es representada en la Tabla 5.2 y en la Figura 5.10. La Tabla 5.2 muestra el modelo que proporciona mayor ajuste, después de calibrar doce modelos de regresión para cada variable.

	Modelo	Correlación	R ² (%)
Ind_100-Disponibilidad	$Ind_{100} = -0,54 + \frac{0,75}{Disponibilidad}$	0,6058	36,7
Ind_100-Tiempo de parada	$Ind_{100} = 0,21 + 0,001 \times Tiempo\ de\ parada$	0,5251	27,57
Ind_100-Duración media	$Ind_{100} = \left(4,2 + \frac{0,26}{Duración\ media}\right)^{-1}$	0,3100	9,61
Ind_<100-Disponibilidad	$Ind_{<100} = (11,65 - 7,3 \times Disponibilidad)^{-1}$	0,5251	27,57
Ind_<100-Tiempo de parada	$Ind_{<100} = \left(0,39 + \frac{3,29}{Tiempo\ parada}\right)^{-1}$	0,2485	6,17
Ind_<100-Duración media	$Ind_{<100} = \left(4,06 + \frac{0,17}{Duración\ media}\right)^{-1}$	0,1586	2,51

Tabla 5.2. Modelos de ajuste.

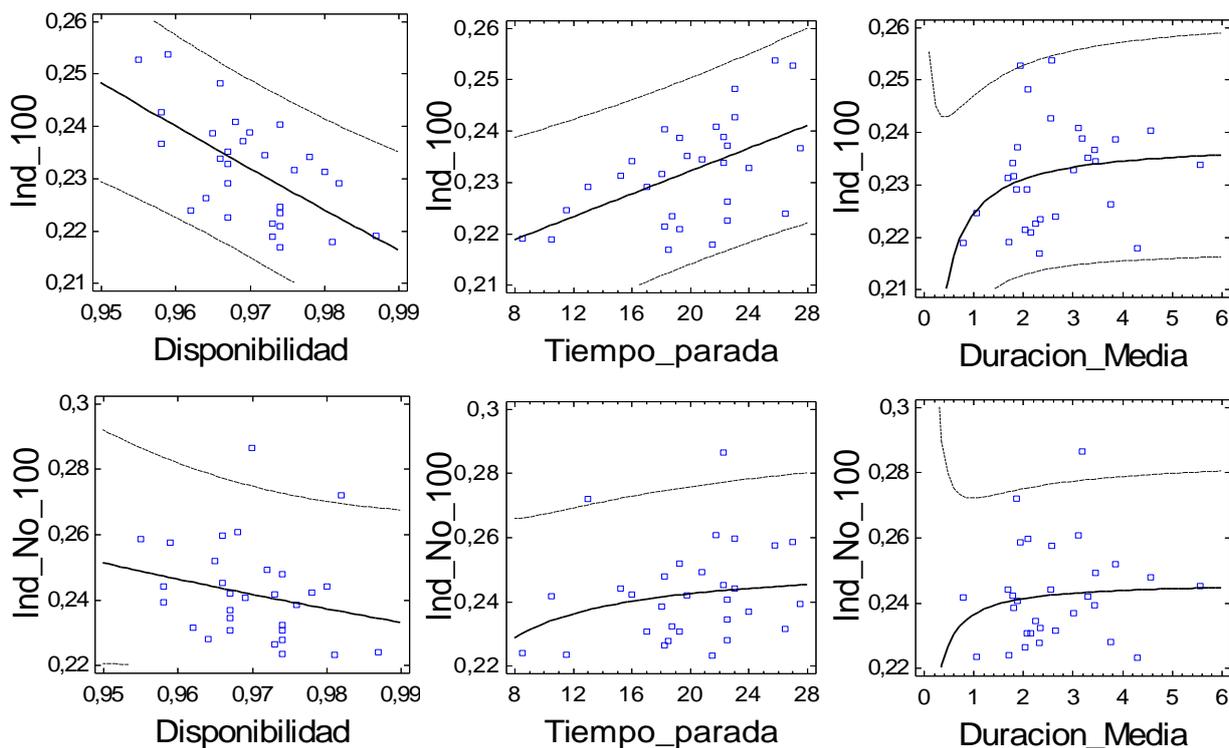


Figura 5.10. Ajuste del indicador

5.7.- EL INDICADOR “t CO₂ / t PRODUCCIÓN” FRENTE AL TIPO DE PRODUCTO

La fábrica seleccionada para el estudio, produce un amplio rango de tipos de papel; C0A, C1A, C2A, C3A, C4A, C5A y C6A. Cada tipo de papel fabricado se diferencia de las demás por sus características mecánicas basadas en una composición distinta de materia prima y aditivos químicos. Esta diferencia puede generar un comportamiento distinto a la hora del secado, lo que podría ser una causa de variación del indicador.

Dentro de cada tipo de papel, también se fabrica papel con un amplio rango de gramajes que va desde los 150 g/m² hasta los 650 g/m². Este amplio rango tanto de gramajes como de calidades, hecho poco común dentro de la fabricación de papel, permitirá estudiar de forma más amplia la variación del indicador y la influencia que las condiciones externas pueden tener para cada tipo de papel y gramaje.

En la fabricación del papel, el gramaje puede variar entre los límites indicados en intervalos muy pequeños (entre 5 y 10 g/m²). Para facilitar el estudio se han seleccionado los 4 gramajes más habituales; 200 g/m², 350 g/m², 500 g/m² y 630 g/m². Dichos gramajes constituyen una parte significativa de la producción.

Para facilitar el análisis e interpretación de los datos se analiza gráficamente la información de la variación del indicador emisiones “t CO₂ / t Producción” (en media mensual). Se considera primeramente el indicador teniendo en cuenta los datos globales del mes (producción, disponibilidad y emisiones) y se repite el cálculo para el mismo mes considerando únicamente los días del mes en los que la disponibilidad ha sido menor a 1, calculándose el indicador señalado.

Teniendo en cuenta la información anterior, tomando los datos de producción horarios del año 2012, en la Figura 5.11 se muestra la relación entre el indicador de emisiones “t CO₂/ t Producción” y el gramaje del papel.

En la Figura 5.11 se observa que no hay una relación directa entre el tipo de producto, el gramaje y el indicador seleccionado de emisiones “t CO₂/ t Producción”. El indicador toma valores similares para todos los gramajes e incluso dentro de un gramaje varía entre 0,130 y 0,250. Esta información podría ser un indicio de que el indicador

puede estar influenciado de manera significativa con las condiciones ambientales externas como la temperatura del aire exterior.

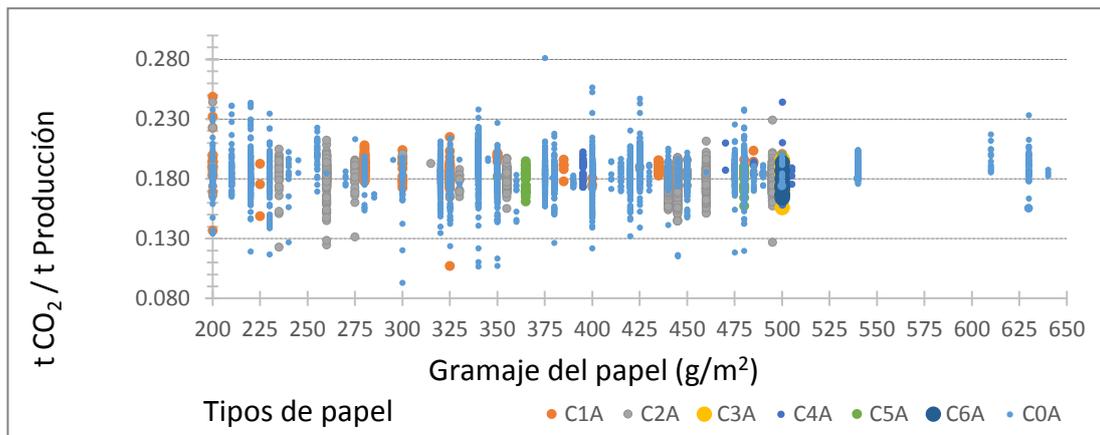


Figura 5.11. Relación entre el indicador, el tipo de producto y el gramaje del papel.

En las Figuras 5.12, 5.13, 5.14 y 5.15 se analizan la variación del indicador con la temperatura, para ello se fija un gramaje común para todas los tipos de papel fabricado y se observa la evolución del indicador emisiones “t CO₂ / t Producción” respecto al papel con las diversas condiciones de temperatura ambiental exterior.

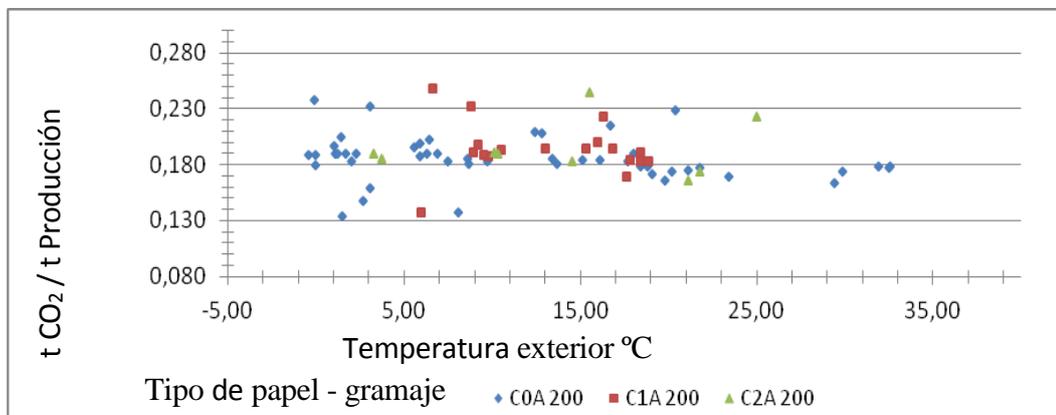


Figura 5.12. Relación entre el indicador y el tipo de producto en gramajes bajos, 200 g/m².

En la Figura 5.12 se observa para un gramaje de 200 g/m² y para todos los tipos de producto que se fabrican con dicho gramaje, como varía el indicador conforme aumenta la temperatura. En esta Figura 5.12 se constata una muy ligera disminución del indicador conforme aumenta la temperatura.

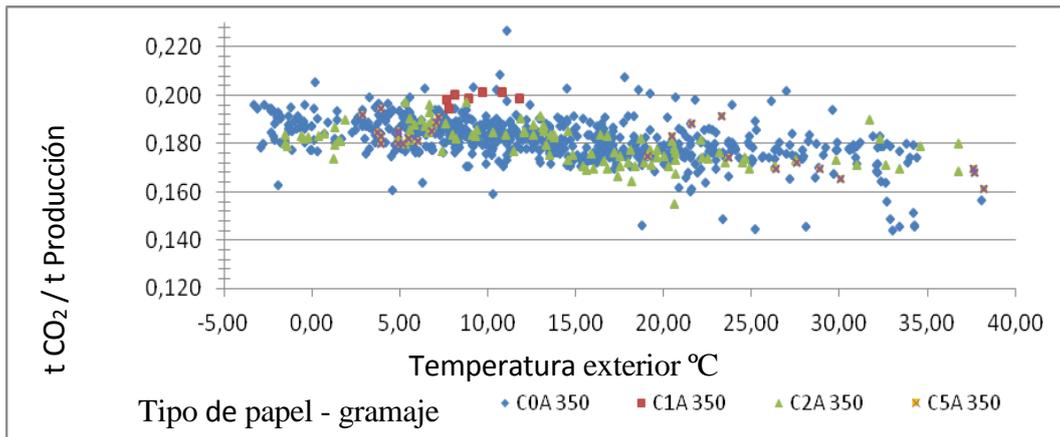


Figura 5.13. Relación entre el indicador y el tipo del producto en gramajes medios, 350 g/m².

En la Figura 5.13 se repite el mismo gráfico que en la Figura 5.12 para 350 g/m². En este caso se observa una mayor disminución del indicador conforme aumenta la temperatura. Este hecho se pone de manifiesto en todas los tipos de productos y más acusado en C0A, C2A y C5A. Para el caso de la C3A no se observa una variación significativa al haberse concentrado las producciones de dicho tipo de producto y gramaje en torno a los 10°C. En la Figura 5.14 se analiza el gramaje igual a 500 g/m². En esta Figura es más evidente la disminución del indicador que en las anteriores.

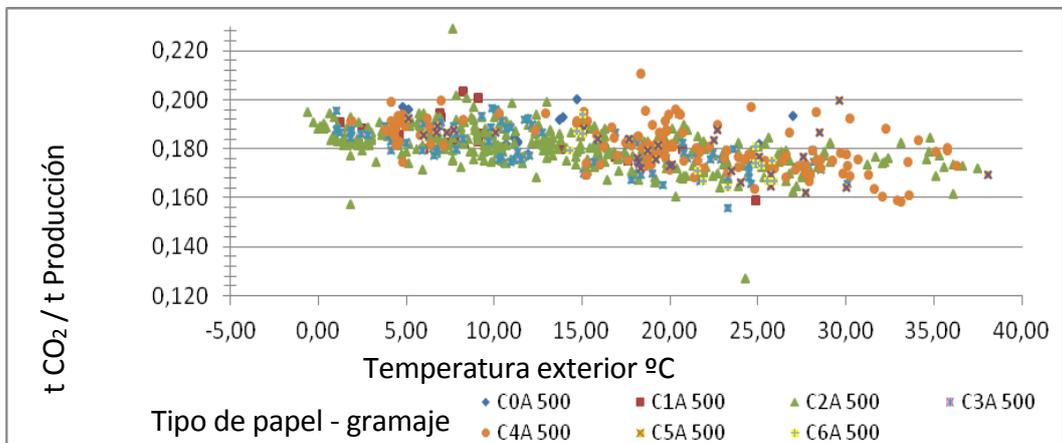


Figura 5.14. Relación entre el indicador y el tipo de producto en gramajes medios, 500 g/m².

En la Figura 5.15 se analiza en el mismo gráfico que en las anteriores para 630 g/m². En este caso también se observa la disminución del indicador conforme aumenta la temperatura.

Revisando las Figuras 5.12, 5.13, 5.14 y 5.15 conjuntamente se observa que en los gramajes intermedios de 350 g/m² y 500 g/m² el indicador seleccionado de emisiones “t CO₂ / t Producción” tiene una variación aparentemente más acusada que en los gramajes extremos analizados de 200 g/m² y 630 g/m².

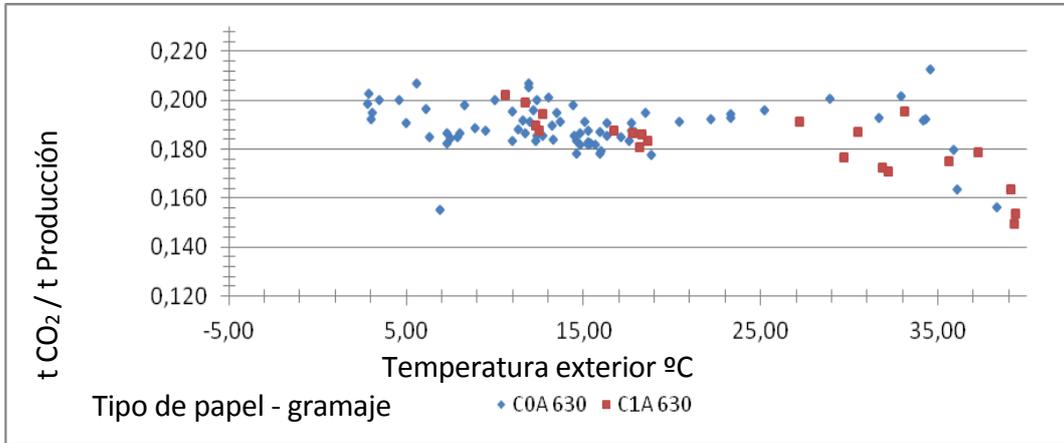


Figura 5.15. Relación entre el indicador y el tipo de producto en gramajes altos, 630 g/m².

Para ver la variación del indicador con la tipo de papel se limita el efecto que produce el cambio de temperatura, escogiendo rangos de ésta lo suficientemente estrechos.

5.8.- EL INDICADOR “t CO₂ / t PRODUCCIÓN” RESPECTO AL PRODUCTO Y TEMPERATURA EXTERIOR

En esta Figura 5.16, con un rango de -5°C a 5°C, se observa que el indicador de emisiones “t CO₂ / t Producción” para el papel es prácticamente constante en toda la escala de gramajes para una misma calidad, viéndose una ligera disminución de la media conforme se incrementa la calidad del producto. De esta forma al tipo de papel C0A tiene una media ligeramente superior a la C2A. Para el resto de tipos de papel no hay suficiente número de muestras como para ser concluyente.

En la Figura 5.17 se analiza la información para todas las calidades de papel y rango de gramajes el rango de temperaturas de 5°C a 10°C para todos los tipos de producto. La variación del indicador a lo largo de todos los gramajes y para cada tipo de papel, al igual que en la Figura 5.16, se mantiene también casi constante. En este caso se observa que la variación del indicador emisiones “t CO₂ / t Producción” dentro de cada gramaje es menor conforme aumenta la resistencia del papel excepto en el tramo inicial con producciones de papel por debajo de los 250 g/m².

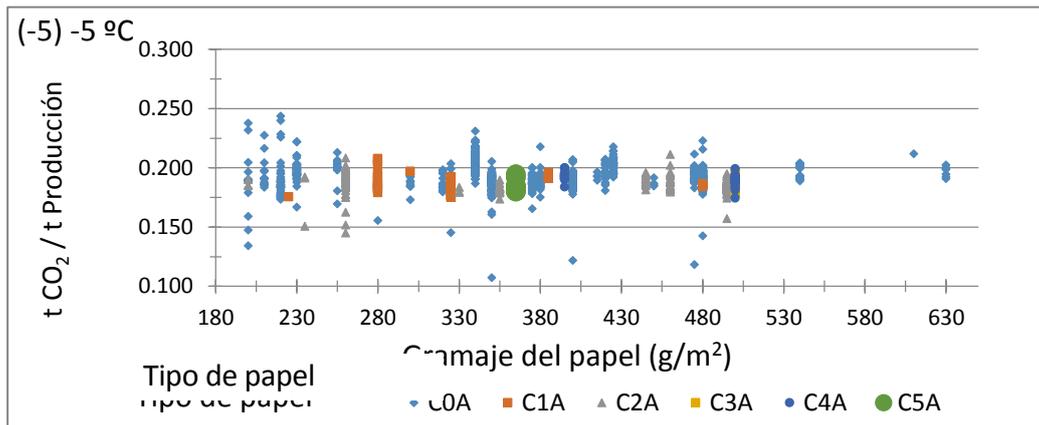


Figura 5.16. Relación entre el indicador, tipo de producto y gramaje para temperaturas entre -5 y 5°C.

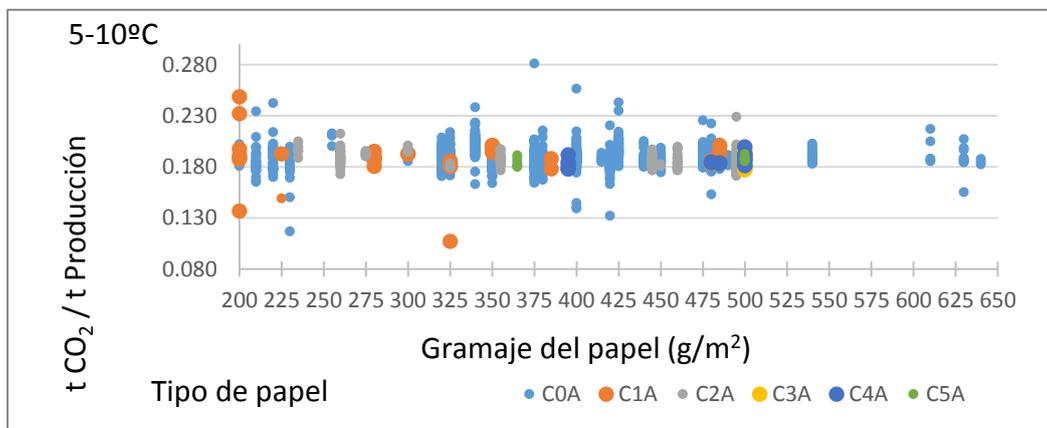


Figura 5.17. Relación entre el indicador, tipo de producto y gramaje para temperaturas entre 5 y 10°C.

En coherencia con lo anterior, en las Figuras siguientes 5.17, 5.18, 5.19, 5.20, 5.21 y 5.22 se analiza la información para todos los tipos de producto de papel y rango de gramajes el rango de temperaturas de 10 - 15°C, 15 - 20°C, 20 - 25°C, 25 - 30°C, 30 - 35°C y 35 - 40°C para todos los tipos de papel.

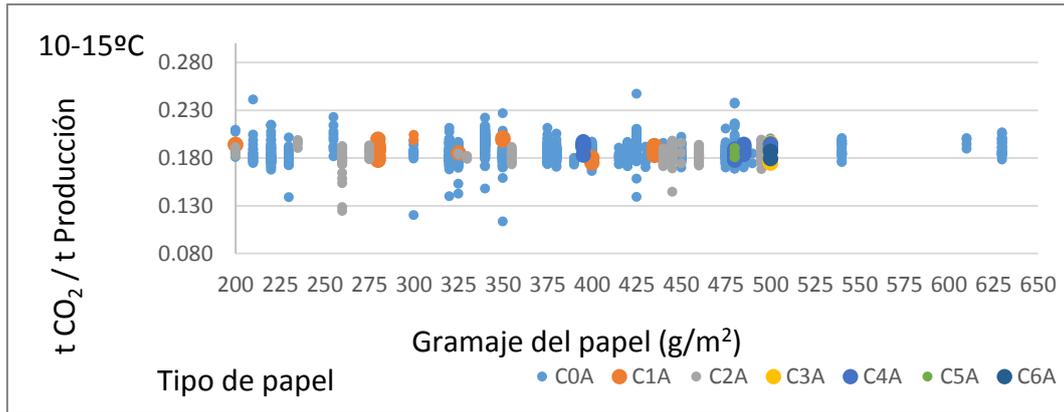


Figura 5.18. Relación entre el indicador, tipo de producto y gramaje para temperaturas entre 10 y 15°C

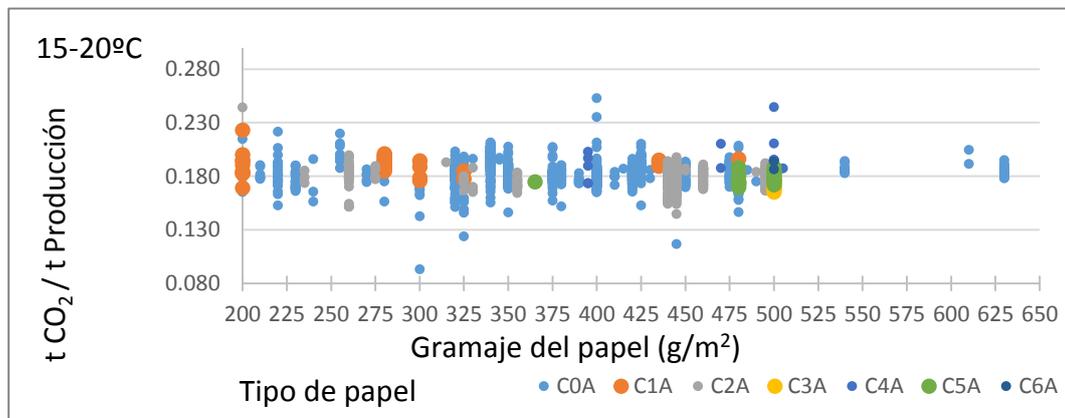


Figura 5.19. Relación entre el indicador, tipo de producto y gramaje para temperaturas entre 15 y 20°C.

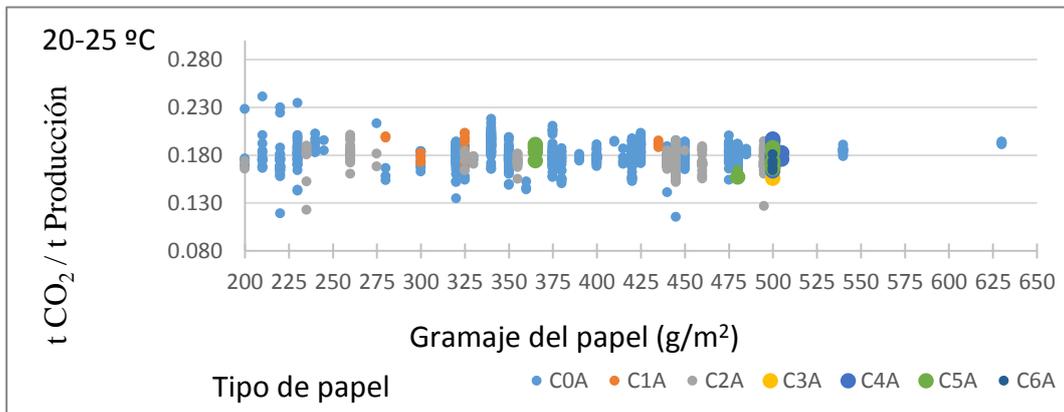


Figura 5.20. Relación entre el indicador, tipo de producto y gramaje para temperaturas entre 20 y 25°C.

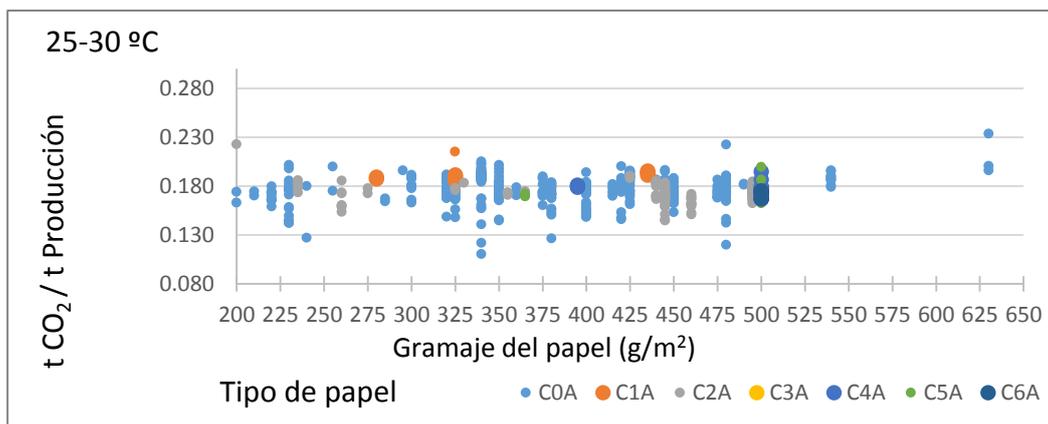


Figura 5.21. Relación entre el indicador, tipo de producto y gramaje para temperaturas entre 25 y 30°C.

La variación del indicador de emisiones “t CO₂ / t Producción” a lo largo de todos los gramajes y para cada tipo de producto, al igual que en la Figura 5.16, se mantiene también casi constante.

En este caso se observa que la media del indicador en cada uno de los rangos de temperatura va disminuyendo paulatinamente. Mientras en la temperatura de -5°C a 5°C la media estaba situada claramente por encima de 0,180 “t CO₂ / t Producción”, conforme aumenta la temperatura esta media se va reduciendo hasta estar claramente por debajo de los 0,180 en el rango de temperatura de 25°C a 30°C.

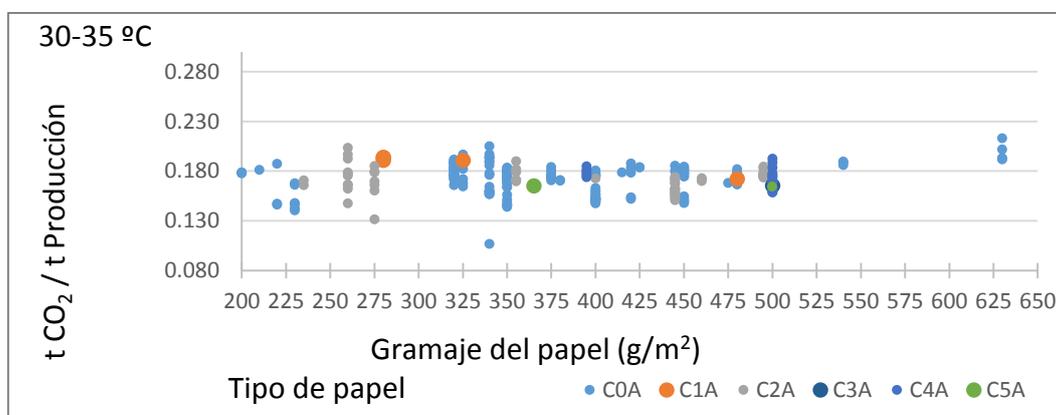


Figura 5.22. Relación entre el indicador, tipo de producto y gramaje para temperaturas entre 30 y 35°C.

Este hecho se pone más de manifiesto conforme aumenta la temperatura. Si se comparan los dos casos extremos de temperatura, Figura 5.16 y Figura 5.22 se observa más claramente la diferencia.

Como se pondrá de manifiesto en la siguiente sección 5.8, la temperatura exterior (O_t) será un factor no controlable que tiene una influencia muy significativa en el indicador. La temperatura exterior afecta significativamente a la temperatura del aire de soplado a campana (Ebt) y consecuentemente a la temperatura interna de la propia campana (Eat).

5.9.- EL INDICADOR “t CO₂ / t PRODUCCIÓN” RESPECTO A LOS PARÁMETROS DE PRODUCCIÓN EN LA SECCIÓN DE SECADO

En esta sección, el indicador se analiza a partir de los parámetros y variables recogidas por QCS y la influencia de cada uno en el indicador “t CO₂ / t Producción” se estudia por medio de un diseño de experimentos. Más tarde, los resultados son discutidos y los parámetros óptimos, los que reducen el indicador manteniendo los requisitos de calidad tanto del producto fabricado como los establecidos por el cliente.

El estudio se basa en los datos de producción para el año 2012, que es un período representativo de la producción en el que no había ni cambios en las condiciones de la máquina ni alteraciones que cambiaron su capacidad de producción.

Los datos recogidos y analizados corresponden a una bobina jumbo (50 minutos de tiempo de producción aproximadamente), que es el menor periodo de la sub-instalación en la que se puede establecer unívocamente los datos necesarios para calcular el indicador objeto de estudio, como la producción de papel, pero es lo suficientemente pequeño como para tomar conclusiones sobre la relación entre la variación de los parámetros y las variables del proceso.

La mayor parte de las variaciones de los parámetros externos, como la temperatura exterior (O_t) afectan a la temperatura del aire soplado (Ebt) y a la humedad relativa del aire soplado (Ebm), que afectan significativamente a las condiciones de la sección de secado, mantienen su valor estable en este periodo.

5.9.1.- Estudio del indicador “t CO₂ / t Producción”

Según se viene constatando en el análisis de las emisiones de CO₂ llevado hasta ahora en la Tesis que analizaba la información de la variación del indicador de emisiones (en media mensual) “t CO₂ / t Producción” considerando los datos globales del mes (producción, disponibilidad y emisiones), se observó que hay un comportamiento cíclico en las emisiones y que los meses con mayores emisiones se corresponden con periodos de menor temperatura exterior (*Ot*) y mayor humedad externas.

Como se ha indicado en la introducción, el estudio se centra en el proceso de secado de la fabricación de papel, que es el responsable de la mayor parte de las emisiones de CO₂ en una fábrica de este tipo, y que además constituye el cuello de botella del proceso de fabricación. En esta sección se debe eliminar la humedad del papel desde la de entrada (Humedad papel entrada de la sección de secado - *Pmi*) hasta la de salida (Humedad papel salida de la sección de secado *Pmo*).

Con las condiciones establecidas de calidad (*Pg*), gramaje (*Pd*) y ancho de papel (*Pwi*) fabricado, varía la velocidad de máquina (*Ms*) de forma que el producto se obtenga con la humedad del papel (*Pmo*) establecida según los requisitos establecidos por el cliente.

La variación de las condiciones de la sección de secado puede hacer que la velocidad de máquina (*Ms*) disminuya para mantener la especificación de humedad del papel de salida (*Pmo*), reduciéndose la producción de la máquina. La variación de estas condiciones de la sección de secado influye directamente en la producción y también en las emisiones de CO₂.

5.9.1.1.- Agrupación de productos por tipo de papel

Los productos fabricados y analizados se pueden dividir en siete grupos denominados tipos de papel (C0A, C1A, C2A, C3A, C4A, C5A y C6A). Cada tipo de papel tiene una fórmula diferente tanto en términos de materias primas como de aditivos, lo que significa que cada calidad puede tener características específicas con

respecto a la facilidad de la eliminación de su contenido de agua a la entrada de la sección de secado.

Cada tipo de papel se diferencia principalmente por tener unas características mecánicas distintas del valor considerado guía (Ply-Bond) y ascendentes según aumenta el código del papel desde los 100 a los 1000 Julios. Esta resistencia hace que los productos fabricados puedan tener características distintas en su comportamiento mecánico. Dentro de cada tipo de papel se producen gramajes entre los 150 y 650 g/m².

El análisis de la varianza realizado, basado en el test de Fisher-Snedecor, permite observar el grado de influencia de las características del producto y de la temperatura exterior en el indicador seleccionado. Este análisis ANOVA (Tabla 5.3) señala que los tres factores estudiados inicialmente, tienen una influencia significativa en el valor obtenido del indicador, con un nivel de confianza del 95,0% debido a que se ha alcanzado un P-valor menor de 0,05 para cada una de ellos; asimismo determina que el factor de mayor influencia es la temperatura exterior.

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F-ratio	P-valor
Tipo de papel	0,0040	6	0,0007	6,65	<0,00001
Gramaje	0,0065	3	0,0022	21,46	<0,00001
Temperatura	0,0204	8	0,0026	25,36	<0,00001
Residuos	0,1142	1131	0,0001		
Total	0,1472	1148			

Tabla 5.3. – Resultados del análisis de la varianza

En cuanto a una información más detallada, los valores de las medias e intervalos de confianza al 95,0%, para cada tipo de papel (Figura 5.23.), gramaje (Figura 5.24.) e intervalos de temperatura (Figura 5.25.).

Los valores del indicador respecto al tipo de papel sufren variaciones, éstas no parecen seguir un patrón definido (Figura 5.23.). Se observa menor variación en el C0A que en los demás. Este hecho puede deberse a la diferencia de formulación y productos químicos que se le añaden. El tipo de papel C0A es el producto al que no se le añaden compuestos especiales para aumentar la conexión entre sus capas.

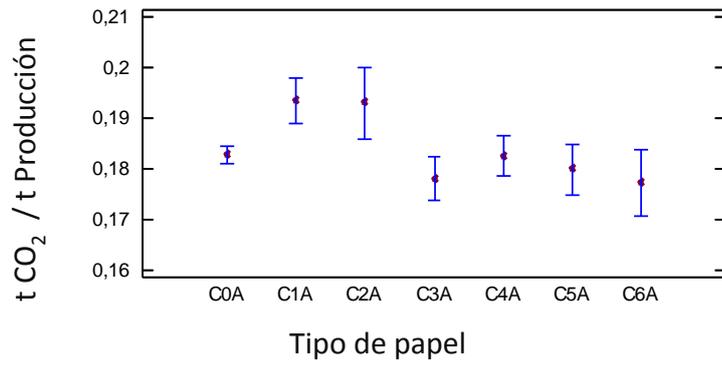


Figura 5.23. Valores medios e intervalos de confianza al 95,0% del indicador “t CO₂/ t Producción” respecto al tipo de papel.

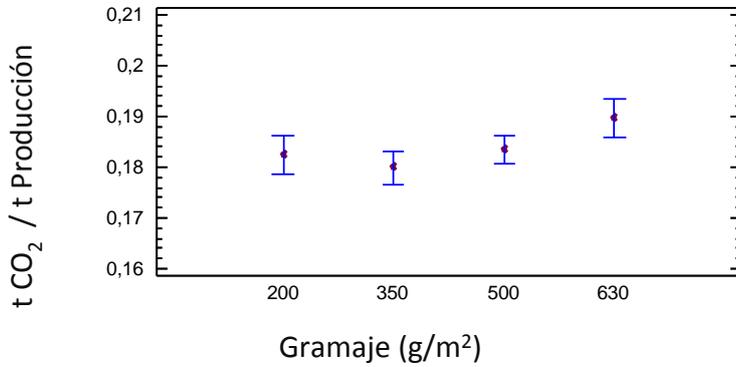


Figura 5.24. Valores medios e intervalos de confianza al 95,0% del indicador “t CO₂ / t Producción” respecto al gramaje.

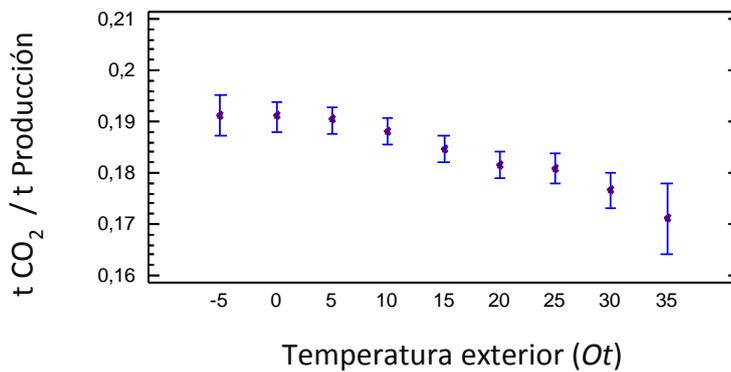


Figura 5.25. Valores medios e intervalos de confianza al 95,0% del indicador “t CO₂ / t Producción” respecto a la temperatura exterior (Ot).

En cuanto al gramaje, se observa que su incremento produce un aumento del indicador, con la excepción del catalogado como 350 gr/m² (Figura 5.24), lo que habrá de ser investigado en futuros trabajos, al igual que el tipo de producto.

La influencia de la temperatura externa de la planta puede apreciarse en la Figura 5.25, en la que se evidencia que su aumento tiene un efecto positivo en el indicador objeto de estudio, pues provoca su reducción. Más adelante estudiaremos en detalle su origen.

Los resultados de la regresión lineal se muestran en la Tabla 5.4

Tipo papel	% producción	Regresión	Ecuación
C0A	73,92%	$t \text{ CO}_2 / t \text{ Producción} = 0,1786 + 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot Pd - 4,8 \cdot 10^{-4} \cdot Ot$	(5.2)
C1A	5,54%	$t \text{ CO}_2 / t \text{ Producción} = 0,1938 + 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot Pd - 4,8 \cdot 10^{-4} \cdot Ot$	(5.3)
C2A	15,83%	$t \text{ CO}_2 / t \text{ Producción} = 0,1947 + 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot Pd - 4,8 \cdot 10^{-4} \cdot Ot$	(5.4)
C3A	0,98%	$t \text{ CO}_2 / t \text{ Producción} = 0,1731 + 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot Pd - 4,8 \cdot 10^{-4} \cdot Ot$	(5.5)
C4A	3,05%	$t \text{ CO}_2 / t \text{ Producción} = 0,1773 + 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot Pd - 4,8 \cdot 10^{-4} \cdot Ot$	(5.6)
C5A	0,58%	$t \text{ CO}_2 / t \text{ Producción} = 0,1750 + 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot Pd - 4,8 \cdot 10^{-4} \cdot Ot$	(5.7)
C6A	0,10%	$t \text{ CO}_2 / t \text{ Producción} = 0,1725 + 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot Pd - 4,8 \cdot 10^{-4} \cdot Ot$	(5.8)

Tabla 5.4. Regresión lineal (tipo de papel – indicador)

La relación entre el indicador y cada calidad, reflejada en la Tabla 5.4, en la que para cada tipo de calidad se describe la ecuación de regresión lineal, considerando el gramaje y la temperatura exterior.

Sólo se han considerado la densidad superficial del papel y la temperatura exterior se, ya que son los factores que dependen directamente del medio ambiente (*Ot*) o las necesidades del cliente (*Pd*)

La información obtenida en esta Tesis pone de manifiesto que el gramaje tiene una incidencia de aumento en el indicador, mientras que la temperatura lo disminuye. Además la influencia de cada calidad no es igual, en la Tabla 5.4 se aprecia que el efecto del gramaje en los tipos de calidad C1A y C2A es muy superior y distinto al del resto de calidades.

Los tipos de papel pueden agruparse en dos grupos constituidos, cada uno de ellos, por tipos de papel o calidades homogéneas entre ellas:

Grupo I, formado por C0A, C3A, C4A, C5A y C6A.

Grupo II, formado por C1A y C2A.

El análisis se basará únicamente en el Grupo I que aglutina el 78,63% de la producción y es lo suficientemente significativo, quedando fuera de este estudio el encontrar el origen de la diferencia de emisiones entre las emisiones del Grupo I y el Grupo II. Por lo tanto, *Pg* no se considera más en este apartado y puede ser objeto de futuros estudios.

El test de Student-Newman-Keuls (Tabla 5.5) muestra las diferencias existentes entre las medias de cada tipo de calidad, gramaje e intervalo de temperatura, permitiendo identificar, los valores que pueden considerarse estadísticamente diferentes a un nivel de confianza del 95,0% o bien homogéneos.

Los tipos de calidad pueden agruparse en dos grupos constituidos, cada uno de ellos, por calidades homogéneas entre ellas, como son un primer grupo formado por C0A, C3A, C4A, C5A y C6A, y un segundo grupo integrado por C1A y C2A.

En cuanto al tipo de gramaje, solamente se identifica un grupo homogéneo formado por los gramajes de 200 y 500 gr/m². Finalmente, respecto a los intervalos de temperatura, resultan semejantes, las temperaturas entre 20 y 30°C por un lado, y entre – 5 y 10°C por otro.

Contraste de tipos de papel	Diferencias	Contraste de Gramaje	Diferencias	Contraste de Temperatura	Diferencias
C0A - C1A	*-0,015	200 – 350	*0,0027	-5 – 0	0,0002
C0A - C2A	*-0,016	200 – 500	-0,0009	-5 – 5	0,0008
C0A - C3A	0,0054	200 – 630	*-0,0071	-5 – 10	0,0031
C0A - C4A	0,0013	350 – 500	*-0,0036	-5 – 15	*0,0065
C0A - C5A	0,0036	350 – 630	*-0,0098	-5 – 20	*0,0097
C0A - C6A	0,0061	500 – 630	*-0,0062	-5 – 25	*0,0103
C1A - C2A	-0,0009			-5 – 30	*0,0147
C1A - C3A	*0,0207			-5 – 35	*0,0199
C1A - C4A	*0,0165			0 – 5	0,0006
C1A - C5A	*0,0188			0 – 10	0,0029
C1A - C6A	*0,0214			0 – 15	*0,0063
C2A - C3A	*0,0216			0 – 20	*0,0095
C2A - C4A	*0,0174			0 – 25	*0,0101
C2A - C5A	*0,0198			0 – 30	*0,0144
C2A - C6A	*0,0223			0 – 35	*0,0197
C3A - C4A	-0,0042			5 – 10	0,0023
C3A - C5A	-0,0018			5 – 15	*0,0056
C3A - C6A	0,0007			5 – 20	*0,0088
C4A - C5A	0,0023			5 – 25	*0,0094
C4A - C6A	0,0048			5 – 30	*0,0138
C5A - C6A	0,0025			5 – 35	*0,0191
				10 – 15	0,0034
				10 – 20	*0,0066
				10 – 25	*0,0071
				10 – 30	*0,0115
				10 – 35	*0,0168
				15 – 20	0,0032
				15 – 25	0,0038
				15 – 30	*0,0081
				15 – 35	*0,0135
				20 – 25	0,0006
				20 – 30	*0,0049
				20 – 35	*0,0103
				25 – 30	*0,0043
				25 – 35	*0,0097
				30 – 35	*0,0053

*Denota diferencias significativas

Tabla 5.5: Contraste de tipo de papel, gramaje y temperatura en el test de Student-Newman-Keuls.

5.9.1.2.- Resultados Experimentales

Con el fin de realizar un análisis del proceso, se ha realizado un experimento siguiendo el método Taguchi (1990) con los parámetros y variables de producción significativas identificadas previamente en esta Tesis que tienen mayor influencia se recogen en la Tabla 5.6. Todos estos parámetros y variables se toman relativas a la producción de una bobina jumbo, que es la cantidad más pequeña en términos de registro producción y análisis para estos fines. En la tabla están las siguientes leyendas e indicaciones sobre los parámetros,

Parámetros definibles: cuando el valor se puede establecer de antemano.

Parámetro controlable: cuando la configuración o la regulación de la máquina se pueden cambiar para alcanzar el valor deseado.

Experimento: parámetros que se tendrán en cuenta en el experimentado realizado de acuerdo con el método de Taguchi.

Notación	Definible	Controlable	Experimento	Media	Mediana	Desviación Standard	Mínimo	Máximo
Pwi	Si	Si	Si	1,949	1,957	43,25	1,750	2,060
Pd	Si	Si	Si	396	400	86,97	200	650
Pmo	Si	Si	Si	6,76	6,8	0,29	6,2	7,8
Sf	No	Si		8.405	8.421	655,30	5.029	11.476
Pmi	No	Si	Si	53,86	53,76	1,93	50	69
Pti	No	Si	Si	33,87	33,77	2,51	30	45
Pto	No	SI		78,24	79,07	8,48	65	90
Wt	Si	Si		32,35	32,41	2,42	20	40
Eat	No	No		81,76	81,71	3,44	55,82	90
Eam	No	No		16,08	15,87	2,45	0,86	42,42
Ebt	No	No		82,45	82,79	5,67	46,88	108,23
Crt	No	No		92,40	91,8	8,14	25,89	111,23
Ot	No	No	Si	13,44	12,46	8,14	-4,70	39,40
Ebm	No	No		68,00	70,00	20,44	9,00	100,00

Tabla 5.6. Los resultados de los parámetros y variables extraídas de QCS y límites experimentales.

Todos los parámetros y variables indicados en la Tabla 5.6 se tienen en cuenta porque dan información sobre las condiciones de producción en la que se realiza el secado de papel, aunque algunos no se analizaron posteriormente. Hay que tener en cuenta que la variabilidad de los resultados es alta por lo que es importante analizar la influencia de algunos de ellos. La combinación de la información en la Tabla 5.6 permite la determinación y justificación de los niveles seleccionados para cada factor en el diseño de experimentos.

Con el fin de reducir el indicador de emisiones ' $t\text{ CO}_2 / t\text{ Producción}$ ', se seleccionarán los factores basados en predicciones o estudios previos de esta Tesis, y que se consideran que tienen una influencia potencial más significativa en el proceso de secado de papel y el indicador.

La aplicación de la metodología de diseño de experimento Taguchi, un experimento se desarrolló para determinar los parámetros que más afectan el indicador, con el fin de sugerir acciones con respecto a estos parámetros que puedan minimizar el indicador, mientras que se mantengan las especificaciones del producto.

5.9.1.3.- Relación del indicador con la temperatura

En el apartado “5.7 El indicador “ $t\text{CO}_2 / t\text{ Producción}$ ” respecto al producto y a la temperatura exterior “se ha constatado que la temperatura exterior (O_t) es un factor (incontrolable) que tiene una influencia significativa en el indicador. La temperatura exterior influye directamente en la temperatura del aire soplado y afecta también a la temperatura interna del aire de extracción de la campana (Eat).

Dos niveles de temperatura se han observado en el que los niveles de emisiones son similares. Estos niveles se encuentran por encima y por debajo de la temperatura media de $13,44^\circ\text{C}$

Hay pocas ocasiones en las que la temperatura exterior se eleva por encima de 30°C , y estos datos no se tienen en cuenta ya que no hay información suficiente en relación a cada tipo de producto y gramaje o densidad superficial. Estos datos no son considerados representativos

Respecto a la temperatura de la hoja de papel que se está secando, los factores más importantes son la temperatura del agua en la mesa de fabricación y que corresponde con la temperatura de la entrada a la sección de secado (Wt), la temperatura de papel cuando entra en la sección de secado (Pti) y la temperatura de papel a la salida de la sección de secado (Pto). En términos de las condiciones de secado, los factores más importantes son la temperatura del aire que circula en el interior de la campana, la temperatura del aire de soplado que compensa la extracción anterior (Ebt) y la temperatura del aire de extracción (Eat).

En la Tabla 5.7, se puede observar la relación entre los parámetros asociados a las temperaturas en la sección de secado (Wt , Pti , Pto , Eat , Ebt y Ot) que afectan el proceso de secado de papel, con el objetivo de reducir su número y de ese modo facilitar tanto en el caso de estudio y la observación de la influencia real que tienen en el proceso de secado de papel.

Según se observa en la Tabla 5.7, se confirma una fuerte correlación entre la Temperatura del aire de soplado de campana (Ebt) y la temperatura de aire de extracción de campana (Eat). También hay una correlación fuerte entre la temperatura exterior (Ot) y la temperatura de aire de soplado de campana (Ebt). Se observa que la correlación débil entre la temperatura exterior (Ot) y la temperatura del papel a la entrada de la sección de secado (Pti) es muy baja y despreciable entre la temperatura exterior (Ot) y la temperatura del papel a la salida de la sección de secado (Pto). Esto se debe a que el calentamiento del papel se hace principalmente por medio del vapor que alimenta a los cilindros secadores

Parámetros analizados	Correlación
$Wt - Pti$	0,3901044
$Ot - Pti$	0,2445758
$Ot - Ebt$	0,5212255
$Ot - Eat$	0,5903217
$Ot - Pto$	0,0389980
$Ebt - Eat$	0,8519887
$Ebt - Pto$	0,0265823
$Ebt - Pto$	0,1122943

Tabla 5.7. Correlación de temperaturas de proceso con temperatura exterior

La temperatura exterior (O_t) afecta directamente a la temperatura de aire de soplado de campana (E_{bt}) y a la temperatura de aire de extracción de campana (E_{at}). Sin embargo esta temperatura exterior no afecta apenas a la temperatura del papel a la entrada de la sección de secado (P_{ti}) ni a la de temperatura del papel a la salida de la sección de secado (P_{to}).

5.9.2.- Diseño del experimento

Partiendo de la información de la Tabla 5.4, Tabla 5.6 y Tabla 5.7 y para intentar reducir el número de variables a utilizar en el experimento, se toma en consideración únicamente la sección de secado. se ha seleccionado el diseño de experimentos o arreglos ortogonales de Taguchi

En nuestro caso se ha seleccionado el arreglo ortogonal de Taguchi, en particular L18 ($2^1, 3^7$) como diseño de control y L4 (2^3) como diseño de ruido. Los factores controlables son 4 (P_d , P_{mo} , P_{wi} y P_{mi}) con tres niveles y un factor (P_{ti}) con dos niveles.

Los factores no controlables se reducen a la temperatura exterior (O_t) que en nuestro caso tiene dos niveles que corresponden a las variaciones exteriores en las condiciones medioambientales, por encima y por debajo de la temperatura media exterior anual.

Las variables y niveles que se consideran para el experimento son:

P_d , Gramaje del papel fabricado, se identifica un grupo homogéneo formado por los gramajes de 150 y 650 g/m². Para el estudio partiremos el rango de producción en tres secciones (200-350, 350-500 y 500-650) por constatarse que el comportamiento de la máquina y los principales parámetros operativos en estos rangos es homogéneo.

P_{mo} , Humedad del papel a salida de la sección de secado, Para el estudio partiremos el rango de producción en tres niveles (6-6,5; 6,5-7 y 7-7,5) por ser los estándares establecidos en la fábrica.

Pwi Ancho del papel a entrada de la sección de secado, consideraremos tres niveles (1,800-1,875; 1,875-1,975; 1,975-2,030). El habitual es el rango central en el que se considera que la máquina funciona dentro de parámetros óptimos. No obstante y por requerimientos de cliente este ancho puede variar entre 1,800 y 2,030 siendo necesario considerarlos por ser habituales.

Pmi Humedad del papel a entrada de la sección de secado, consideraremos tres niveles (50-52; 52-55 y 55-60).

Pti Temperatura del papel a entrada de la sección de secado, consideramos dos niveles (Baja, temperatura menor que 32,5°C y alta temperatura mayor de 32,5°C).

Ot, Temperatura Exterior, en la Tabla 5.7 se constató la influencia que tiene la temperatura exterior en el indicador. Para el experimento se considera un factor de ruido. Se han eliminado las temperaturas extremas y se han definido dos niveles (Baja, temperatura exterior menor que la media 0-14°C y Alta, temperatura exterior superior a la media 15-30°C).

Se plantea un experimento en el que se toma como variable dependiente el indicador objeto de estudio, “t CO₂ / t Producción”. Considerando los factores indicados anteriormente *Pti*, *Pd*, *Pmo*, *Pwi*, *Pmi* y el factor de ruido *Ot*, se obtienen un total de 72 posibles combinaciones.

Llevaremos a cabo un análisis multifactorial de la varianza “ANOVA Tipo III Suma de Cuadrados” para el indicador “t CO₂ / t Producción”. A través del análisis de varianza identificaremos que factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre el indicador.

También evalúa las interacciones significativas entre los factores, teniendo en cuenta los datos. Mediante la construcción de una tabla ANOVA se identificarán los factores significativos. Mediante el uso de gráficos se pondrá de manifiesto si los supuestos obtenidos en el análisis de varianza son correctos.

Los factores significativos se identifican en la tabla de ANOVA (Tabla 5.8). Todos los F-ratios están basados en residuo del error medio cuadrado. Tabla 5.8 se obtiene la variación del indicador “t CO₂ / t Producción”, debido a los factores considerados, eliminando cada vez el efecto de los otros factores. El factor P-Valor

indica que los factores *Pd* y *Ot* son estadísticamente significativos al tener un valor inferior a 0.05. La Figura 5.26 muestra la variación de cada parámetro con el indicador.

Notación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrados	F-Ratio	P-Valor
<i>Pti</i>	3,80112E-7	1	3,80112E-7	0,01	0,9346
<i>Pd</i>	0,000660333	2	0,000330166	5,90	0,0045
<i>Pmo</i>	0,000269376	2	0,000134688	2,41	0,0986
<i>Pwi</i>	0,000034463	2	0,0000172315	0,31	0,7361
<i>Pmi</i>	0,000180883	2	0,0000904416	1,62	0,2070
<i>Ot</i>	0,0014619	1	0,0014619	26,13	0,0000
Residual	0,00341272	61	0,0000559462		
Total	0,00602005	71			

Tabla 5.8. ANOVA para “t CO₂/ t Producción”

La densidad superficial (*Pd*) depende de las especificaciones del cliente y es un parámetro con respecto al cual no se puede tomar ninguna acción. La información que proporciona, sin embargo, puede ser útil para conocer los datos necesarios para que los clientes puedan tener este valor en cuenta como criterio para seleccionar nuestro papel como materia prima y poder establecer así mismo la huella de carbono de sus propios proyectos de desarrollo de productos.

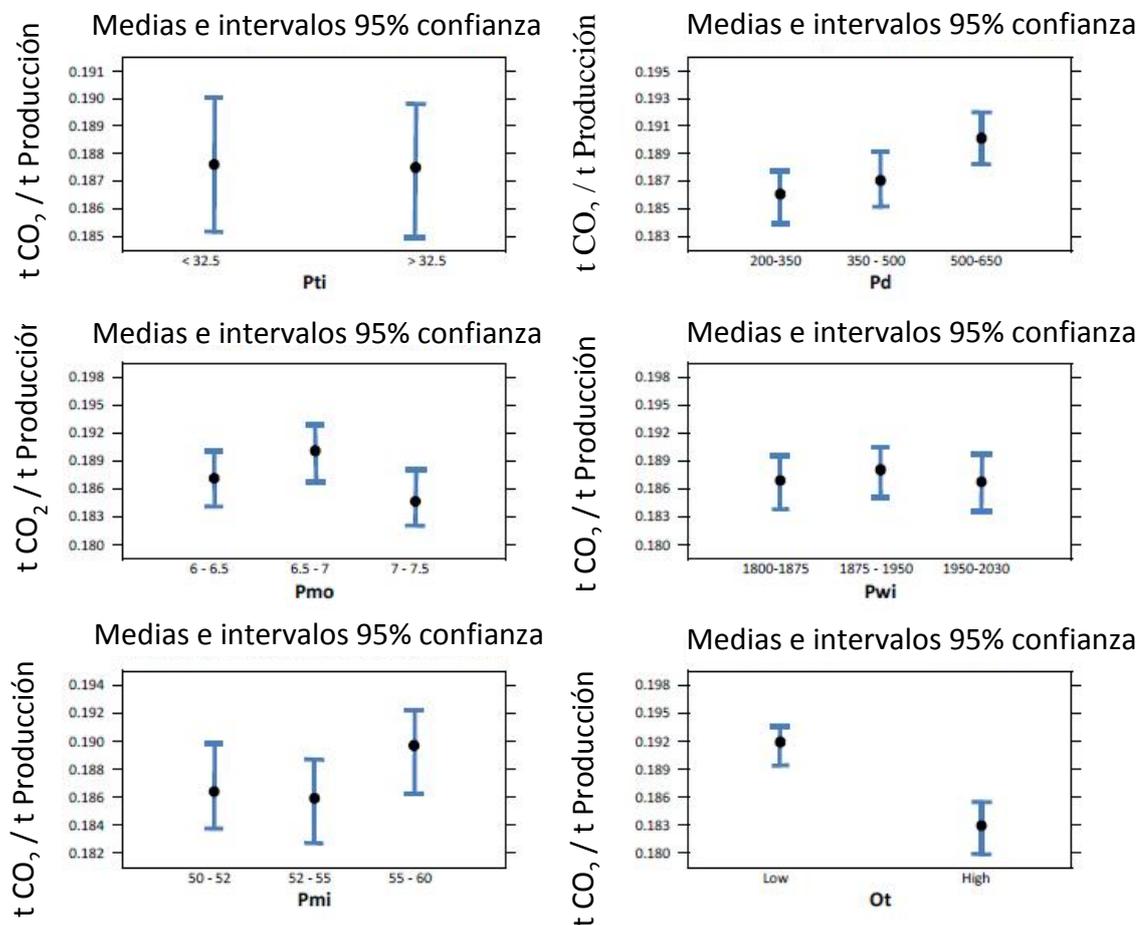


Figura 5.26. Media e intervalos de confianza de los principales parámetros respecto al indicador “ $t \text{ CO}_2 / t \text{ Producción}$ ”.

5.9.3.- Hallazgos del análisis

La Tabla 5.9 muestra las medias de los mínimos cuadrados para el indicador “ $t \text{ CO}_2 / t \text{ Producción}$ ” con un intervalo de confianza del 95,0%, también se pueden ver las media de emisiones calculadas para cada factor y nivel, el error estándar de cada media y el error estándar de cada media. Las dos columnas de la derecha muestran intervalos de confianza del 95,0% para cada uno de los medias.

Factor	Nivel	Número experimentos	Media	Error	Límite inferior	Límite superior
Media		72	0,187572			
Pti	<32,5	36	0,187645	0,00124662	0,185152	0,190138
	>32,5	36	0,187500	0,00124662	0,185007	0,189993
Pd	200-350	24	0,184306	0,00152679	0,181253	0,187359
	350-500	24	0,186807	0,00152679	0,183754	0,18986
	500-650	24	0,191604	0,00152679	0,188551	0,194657
Pmo	6-6,5	24	0,187488	0,00152679	0,184435	0,190541
	6,5-7	24	0,189982	0,00152679	0,186929	0,193035
	7-7,5	24	0,185247	0,00152679	0,182194	0,188300
Pwi	1800-1875	24	0,187221	0,00152679	0,184168	0,190274
	1875-1950	24	0,188539	0,00152679	0,185486	0,191592
	1950-2030	24	0,186958	0,00152679	0,183905	0,190011
Pmi	50-52	24	0,186924	0,00152679	0,183871	0,189977
	52-55	24	0,186039	0,00152679	0,182986	0,189092
	55-60	24	0,189755	0,00152679	0,186702	0,192808
Ot	Bajo	36	0,192078	0,00124662	0,189586	0,194571
	Alto	36	0,183066	0,00124662	0,180574	0,185559

Tabla 5.9. Resultados medias y límites de cada factor y nivel del indicador “t CO₂ / t Producción”.

El factor humedad del papel a salida de la sección de secado (*Pmo*) tiene un comportamiento especial. El indicador toma valores máximos en el centro del intervalo (6,5-7), reduciéndose en los extremos. El mínimo se consigue con valores del (7-7,5), consigna a la que se debería tender siempre y cuando los perfiles transversales de humedad fuesen lo suficientemente estables. La consigna de humedad (6,2 – 6,7 y 7,2) se fija en función de la variabilidad de humedad requerida y el máximo pico que el cliente puede admitir y que está asociado a su proceso de transformación del papel. A menor pico de humedad requerido menor es la media de consigna, pero por el contrario menor es la producción y menos homogéneas las características del papel.

El parámetro humedad del papel a la entrada de la sección de secado (P_{mi}) tiene un comportamiento especial, como se ve en la Figura 5.26 “Media e intervalos de confianza de las principales variables respecto al indicador “t CO₂ / t Producción”, el valor que permite minimizar el indicador se sitúa en el centro. Este hecho se constata experimentalmente en máquina y no tiene a priori explicación técnica pero si constatación práctica. Una mayor sequedad de entrada no se traduce en una disminución del indicador. El hecho previsible de que a menor sequedad de entrada menor valor del indicador no se constata ni estadísticamente ni prácticamente.

La temperatura exterior (O_t) es el parámetro que se constata como más influyente en el indicador y que además es un factor no controlable. Este hecho indica que la influencia puede estar originada por al menos dos factores básicamente:

Deficiente estado del aislamiento de la instalación, lo que provoca que el efecto de la temperatura exterior (O_t) sobre las condiciones interiores de la sección de secado (E_{at}) sea muy significativa.

Deficiente estado de los intercambiadores de calor y sistema de recuperación, lo que puede provocar que la Temperatura de Soplado (E_{bt}) se vea afectada significativamente por la temperatura exterior (O_t).

Según se observaba en la Tabla 5.7, se constata la fuerte correlación entre la Temperatura Exterior (O_t) y la Temperatura de Soplado de campana (E_{bt}).

La combinación de factores que a priori minimiza el indicador “t CO₂ / t Producción” en esta fábrica en concreto corresponde a:

P_{wi} : el óptimo se sitúa en la mitad del rango (1,875-1,950 m de ancho de papel).

P_d ; se observa que a mayor gramaje se produce un incremento del indicador.

P_{ti} ; debe ser lo más alto posible (>32 °C).

P_{mi} ; debe estar en la mitad del rango (52-55% de contenido de humedad)

P_{mo} ; la peor combinación se produce en el rango intermedio (6,5-7% de contenido de agua). Este objetivo se ve afectado por el perfil de humeado.

Ot, un factor no controlable, un alto valor de este parámetro se suele corresponder con los valores del indicador más bajos.

5.10.- RELACIÓN ENTRE EL INDICADOR Y LAS OPERACIONES DE MANTENIMIENTO DE FÁBRICA

Esta sección del estudio comienza analizando la definición histórica y la aplicación de los indicadores relacionados con el indicador principal objeto de estudio en la Tesis, “t CO₂ / t Producción”, las pautas de mantenimiento establecidas y las reformas menores propuestas e implementadas que han contribuido a la reducción del indicador considerado “t CO₂ / t Producción” en un 21% de promedio entre los años 2005 y 2013 y alrededor de 30% desde el año 2001, como se puede constatar en la Figura 5.27.

El estudio llevado a cabo en este apartado se basa en la toma de datos histórica de producción de papel desde el año 2005 al 2013, siguiendo lo establecido en el Capítulo 3- *Metodología y equipos utilizados*”, por ser un período representativo en el que no había ni cambios importantes en las condiciones de la máquina ni alteraciones que cambiaron su capacidad de producción.

Los más importantes sub-indicadores implementadas por orden cronológico, con cuyo control ha sido posible reducir al máximo el indicador “t CO₂ / t Producción” es el volumen de agua fría (*Cw*) añaden al circuito de la caldera (denominada agua fresca) y la temperatura del aire soplado a la campana de la sección de secado del papel (*Ebt*).

A continuación se describe en detalle la implementación del indicador de “agua fresca” de alimentación al circuito de caldera (*Cw*), el resto de indicadores se han implementado de la misma manera y sólo se explicada, la situación de partida inicial, las medidas adoptadas por orden cronológico y el resultado final.

5.10.1.- Agua de reposición al circuito de caldera

Este indicador afecta a todo el sistema de generación, transporte, utilización del vapor y retorno de condensados. El vapor, como se ha explicado en el Capítulo 4.- *El proceso de fabricación del papel*”, es el vehículo principal de transporte de la energía necesaria para el secado del papel. En una situación ideal todo el vapor producido en el generador de vapor se envía a la sección de secado para calentar los cilindros secadores donde se condensa. El condensado debe volver nuevamente al generador de vapor para recuperar la energía y volver al proceso. En el proceso de generación, transporte, uso y retorno del condensado se pueden producir pérdidas de flujo o intercambios térmicos no deseados que pueden afectar a la eficiencia de todos los procesos que lo utilizan, como la caldera, la campana de secado, los recuperadores de calor, la línea de transporte de vapor y el retorno de condensados.

El esquema simplificado del proceso se puede ver en la “Figura 4.1 *Diagrama del proceso*”, y la operativa del indicador se explica en apartado “4.2.1. *Sistema de agua fría añadida al circuito de la caldera*”.

El primer indicador introducido en la fábrica objeto de análisis fue la cantidad total de agua fría (C_w) que es necesario añadir al tanque de alimentación de caldera con el fin de mantener el nivel de tanque de alimentación que suministra al generador de vapor para asegurar la cantidad de vapor necesario exigido por sección de secado. El retorno de condensado representa un enorme potencial de ahorro de energía en energía y emisiones de CO_2 .

Las pérdidas de condensado y vapor que se pueden producir en el circuito pueden ser evitables, cuando el origen es el mal funcionamiento de un equipo y las pérdidas accidentales de fluido, o inevitables cuando son necesarias para el buen funcionamiento de los equipos.

Las purgas de agua en el generador de vapor pueden considerarse como necesarias para mantener los parámetros interiores de caldera en valores seguros y también necesarios para una correcta generación de vapor en la caldera y la calidad del vapor.

En el proceso de generación de vapor de la caldera, las impurezas y sales disueltas que están en el agua de alimentación y que no son vaporizadas y transportadas

con el vapor de agua se concentrará en el interior de la caldera. Los sólidos disueltos se vuelven con cada ciclo de vaporización más y más concentrados, las burbujas de vapor tienden a ser más estables, ascienden por el flujo de agua y tienden a acumularse y/o estallar a medida que alcanzan la superficie del agua de la caldera donde se genera el vapor.

Llega un punto (dependiendo de la presión de la caldera, el tamaño, y la carga de vapor), se produce saponificación y una parte sustancial del espacio de vapor dentro del generador destinado a vapor se llena con burbujas de espuma que arrastra agua junto con el vapor principal.

Este hecho no es deseable por obtenerse un vapor excesivamente húmedo a la salida de la caldera. Este vapor contiene por arrastre agua con un alto nivel de sólidos disueltos y tal vez en suspensión. Los sólidos arrastrados contaminan las válvulas de control, intercambiadores de calor y pueden llegar a dañarlos.

Un control adecuado de los Sólidos Totales Disueltos (*Total Dissolved Solids, TDS*) junto con el control de nivel de agua del interior de la caldera asegura que se reduzcan al mínimo que los riesgos de formación de espuma y arrastre de la misma hacia el circuito de vapor.

La tasa de purga teórica (*Bdr*) de la caldera se calcula como el equilibrio de sólidos disueltos totales (*TDS*) Ecuación (5.9). La diferencia entre ellos y el agua fría añadido total al tanque de alimentación (*Cw*), lo constituyen las pérdidas de la instalación. *Cw* por lo tanto es un indicador indirecto de las pérdidas de vapor que se producen en la instalación.

$$Bdr = \frac{(TDS\ Ag\ alim \times Vapor\ Gen)}{(TDS\ Req\ Ag\ Cald - TDS\ Ag\ alim)} \quad (5.9)$$

Donde:

TDS Ag alim; corresponde a los sólidos totales disueltos contenidos en el agua de alimentación de caldera (ppm).

Vapor Gen; corresponde al caudal de vapor generado por la caldera analizada (kg/h).

TDS Req Ag Cald; requerimientos de calidad del agua de caldera, respecto a TDS, de acuerdo con la norma EN 12953 (2003).

La diferencia entre la purga teórica (*Bdr*) y el agua fresca añadida al circuito de caldera (*Cw*) corresponden a las pérdidas de la instalación (*Il*). Esta relación se muestra en la ecuación (5.10).

$$Il = Cw - Bdr \quad (5.10)$$

Las principales fuentes de pérdidas en el circuito de vapor y condensado (*Il*), que son la causa de tener que proporcionar más agua fresca al depósito nodriza (*Cw*) que la requerida por las purgas de la caldera *Bdr* son los siguientes:

Exceso de purga en los generadores de vapor.

Las trampas de vapor.

Juntas rotativas instaladas en los cilindros secadores para la entrada de vapor a los mismos y la extracción de condensados.

Las pérdidas en las bombas de circulación por el sello mecánico, sellos de las válvulas, uniones entre tuberías, etc.

El vapor flash producido en los tanques atmosféricos, en los que el condensado se transforma nuevamente en vapor debido a la disminución de presión.

Para controlar estos parámetros, en la fábrica objeto de estudio diseñaron un sistema de monitorización del circuito básico de la caldera, el consumo de vapor y la recuperación de condensado.

La diferencia con los sistemas tradicionales de control, consistía en la asignación de la gestión de estos indicadores al personal que realmente tiene la tarea de recolectar estos parámetros diariamente en lugar de asignarlo al personal de laboratorio que estaba encargado de realizar el seguimiento con una cadencia mayor.

Con este cambio organizativo se consigue involucrar al personal encargado de la recolección de datos a primer nivel en el control de los indicadores de rendimiento de proceso relativos al circuito de vapor y condensados II y C_w , asignándoles así mismo la responsabilidad de su evolución y control.

El personal encargado de esta nueva tarea fue formado adecuadamente. En previsión de posibles fallos del nuevo sistema de monitorización y control, se previó un sistema de auditorías cuya cadencia se han ido adaptando a los éxitos en el control de los indicadores. Conforme se constataba la correcta gestión de los indicadores introducidos, se posibilitó la disminución de la frecuencia de control de dichos parámetros por parte del personal técnico y/o especializado.

En este sentido, el personal fue entrenado para hacer estos chequeos, con el fin de verificar que las medidas de los parámetros y la interpretación de los resultados es correcta se instauró un sistema de seguimiento de proceso que posibilitó la disminución de la frecuencia de control de dichos parámetros por parte del personal técnico y/o especializado cuando se comprobó que la interpretación era adecuada.

Para controlar el nivel de Bdr e II relativos a caldera, se monitorizaron diversos parámetros y variables de la caldera como pH y TDS en el agua de alimentación y el agua de la caldera.

Si TDS disminuye en el agua del interior de la caldera, según la Ecuación (5.9), la cantidad de agua de purga (Bdr) es más alta de lo necesario, requiriéndose un reajuste de la frecuencia de purga. Por otro lado, si se observa un incremento de los TDS del agua del interior de la caldera, se debe incrementar el flujo de purga.

En la tabla 5.10.a y 5.10.b se pueden observar los resultados, desde el año 2004 hasta el 2013 del control de estos parámetros y variables de proceso, así como las consecuencias en pérdidas energéticas y emisiones de CO_2 que afectan directamente al indicador. Donde:

D_p , corresponde a los días de producción del año.

Producción (t), corresponde a la media diaria de producción de papel en el periodo considerado.

S_f (t), corresponde a la media diaria de consumo de vapor en toneladas en el periodo considerado.

C_w añadida (m^3) corresponde a la media diaria de agua fresca añadida al circuito de vapor en el periodo considerado.

B_{dr} purgas teóricas (m^3), corresponde a la media diaria de purgas teóricas en el periodo considerado.

Pérdidas en la instalación II (m^3), corresponde a la media diaria de pérdidas en la instalación.

Pérdidas diarias en kWh, corresponde a la media diaria de pérdidas en kWh en la instalación por II en el periodo considerado.

P_{de} Pérdidas diarias en emisiones de CO_2 , media diaria de pérdidas de emisiones de CO_2 en la instalación por II en el periodo considerado.

P_{ae} Pérdidas anuales de CO_2 , corresponde al total anual de pérdidas de emisiones de CO_2 en la instalación por II en el periodo considerado.

Emisiones de CO_2 de Fábrica, corresponde a las emisiones anuales declaradas por la instalación en el periodo considerado.

% de pérdidas de emisiones respecto al total de emisiones, corresponde al porcentaje de las emisiones pérdidas debidas a las pérdidas en la instalación.

Cuando la purga se ajusta correctamente, las pérdidas del sistema (II) provienen del sistema de distribución y consumo. Con la monitorización continua de este indicador por parte del personal del primer nivel de acción se puede reducir significativamente el tiempo de reacción para la búsqueda del origen de la variación del indicador y así poder actuar antes para corregirlo.

Según los datos disponibles referentes al histórico de mantenimiento de la fábrica, las principales pérdidas en el circuito de vapor provienen de las juntas rotativas instaladas en los cilindros secadores de la sección de secado. Las juntas rotativas son los elementos responsables de introducir el vapor en el cilindro secador y quitar condensado formado debido al enfriamiento que sufre por la energía transferida por el vapor a la hoja de papel.

	2004	2005	2006	2007	2008
<i>Dp</i>	344,5	351,0	350,2	345,0	341,0
Producción (t)	121,3	124,2	127,6	133,2	131,3
<i>Sf</i> (t)	238,3	240,4	254,0	246,9	221,3
<i>Cw</i> añadida (m ³)	44,5	50,4	59,3	48,0	33,4
Purgas teóricas (m ³)	4,8	4,8	5,1	4,9	4,4
Pérdidas instalación <i>Il</i> (m ³)	39,7	45,6	54,2	43,1	29,0
kWh perdidos diarios	26.314,8	30.264,7	35.920,4	28.554,4	19.224,5
Pérdidas diarias CO ₂ <i>Pde</i>	5,3	6,1	7,2	5,7	3,9
Pérdidas anuales CO ₂ <i>Pae</i>	1.821,1	2.133,9	2.527,3	1.978,9	1.316,9
Emisiones de fábrica CO ₂	12.186,1	12.698,1	13.015,4	12.582,7	11.801,0
% de pérdidas respecto al total de emisiones	14,9	16,8	19,4	15,7	11,2

Tabla 5.10.a. Media diaria de producción de vapor y agua (*Cw*) añadida al circuito, debido a las purgas de caldera y a las pérdidas de vapor en la sección de secado 2004-2008.

	2009	2010	2011	2012	2013
<i>Dp</i>	313,7	339,0	335,0	334,0	317,0
Producción (t)	133,5	134,9	135,6	134,1	137,6
<i>Sf</i> (t)	225,8	202,7	213,2	202,3	207,4
<i>Cw</i> añadida (m ³)	24,0	20,3	16,4	10,1	13,5
Purgas teóricas (m ³)	4,5	4,1	4,3	4,0	4,1
Pérdidas instalación <i>Il</i> (m ³)	19,5	16,2	12,1	6,0	9,3
kWh perdidos diarios	12.941,4	10.746,6	8.028,4	4.002,1	6.193,5
Pérdidas diarias CO ₂ <i>Pde</i>	2,6	2,2	1,6	0,8	1,2
Pérdidas anuales CO ₂ <i>Pae</i>	815,6	731,8	540,3	268,5	394,4
Emisiones de fábrica CO ₂	10.839,3	11.559,4	11.232,1	10.340,4	9.739,2
% de pérdidas respecto al total de emisiones	7,5	6,3	4,8	2,6	4,0

^a Energía del vapor, (entalpía vapor 2387.178 kJ/kg vapor saturado a 7.1 bar(a) de presión, agua de entrada a caldera 90 °C)

Tabla 5.10.b. Media diaria de producción de vapor y agua (*Cw*) añadida al circuito, debido a las purgas de caldera y a las pérdidas de vapor en la sección de secado 2009-2013.

Asumiendo una correcta instalación de las juntas rotativas y que no hay defectos en la alineación de las mismas, las principales causas que pueden provocar las pérdidas de vapor en juntas rotativas provienen de desgaste del sello de carbono encargado de hacer el cierre entre los dos circuitos, el de entrada de vapor y el de retorno de los condensados.

Debido a la observación del indicador relativo a las pérdidas en la instalación (II), el CMS redefinió las reglas establecidas hasta el momento en fábrica respecto a su mantenimiento. Inicialmente el procedimiento establecía la sustitución de toda la junta rotativa cuando se detectaban principios de fuga de vapor. Si la pérdida de vapor, observada de manera subjetiva por el personal de mantenimiento, no era significativa el procedimiento establecido indicaba que no se sustituía la junta rotativa. En este escenario el sistema seguía perdiendo vapor.

La sustitución de la junta rotativa se posponía hasta el siguiente mantenimiento programado de máquina (entre 3 y 5 semanas). Si durante ese tiempo se producía aumento significativo de la fuga, se dejaba el secador fuera de servicio hasta la siguiente parada técnica programada.

Hay que tener en cuenta que un cilindro secador cerrado implica disponer de menos área de calentamiento del papel y por consiguiente, de menor capacidad de secado, produciendo ineficiencia en la sección de secado.

Para solucionar este hecho que se venía produciendo, y fruto del análisis del indicador expuesto (II) se desarrolló una estrategia de mantenimiento no utilizada hasta la fecha involucrando un sistema de control de desgaste de los sellos de grafito de la propia junta rotativa.

En lugar de utilizar al personal cualificado necesario para la sustitución y ajuste de la junta rotativa, se desarrolló un nuevo sistema basado en la medición de la posición relativa de ciertos puntos de la junta rotativa respecto al cilindro secador.

La junta rotativa ya disponía de “tapas de acceso” para verificar el estado de la junta rotativa, pero solo se podía observar de esta manera una pequeña porción del estado del sello. El nuevo desarrollo se basa en la consideración de la posición relativa de la junta respecto al cilindro secador y su desviación tanto en posición absoluta como en la desviación angular de la misma sobre el eje de rotación.

El cambio de la estrategia de mantenimiento facilitó la implementación de un programa de seguimiento que concluyó con el mantenimiento preventivo de las propias juntas rotativas. En lugar de tomar la acción de sustitución correctiva del elemento, con la implementación de este sistema se redujeron las pérdidas de vapor y se permitió un sistema para maximizar la cantidad de recuperación de condensado (C_w). Esta acción sólo se ha llevado a cabo desde que la responsabilidad del control del indicador se asignó al personal responsable de la recolección de esta variable (C_w).

5.10.2.- Temperatura de soplado de aire a la campana de secado

Este indicador afecta directamente a la eficiencia del sistema de secado y a la posterior recuperación de calor del sistema de campana secadora.

Para determinar el caudal de aire de soplado a la campana, se parte de las curvas de características técnicas de los ventiladores asociados, incluidas también las curvas de consumo de los sistemas de ventilación, las dimensiones y forma de los conductos para determinar el flujo de aire (m^3) que se introduce en la campana para compensar la extracción. Estos caudales se han comprobado con la media del flujo de aire mediante el informe OCA de medición de caudales para comprobar la consistencia de los cálculos.

A partir de los datos de consumo eléctrico del motor, y otros parámetros como la densidad del aire, temperatura, etc. se determina el punto de funcionamiento del grupo motor-ventilador. Flujos de diseño iniciales de la instalación fueron:

Flujo de aire extraído - $85.000 m^3/h$

Flujo de aire soplado - $59.500 m^3/h$

Por lo que la diferencia entre extracciones y soplado es de $25.500 m^3/h$.

En el interior de la campana, como ya se ha indicado anteriormente, y a pesar de las condiciones de temperatura externa de soplado de aire y temperatura de entrada de papel en la sección de secado, la salida de aire y del papel permanece prácticamente constante alrededor de $95^\circ C$. Teniendo en cuenta que la temperatura de aire de soplado

es de 85°C aproximadamente, la energía añadida a los dos flujos de aire proviene directamente del calentamiento de los cilindros secadores. Los cilindros secadores se calientan mediante el vapor suministrado por el generador de vapor, responsable en nuestro caso de las emisiones de CO₂.

Las primeras medidas tomadas en febrero de 2011 revelan respecto del aire de extraído de la campana un caudal de 60.948 kg/h (49°C y 0,078 kg H₂O/kg de aire seco) mientras que el aire de soplado era de 29.225 kg/h (97°C y 0,015 kg H₂O/kg de aire seco). Esta medida indica que la diferencia entre extracción y soplado es de 31.219 kg/h que proviene de los insumos de la nave de fabricación y que tiene unas características de (21°C y 0,007 kg H₂O/kg de aire seco) según se explica en la sección 5.10 *Relación entre el indicador y el aislamiento de campana*, donde se determina el origen de la energía de este aire.

El origen de esta diferencia en los caudales de aire, tanto soplado como extraído, lo constituye el inadecuado estado de mantenimiento de los intercambiadores de calor. En este caso los indicadores de rendimiento de funcionamiento con afección al indicador considerado “t CO₂/ t Producción” lo constituyen los caudales de aire, la temperatura (E_{at}) y humedad (E_{am}) del flujo de aire de extracción así como la temperatura de soplado (E_{bt}) y humedad (E_{bm}) del mismo.

Las medidas de flujo de aire, la temperatura (T_i) y la humedad relativa (H_{ri}) se han tomado antes y después de la limpieza y acondicionamiento de los intercambiadores. La diferencia entre las dos entalpías ha sido determinada por el diagrama de Mollier (1929), que se utiliza para determinar la energía ahorrada después de la reparación y la limpieza del intercambiador.

Para manejar esos indicadores, de la misma manera que se hizo con el indicador de rendimiento *II* fueron asignados al primer nivel de la acción de la tarea a realizar un seguimiento de los parámetros con la frecuencia adecuada para poder predecir el punto de pérdida de rendimiento en el que es necesario hacer intervenciones externas. Las intervenciones no se pueden programar únicamente con frecuencia temporales, debido a que el ambiente exterior es muy cambiante en cuanto a contenido de suciedad del aire.

La disminución del flujo de soplado E_{bt} se traduce en un aumento del aire de compensación de la nave de producción y por consiguiente trae como consecuencia un mayor consumo de vapor aumentándose también el indicador “t CO₂ / t Producción” objeto de estudio.

Como se puede observar en la Figura 4.1. Diagrama del proceso, el aire de entrada pasa a través de una serie de tres intercambiadores de calor, cada uno de los cuales tiene una fuente de energía a intercambiar distinta que es la encargada de transmitir energía al flujo de aire soplado. Las acciones llevadas a cabo inicialmente debido a las medidas de la temperatura fueron;

Intercambiador Aire -Aire, aprovecha la energía del flujo de aire extraído del interior de la campana de secado para calentar aire soplado. Este intercambiador calienta el aire desde la temperatura externa hasta 45°C. Este intercambiador principalmente se ensucia por depósitos de polvo y también pueden romperse los tubos de vidrio del intercambiador en la puesta en marcha debido a las diferencias de temperatura de los flujos de aire. En concreto se han llegado a encontrar deteriorados hasta un 20% de los tubos del intercambiador. La limpieza inicial y el reemplazo de los tubos se llevaron a cabo en julio de 2011.

Intercambiador agua - aire, aprovecha la energía contenida en el caudal de agua de retorno del condensado a la caldera (C_w) para calentar el aire soplado hasta 75°C. Este intercambiador no tiene elementos susceptibles de romperse por estar construido en acero pero si puede cegarse parte de su superficie por polvo. La limpieza de este intercambiador también se llevó a cabo en julio de 2011.

Intercambiador de vapor flash, aprovecha el vapor Flash generado en el último tanque de recogida de condensado de baja presión, calienta el aire soplado a 95°C. Este intercambiador tampoco tiene elementos susceptibles de romperse por estar construido en acero pero si puede cegarse parte de su superficie por polvo. La limpieza se llevó a cabo en julio de 2011.

La temperatura alcanzada por el sistema de intercambiador de aire soplado es de 97°C, pero sólo por 29.734 kg/h. la diferencia entre el aire extraído y el soplado es suministrado por los insumos desde la nave de fabricación, que tiene unas características de (20°C y 0,12 kg H₂O/kg de aire seco) en lugar de 55.097 kg/h (92°C y 0,015 kg H₂O / kg de aire seco).

Las emisiones de CO₂ asociadas a la pérdida de energía se calculan a través del TJ de energía suministrada al flujo de soplado de aire caliente de real a la temperatura deseada. Esta energía (TJ) proviene exclusivamente de la energía producida en la caldera para generar vapor que suministra vapor a la sección de secado. Esta generación

de vapor de la caldera utilizada exclusivamente gas natural como fuente de energía. Las emisiones pueden calcularse entonces usando la metodología empleada en el apartado “3.3- *Determinación de las emisiones de CO₂*”, que tiene en cuenta la energía proporcionada TJ al aire y las emisiones asociadas a esta energía y que provienen del consumo de gas natural necesaria para calentar el aire mediante el calor de los cilindros secadores en la sección de secado.

Flujo de aire	T_i (°C)	H_{ri} (%)	g H ₂ O/ kg aire	Presión (kPa)	Densidad kg/m ³	Caudal m ³ /s	Entalpía kJ/kg	Energía MJ
Extracción	49	93	78,1	101,32	0,9	1.075,1	238	15.322
Soplado	97	3	15	101,32	0,9	548,2	124	4.078
Compensación	21	18	8	101,32	1,1	516,6	60	1.844
Extracción	54,7	66	72,5	101,32	0,9	1.416,7	244	20.706
Soplado	92,4	2	15	101,32	0,9	991,7	111	6.583
Compensación	21	18	8	101,32	1,1	425,0	60	1.530

Tabla 5.11. Datos del aire antes y después de la reparación de los intercambiadores.

Posteriormente se calculan las pérdidas de energía y emisiones, y se comparan con la diferencia de temperatura en el aire de soplado E_{bt} a la campana con el indicador objeto de análisis en la presente Tesis “t CO₂ / t Producción” para determinar la relevancia de estas pérdidas.

Siguiendo la metodología descrita en la sección 3.9 y los datos de flujo de aire y la energía asociada a cada uno de ellos, en la Tabla 5.11 y 5.12 obtenemos los resultados de los cálculos de energía y los resultados de las emisiones asociadas.

La producción promedio en el periodo considerado de la fábrica, en t con humedad del 6% es de 5,75 t / h, la única fuente de energía utilizada para el secado del papel proviene como ya se ha indicado anteriormente del vapor generado en una sola caldera que tiene en exclusiva el consumo de gas natural suministrado a la fábrica. Este hecho hace factible el asociar las emisiones de CO₂ con las pérdidas de energía del sistema de aire de campana.

El consumo medio de energía en kWh por cada tonelada de papel en el periodo de referencia es de 1.190 kWh. Con estos datos, se calcula en la Tabla 5.12, la significancia de la parte de la energía perdida en el aire soplado a campana y que corresponde a 10,17% de la energía total utilizada en el secado térmico de papel.

	kWh	Emisiones de CO ₂		
	Por hora	Por hora (t)	Total año (t)	%
Diferencia en aire soplado	695,94	0,125821	1.011,60	10,17
Energía total consumida	6.842,50	1,237069	9.946,04	

Tabla 5.12. Balance de emisiones, porcentaje de pérdidas por calentamiento de los flujos de aire.

5.11.- RELACIÓN ENTRE EL INDICADOR Y EL AISLAMIENTO DE CAMPANA

En los apartados anteriores se ha puesto de manifiesto que hay una relación directa entre las pérdidas de energía debidas a los flujos de aire de campana y las emisiones de CO₂. En el apartado 5.9 al tener en cuenta los insumos de aire de campana se ha indicado que el aire de la nave de fabricación tiene una temperatura entre 20-21 °C independientemente de la temperatura exterior. Hay que tener en cuenta que la nave de fabricación no tiene sistema de acondicionamiento de aire (calefacción). El calor aportado al aire exterior y que se mantiene en la nave de producción durante todo el año proviene principalmente por las pérdidas térmicas de la campana de secado.

Recordamos que el estudio actual se aplica al cálculo de las pérdidas de calor de la sección de fabricación de papel. La máquina de papel tiene una capacidad de producción anual de 55.000 toneladas. Utiliza como materia prima papel 100% reciclado post-consumo. Produce papel sin recubrimiento denominado “Core board” con gramaje entre 150 y 650 g/m² según la norma ISO 536, que es la referencia estándar en el sector de fabricación de papel (ISO 536, 2012).

En esta sección estudiaremos el estado actual de la campana de secado para cuantificar las pérdidas de energía en la instalación debido a los fallos de aislamiento, la falta de estanqueidad entre los paneles debido a fallos de ajustes o posicionamiento

incorrecto de piezas y deterioro de los sistemas de acceso tales como puertas automáticas, puertas manuales, paneles, etc.

Esta parte del estudio se basa en el análisis de los datos de producción del año 2012, periodo representativo de la fábrica en el que no se han producido cambios en las condiciones de la máquina ni se han llevado a cabo reformas que alteren su capacidad de producción.

5.11.1.- Estudio de los flujos de aire

Como punto de partida del estudio, se han identificado las corrientes de aire principales de aire, tanto de entrada como de salida, de la nave de producción. La diferencia de entalpía entre las corrientes de aire medidas se relaciona con las fuentes de calor situadas en la nave e producción, permitiéndonos identificar tanto la cantidad de energía perdida como la importancia de cada foco. Esta identificación y cuantificación permitirá establecer pautas y prioridades para su corrección.

La sala de fabricación objeto de análisis tiene forma rectangular, de 142 m de largo y 17 m de ancho. Tiene un tejado a dos aguas en las que la parte más alta del mismo se encuentra en su centro con una altura total de 9 m. El volumen total de la instalación es 18.126 m³.

Este edificio tiene los siguientes flujos de extracción de aire:

Cuatro ventiladores de extracción situados en el tejado.

Diversas aberturas de techo, responsables de la extracción por efecto termosifón.

De todos los extractores se conocen tanto las curvas características como el consumo de energía eléctrica y todos los demás datos necesarios para determinar el punto de funcionamiento del ventilador y por consiguiente el caudal de flujo de aire (m³).

La temperatura del aire en el interior de la nave de producción, medida a 1,5 m de altura desde el suelo y en diversos puntos de la misma, se mantiene prácticamente constante e independiente de la temperatura exterior.

Para su comprobación se han tomado varias medidas durante varios días, a lo largo del perímetro interior de la nave de producción y se han comparados con la temperatura exterior tanto en los días que esta es inferior a la media como con días de mayor temperatura exterior, y la temperatura interior se mantiene prácticamente constante a $20 \pm 2^\circ\text{C}$, mientras que la temperatura exterior varía de -2 a 20°C . La temperatura del aire en el interior se incrementa significativamente por encima de la temperatura exterior cuando es baja o muy baja.

La densidad del aire se ve afectada significativamente por la temperatura. Para unificar, todos los cálculos realizados toman como referencia la temperatura exterior de $13,5^\circ\text{C}$ que corresponde a la temperatura media en la zona geográfica donde se ubica la fábrica. Las condiciones de funcionamiento de la fábrica se mantienen sin cambios a lo largo del año.

De acuerdo a la metodología explicada en el apartado “3.1.7- *Medidas de los flujos de aire relacionadas con el proceso de secado*”, se obtiene que el flujo de aire extraído en las condiciones normales de operación por el extractor número 1 es de $6,89 \text{ m}^3/\text{s}$, el extractor número 2 de $6,81 \text{ m}^3/\text{s}$, el extractor número 3 de $5,53 \text{ m}^3/\text{s}$ y el extractor número 4 de $2,81 \text{ m}^3/\text{s}$.

De la misma manera y como se ha explicado anteriormente, y en base a los datos suministrados por los fabricantes de bombas de vacío, se puede determinar el flujo de aire extraído de la nave de producción en la formación a través del sistema de vacío de la mesa de fabricación tipo *fourdrinier* y los acondicionamientos de las bayetas de las prensas, $7,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Para determinar el flujo de aire debido al efecto termosifón través de las aberturas del techo, en primer lugar identificaremos todos los huecos de la nave y sus distintos niveles de altura.

La Nave cuenta en el nivel "0 m" con siete ventanas abiertas con $0,7 \text{ m}^2$ de superficie abierta cada una. Respecto a las puertas de acceso dispone de cuatro, la número 1 de $3,0 \text{ m}^2$ de superficie, la puerta de acceso número 2 de $12,5 \text{ m}^2$ de superficie,

la puerta de acceso número 3 de 2,4 m² de superficie y la puerta de acceso número 4 de 2,4 m².

En el nivel más alto del tejado a 9 m de altura, la instalación tiene tres aberturas, la apertura de techo número 1 de 2,5 m² de superficie, la apertura de techo número 2 de 6 m² de superficie y la apertura de techo número 3 de 7,5 m².

El este efecto termosifón depende de la diferencia de densidad del aire, debidas a las diferentes temperaturas del aire (dentro y fuera de la sala, teniendo en cuenta la temperatura media en la zona geográfica) ambas en las unidades adecuadas, y la diferencia de altura entre estas las aberturas H en metros.

Usando la ecuación indicada en Apartado "3.9- *Medidas de los Flujos de aire relacionadas con el Proceso de secado*" se obtiene una velocidad de flujo de 6,72 m³/s a través de los agujeros.

Otra corriente de aire a considerar son las entradas o insumos de aire desde la nave de fabricación hacia la campana de secado. La campana cuenta con dos extractores de aire caliente que sacan el aire húmedo del interior de la campana y un ventilador que insufla aire caliente a la misma, precalentado mediante la energía calorífica contenida en la corriente de aire de escape.

De los extractores indicados y del ventilador que sopla aire a la campana se conocen todas las características técnicas, incluidas las curvas de consumo de aire de flujo en m³.

El flujo de aire se determinada en base a los parámetros operativos del motor como el consumo de energía eléctrica del motor para establecer sobre la curva característica el punto de operación del ventilador.

La diferencia entre el caudal de aire de extracción y soplado se determina en 7,08 m³/s. Este flujo de aire utilizado en el proceso, no se tendrá en cuenta para el cálculo de las emisiones de CO₂ asociadas con la perdida de energía de las corrientes de aire en este apartado. El análisis de las condiciones internas de la campana de secado y de los flujos de energía del aire en el interior de la misma ya ha sido evaluado en el apartado "5.8.2 Temperatura de soplado de aire a la campana de secado".

La sección de secado, como se muestra en la Figura 4.1, está aislada del ambiente exterior mediante una campana cerrada construida con paneles tipo sándwich desmontables compuestos por dos capas de 0,7 mm de aluminio (en el exterior e interior) y lana de roca en su interior. Los paneles están montados sobre una estructura fija. Para las operaciones de vigilancia y mantenimiento, la campana de secado dispone de puertas automáticas en la zona denominada de control o supervisión y otras puertas manuales en la zona denominada de accionamiento. Además, cuenta con paneles laterales y techos de cierre extraíble para operaciones de mantenimiento. Una imagen general de la campana de secado se puede ver con detalle en la Figura 5.27.

En esta sección del estudio se analizan todos los flujos de aire de la sala de producción, donde se encuentra la campana aislante de la sección de secado del papel. Con ayuda de los diagramas psicrométricos de Mollier (1929) se determina la entalpía total (Et) de los flujos de aire, a partir de las variables conocidas de estos flujos como la temperatura de bulbo seco (Ti) y su humedad relativa (Hr), para cada una de las corrientes de aire de la nave de fabricación. La nave de fabricación donde se encuentra la sección de secado no tiene sistema de calefacción, por lo que la calefacción no puede ser la fuente de energía que hace variar la energía de las corrientes de aire salientes. El calor o la entalpía añadida a estas corrientes de aire provienen principalmente por las pérdidas de aislamiento de la campana de secado.

5.11.2.- Energía añadida a los flujos de aire

Las dimensiones generales de la nave de producción, de forma rectangular, es de 142 m de largo y 17 m de ancho donde se encuentra situada la campana de secado, con unas dimensiones de 38,9 m de longitud, 5,2 m de ancho y 4,9 de alto, construido con paneles sándwich de aluminio con aislamiento de lana de roca en su interior.

Para estimar las pérdidas de aislamiento por conducción y convección, se tendrá en cuenta el área total de la campana factible de intercambiar calor con el aire de la nave de producción (432,18 m² de superficie lateral y 202,18 m² de superficie del techo) así como la superficie de los conductos de aire que conectan los sistemas de extracción y soplado situados en el exterior del edificio con la propia campana de secado a través de los cuales se realiza el intercambio de aire caliente (longitud 27,7 m, ancho 1,5 m y alto 1,0 m) con un área total de 136,5 m² de superficie.

Para un ajuste adecuado de las imágenes térmicas utilizadas en el estudio, se ha ajustado la emisividad de los paneles y su escala de colores con la temperatura media del punto comparando la temperatura mostrada por la imagen de termografía con los datos obtenidos con el termómetro portátil. La emisividad de los paneles y conductos de aluminio se ha establecido a 0,9 respecto a la temperatura indicada por las imágenes térmicas.

Con información de temperatura proporcionada por las imágenes térmicas, y el mapa térmico de los paneles de la cubierta de la campana, establecemos la temperatura promedio de la zona del techo de la campana en 56°C y 45,6°C para los paneles de cierre lateral y 75°C para los conductos.

Mediante el software AISLAM (2013), se calculan las pérdidas en los paneles de techo y cierre lateral de la campana, principalmente por medios de convección y radiación

La temperatura media exterior es de 13,5°C. Se han tomado medidas de la temperatura en varios puntos interiores de la nave de producción, en los periodos en los que se detiene la actividad, con temperaturas exteriores por debajo de la media exterior, con media exterior y por encima de ella. En todos los casos la temperatura en el interior se mantiene prácticamente constante e igual a la exterior debido al gran número de aberturas en la nave de fabricación y las corrientes o flujos de aire, por lo que consideramos que la temperatura en la sala de producción es la misma que la del aire exterior y para el estudio igual al promedio de la temperatura del aire exterior.

Con los datos considerados, se cuantificaron las pérdidas de energía de la campana debido a fallos de aislamiento 571,2 kWh (2.056,3 MJ) y en los conductos 99,45 kWh (325,62 MJ), en este caso son MJ térmicos, si consideramos el rendimiento de la generación de calor y se aplica a las pérdidas totales, obtenemos 838,31 kWh (2.570,35 MJ) de energía primaria, que en nuestro caso corresponde a gas natural.

Otros factores que deben tenerse en cuenta, y que también generan calor en la nave de producción, lo constituyen los accionamientos de la máquina de fabricación de papel y las bombas de transferencia de fluidos.

Para cada unidad instalada se tomará como dato la potencia eléctrica, la carga con la que trabaja y el tipo de servicio (continuo o no). La potencia total instalada en la

fábrica objeto del estudio es de 1.286,5 kW y consume 975 kWh (3.510 MJ). De acuerdo con los datos de los fabricantes, la contribución de la energía térmica a las corrientes de aire estudiadas se establece en 60,90 kWh 219,24 (MJ).

Siguiendo la metodología indicada en el apartado 3.1, la Tabla 5.13 muestra las características de cada flujo de salida de aire y en la Tabla 5.14 los resultados de los cálculos de la energía para cada uno de los flujos de aire salientes de la nave de producción, así como la energía del flujo de aire que entra en la nave de producción y que compensa a estas salidas.

Los flujos de aire correspondientes al sistema de vacío de la mesa de fabricación (*fourdrinier*) o entradas de aire al envolvente de la campana de secado no son objeto de este estudio. Como puede ver, la nave de producción se encuentra en un estado de profunda depresión, lo que provoca fuertes corrientes de aire frío procedente del exterior.

Con la información contenida en las Tablas 5.13 y 5.14, se obtiene que el déficit de desplazamiento total de aire de instalación es de 43,33 m³/s. El flujo total de aire que sale por los extractores y las aberturas del techo es de 28.75 m³/s.

Entrada / Salida	Tipo E/S	Temperatura (°C)	Hr (%)	g H ₂ O / kg aire seco	Presión (kPa)	Densidad (kg/m ³)	Caudal (m ³ /s)
Extractor 1	S	30	20	5	101,32	1,0	6,89
Extractor 2	S	30	20	5	101,32	1,0	6,81
Extractor 3	S	35	20	7	101,32	1,0	5,53
Extractor 4	S	35	10	4	101,32	1,0	2,81
Aperturas del techo	S	60	10	13	101,32	1,0	6,72
Sistema de vacío	S	30	80	22	101,32	1,0	7,5
Campana	S	85	20	77	101,32	1,1	7,08
Aire exterior	E	13,5	12	2	101,32	1,0	43,33

Tabla 5.13. Flujos de aire.

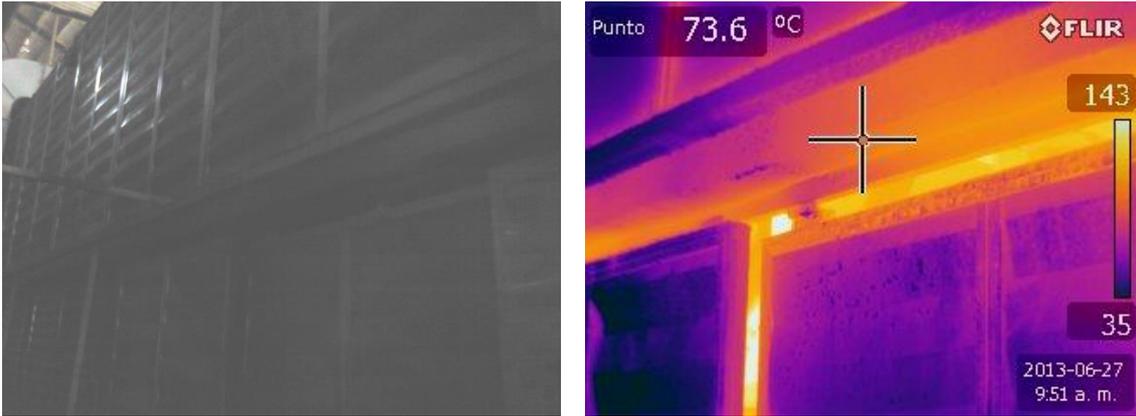


Figura 5.27.a. Imágenes térmicas.

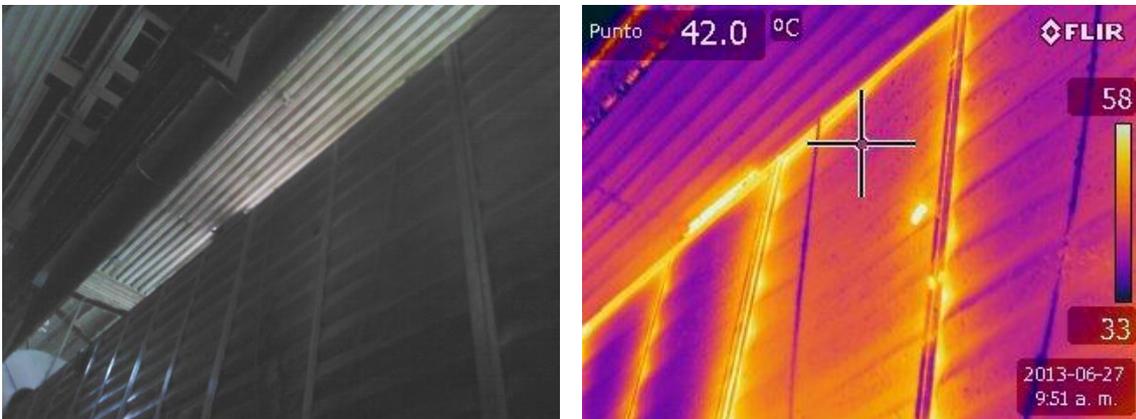


Figura 5.27.b. Imágenes térmicas.



Figura 5.27.c. Imágenes térmicas.

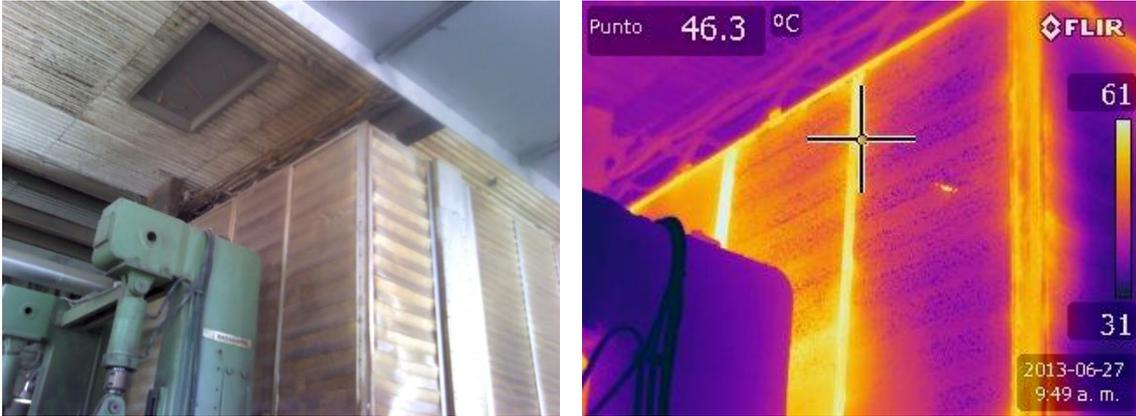


Figura 5.27.d. Imágenes térmicas.

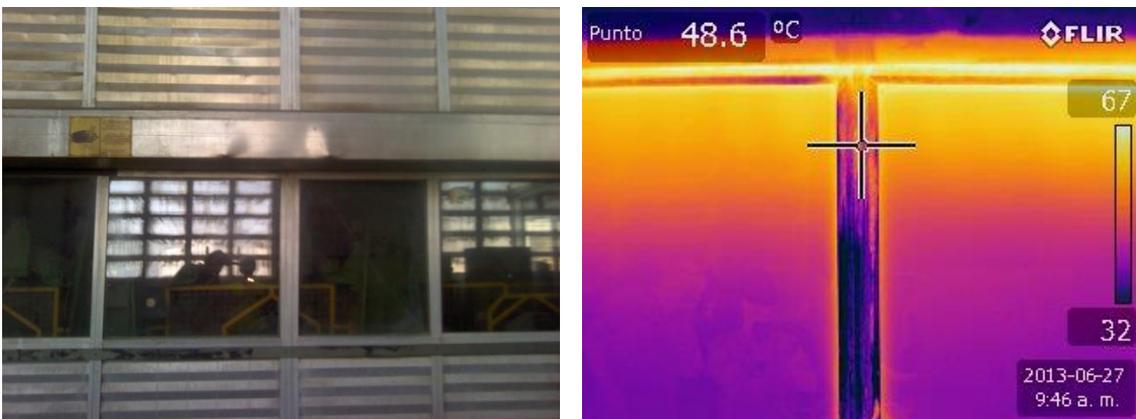


Figura 5.27.e. Imágenes térmicas.

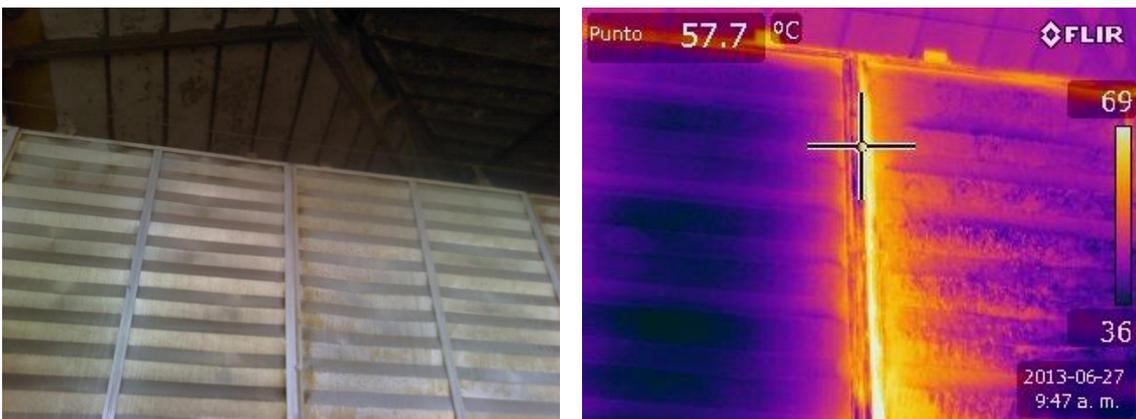


Figura 5.27.f. Imágenes térmicas.



Figura 5.27.g. Imágenes térmicas.

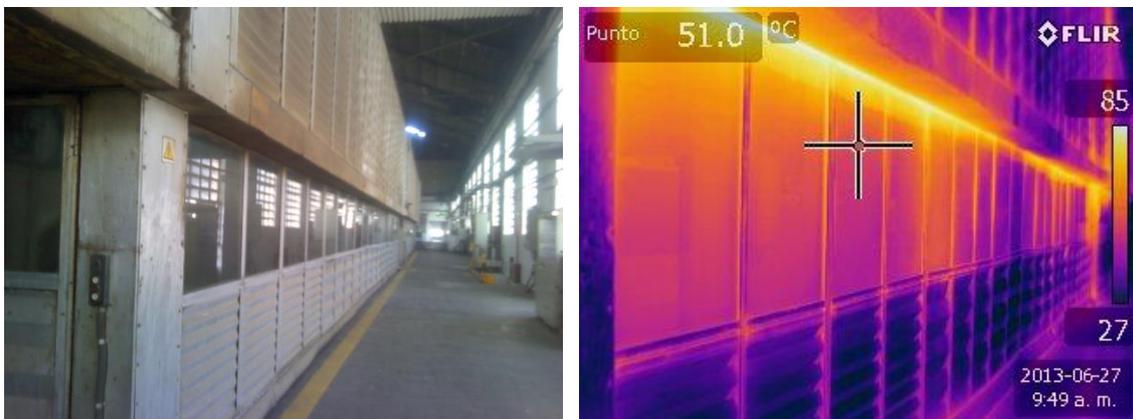


Figura 5.27.h. Imágenes térmicas.

Teniendo en cuenta la entalpía de cada flujo según se indica en la Tabla 5.15, la energía que se ha añadido a los flujos de aire de entrada a la nave de producción procedente del exterior y que sale por los extractores y las aperturas del techo es de 3.302,3 MJ.

Estos MJ añadidos al flujo de aire de salida tienen el origen en las pérdidas de aislamiento de la campana de la sección de secado. La energía que cede la campana al aire circulante proviene de la energía contenida en el vapor suministrado a la sección de secado, que calienta los cilindros secadores y que se produce en la caldera o generador de vapor.

La caldera de generación de vapor utiliza como única fuente de energía gas natural. Las emisiones pueden calcularse entonces utilizando metodología indicada en el

apartado “3.3- *Determinación de las emisiones de CO₂*”, que tiene en cuenta la contribución de los TJ de energía añadidos a los flujos de aire de salida y los factores de emisión asociados con el consumo de gas natural, fuente de calor necesaria para calentar este aire.

La producción promedio por hora de trabajo de la fábrica analizada, como ya se ha indicado anteriormente, es de 5,75 t/h (tonelada de papel producida en una hora), la única fuente de energía utilizada para el secado térmico del papel es el vapor generado en una sola caldera generadora de vapor.

El suministro de gas a la fábrica se realiza en un solo punto y el consumo de gas único es para la generación de vapor a la sección de secado. Es posible asociar en este caso las emisiones procedentes del calentamiento de los flujos de aire de la nave de fabricación con la fuente de energía que genera el vapor.

En las Tabla 5.15 y 5.16, la unidad de tiempo para el cual se realizan los cálculos, en nuestro caso se asocia a la hora. Debido a que la máquina de producción de papel que estamos estudiando refiere su producción a periodos de una hora, "tiempo" significa horas.

Salidas / Entradas aire	Caudal (m ³ /s)	Entalpía (kJ/kg)	Energía (MJ)
Extractor 1	6,89	44	1.091,2
Extractor 2	6,81	44	1.078,0
Extractor 3	5,53	44	875,6
Extractor 4	2,81	45	454,5
Aperturas del tejado	6,72	95	2.299,0
Sistema de vacío	7,50	85	2.295,0
Aislamiento de campana	7,08	240	6.120,0
Aire exterior	43,33	16	2.496,0

Tabla 5.14. Energía de cada flujo de aire.

Para el cálculo de las emisiones anuales asociados con el proceso y las pérdidas de energía, se ha tenido en cuenta que la fábrica ha estado produciendo 8.040 horas, estas son las horas consideradas en el año.

En este apartado no se va a tener en cuenta ni cuantificar la energía del flujo de aire extraído por el sistema de vacío porque la temperatura de la pasta a la sección de fabricación es de 29°C, temperatura similar a la temperatura de extracción del aire en esta sección de vacío.

Teniendo en cuenta el balance de salida de aire de la nave, el total de energía añadida a estos flujos proviene de la suma de las energías añadidas a cada una de las salidas como extractores y aberturas de techos.

El flujo de aire expulsado desde el interior de la campana a la atmósfera, que corresponde a los insumos de campana, se encuentra fuera del alcance de este estudio. En este caso la fuente de calentamiento del flujo de aire proviene del vapor suministrado a la sección de secado y no por la pérdida de aislamiento de los paneles de cierre de la campana secadora al recinto interior de la nave de producción.

El consumo medio de energía para producir una tonelada de papel en la fábrica de papel empleada en el estudio es 4.284 MJ. Comparando estos datos con las pérdidas de energía en los flujos de aire de salida de la nave de fabricación (ver Tabla 5.15) corresponde al 12,51% de la energía total utilizada en el secado térmico del papel.

	MJ	Emisiones CO ₂		%
	Por hora	Por hora (t)	Total año (t)	
Pérdidas de extracción	3.302	0,16751	1.346,8	
Energía aportada por motores	219	0,01111	89,3	
Energía añadida por pérdidas de aislamiento	3.083	0,15640	1.257,5	12,51
Energía total consumida	24.418	1,23868	9.958,9	100,00

Tabla 5.15. Método de los flujos de aire. Balance de emisiones, porcentaje de pérdidas.

Para validar este nuevo método, la Tabla 5.16 se muestran los resultados obtenidos mediante el cálculo de las pérdidas de energía térmica en forma convencional, en la que se calculan las pérdidas por conducción y convección, como se explica en la sección 3.1. Si comparamos estos datos de nuevo con el consumo total de energía de papel de secado, la energía perdida por el aislamiento representa el 12,97% del total de energía suministrada a la sección de secado.

La diferencia numérica entre los dos métodos se puede considerar lo suficientemente pequeño como para ser considerado válido el nuevo método de análisis.

El aire evacuado por extractores 1, 2, 3, 4 y aberturas de techos se compensan con el aire que entra desde el exterior por las aperturas descritas en la sección “5.10.1 Estudio de los flujos de aire”. El calentamiento del aire se produce por las pérdidas de calor debidas a los fallos de aislamiento de la campana de aislamiento de la sección de secado.

Para determinar los puntos de la campana con deficiente aislamiento o con paneles que presentan defectos en el cierre del sistema, utilizamos imágenes de termografía. Las pérdidas están localizadas principalmente en las puertas y el techo de la campana de secado. En la Figura 5.27 se puede observar el estado exterior de la campana, que aparentemente parece una instalación correctamente mantenida.

	MJ	Emisiones de CO2		%
	Por hora	Por hora (t)	Total año (t)	
Pérdidas debidas al estado de la campana de secado.	2.570	0,13037	1.048,1	
Pérdidas debidas a los conductos de aire.	407	0,02065	166,0	
Energía aportada por motores.	219	0,01111	89,3	
Energía añadida por pérdidas de aislamiento.	3.196	0,16212	1.303,5	12,97
Energía total consumida.	24.418	1,23868	9.958,9	100,00

Tabla 5.16. Método tradicional. Balance de emisiones, porcentaje de pérdidas.

En la Figura 5.27 se pueden ver también las imágenes de termografía del área superior de la campana y de la zona junto al extractor número 4 de salida de aire.

Esta técnica ha sido capaz de identificar las áreas de mayor pérdida de energía y ha sido capaz de servir como base para una planificación del mantenimiento del sistema y por consiguiente para reducir las pérdidas cuantificadas en la Tabla 5.14.

5.12.- CONSIDERACIONES FINALES SOBRE LOS RESULTADOS

La metodología y los análisis realizados son válidos para el análisis del funcionamiento de fábricas de proceso continuo en general y sobre la fábrica objeto de estudio en particular. Dependiendo del tipo de proceso continuo investigado puede ser necesario incluir variables específicas del propio proceso, pero teniendo en cuenta que las emisiones se producen principalmente en la zona de uso de energía térmica siempre tendrán relación con las variables de disponibilidad, producto, proceso y maquinaria e instalaciones.

En los procesos continuos una de sus características representativas lo constituye el hecho de obtener grandes producciones pero con un tiempo de ajuste elevado comparado con otros tipos de sistemas de fabricación, que obliga a hacer planificaciones con elevada anticipación para minimizar pérdidas. La frecuencia de la toma de datos para el control del proceso dependerá en gran medida de la inercia del proceso. En el caso particular estudiado se establece como frecuencia de muestreo la relativas a una bobina madre de producción que con una duración aproximada entre 50 y 60 minutos, es suficiente para ver la evolución del indicador como puede verse en las Figuras 5.8 y 5.9. La gran inercia que tiene el sistema de producción continuo analizado hace que un tiempo menor de muestreo produjese una cantidad de datos elevadísima que dificultaría sobremanera el análisis de los mismos y no aportaría elementos nuevos, este hecho puede constatarse y corroborarse también en la Figura 5.4 “*Duración de la parada – indicador*”.

En una primera revisión, los resultados obtenidos parecen indicar que hay una relación entre el indicador considerado y ciertos parámetros de producción que deben tenerse en consideración, asociados con los parámetros de mantenimiento de la máquina de papel.

Como se ha observado y posteriormente se analizará en detalle, se ha seguido un proceso de análisis descendente considerando inicialmente la influencia disponibilidad y paradas de máquina, la influencia del tipo de producto fabricado, analizando también la influencia de los parámetros de producción para terminar con las condiciones físicas de la instalación así como su estado de control y mantenimiento. En todos los casos se ha evidenciado que los datos recopilados junto con la forma de expresarlos, simultáneamente de manera gráfica y estadística, ofrecen herramientas suficientes para proceder a su análisis y establecer conclusiones.

CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN

6.1.- INTRODUCCIÓN

La relación entre el indicador propuesto “t CO₂ / t Producción” con la eficiencia y sostenibilidad de la planta de proceso continuo se ha buscado desde diversos aspectos, tanto los relacionados con el propio producto a fabricar, los relacionados con los parámetros operativos, los relacionados con las operaciones de mantenimiento de la maquinaria de fábrica y también con los relacionados con la gestión de la información e indicadores de rendimiento del propio proceso.

Se ha analizado una cantidad ingente de registros con los datos operativos del proceso de producción, las condiciones técnicas del proceso y las pautas de mantenimiento de fábrica. Desarrollaremos más en detalle los aspectos indicados, pero una primera revisión se observa que tiene influencia sobre las emisiones de CO₂ la mayoría de los aspectos de la producción. Aparentemente hay parámetros menos sensibles, como pudiese ser el contenido de humedad del papel a la entrada de la sección de secado (*Pmi*) y que se intuye que cuanto más seco entre en la sección de secado, menos emisiones se van a producir, pero que después del análisis se revela que hay puntos óptimos, que a priori no se hubiesen considerado idóneos para reducir el indicador.

Hay variables de proceso que analizados por separado se manifiestan con una fuerte relación respecto a otros parámetros de proceso y con las emisiones asociadas en este caso al secado del papel. Se analizará con más rigor como influye el estado de aislamiento de la instalación de secado térmico con el punto de rocío (*Dep*) y los flujos incontrolados de aire denominados insumos de campana. Estos insumos se incrementan proporcionalmente al deterioro del aislamiento de la campana de secado. Es muy relevante como se puede conseguir reducir la energía necesaria para la evaporación del agua contenida en el papel mediante la mejora de aislamiento de la campana y el control adecuado de los flujos de aire circulantes en el interior de la campana.

Otro aspecto que ha sido uno de los primeros identificados como significativo e incontrolable en el nivel que alcanza el indicador “t CO₂ / t Producción”, son las condiciones climatológicas externas por la gran cantidad de aire del exterior que se introduce en el proceso. Este aire se devuelve posteriormente caliente y saturado de

humedad a la atmosfera. A pesar de ser la temperatura exterior un factor incontrolable, se ha observado que puede ser utilizado para evaluar el funcionamiento del sistema de intercambiadores de calor y establecer pautas que permiten minimizar el valor de la energía consumida en el proceso de secado y el valor relativo de las emisiones producidas en el proceso.

En la sección final del análisis de los resultados se verá en detalle un método hasta ahora no utilizado con este fin en el proceso de fabricación de papel para identificar los fallos de aislamiento en la instalación y priorizar las operaciones de mantenimiento sobre la fábrica. Con este sistema se podrá actuar en otros parámetros de proceso como las condiciones del aire en el interior de la sección de secado, principalmente la temperatura (E_{at}) y la humedad (E_{am}) del aire en el interior de campana, que afectan notablemente no solo a la energía necesaria para el proceso de secado de papel sino también a la cantidad de energía recuperada y añadida a los flujos de aire entrantes de nuevo en la campana.

Revisaremos también la influencia que pueden tener los sistemas de gestión implantados en fábrica con el estado de mantenimiento de la instalación, el control de los parámetros operativos y las emisiones del proceso. Se pondrá de manifiesto la importancia de los sistemas de gestión en el control de parámetros que, no afectando directamente a la calidad del producto manufacturado e incluso no teniendo a priori influencia en la capacidad de producción, tienen una influencia muy significativa en el desempeño energético del proceso, y consecuentemente en el caso que se analiza, en las emisiones de CO₂ globales de la fábrica y en el indicador “t CO₂ / t Producción” objeto de análisis y evaluación en la presente Tesis.

6.2.- ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En las plantas industriales de proceso continuo la disponibilidad es un factor muy importante a tener en cuenta y que afecta de manera significativa a los indicadores de desempeño energético en general, y al indicador considerado en la Tesis en particular. En el primer análisis llevado a cabo sobre la variación del indicador y la disponibilidad se puede observar que hay una tendencia a inversa entre el valor que toma el indicador y el valor de la disponibilidad. En la Figura 5.1 se observa que recopilando los datos de disponibilidad en media mensual, sin tener en cuenta otros

factores externos como pudiesen ser las condiciones climatológicas exteriores (temperatura y humedad del aire) se constata que a mayor valor de la disponibilidad de planta, menor es el valor del indicador “t CO₂ / t Producción”.

Las variaciones del indicador observadas entre los tres primeros años analizados puede deberse a factores hasta ahora no identificados. Se pondrá de manifiesto posteriormente mediante el ajuste del indicador frente a variables de disponibilidad que para cualquier año que se seleccione individualmente se obtienen valores del indicador más bajos cuando la disponibilidad es mayor que cuando la disponibilidad de la fábrica disminuye.

En la Figura 5.2 se pone de manifiesto que, analizando también los datos de emisiones, disponibilidad y producción en media mensual, a mayor número de horas de duración de la parada mayor es el valor del indicador. Si analizamos este hecho mediante los datos recopilados en la Tabla 5.1, se observa que el indicador se puede incrementar en un mes entre el 1,28% y el 16,45% respecto al valor del mismo indicador en los días en los que no hay paradas de producción que afecten a la disponibilidad.

Con el objetivo de desglosar de manera más concreta, se analiza en la Figura 5.3 la variación del indicador con la duración media de las paradas y en la Figura 5.4 la variación del indicador con las paradas de duración inferior a una hora. Si se analizan conjuntamente ambas gráficas se constata que los procesos continuos tienen una gran inercia y, en este caso particular, el indicador es insensible a las paradas de duración menor a una hora. Mientras en la Figura 5.3 se observa la tendencia de incremento del valor del indicador cuando la parada es superior a 1 hora, en la Figura 5.4 la variación del indicador es casi nula respecto a la duración de las paradas de menos de 1 hora.

La aparente falta de sensibilidad o correlación entre el indicador y la duración de las paradas cuando estas son de menos de 1 hora se constata en la Figura 5.4, en la que se puede observar la distribución casi uniformemente (mediante líneas horizontales y pautadas en paradas de 0,25, 0,5, 0,75 y 1 hora) para todos los valores históricos del indicador. El comportamiento del indicador “t CO₂ / t Producción” es prácticamente insensible a las micro paradas debido a la gran inercia que tiene el proceso.

Al analizar más detalladamente la variación del indicador con la disponibilidad, ahora sin tener en cuenta los valores que corresponden a cada año tratándolos de manera agregada, y cambiando a las ordenadas el valor del indicador para facilitar la interpretación de los datos, en la Figura 5.5 se pone de manifiesto ahora de manera más

evidente la tendencia a la baja del indicador al aumentar la disponibilidad de la máquina. El valor se obtiene sin tener en cuenta otros valores que pueden afectar como el tipo de producto fabricado y los parámetros operativos de máquina, lo que corrobora que es un aspecto fundamental que se deberá priorizar.

Si analizamos nuevamente más en detalle la variación del indicador con el tiempo de parada, se observa claramente también la tendencia a incrementarse el indicador a medida que se incrementa el tiempo de parada. Se ha dividido el conjunto de datos en tres rangos:

Micro paradas, que corresponden a paradas de menos de una hora de duración.

Parada corta, en este caso la duración varía entre 1 y 6 horas.

Parada larga, si la parada dura más de 6 horas.

En el primer caso el origen se debe principalmente a las roturas de papel debidas al control de las variables del propio proceso. La Figura 5.9 muestra las que se concentran en 4 rangos que corresponden a las duraciones de la parada en cuartos de hora pero expresados en formato centesimal en vez de formato horario. Se registra como 0,25 las paradas de duración hasta 15 minutos o 900 segundos, 0,50 corresponde a media hora, 0,75 a 45 minutos y 1 a la hora.

La división comienza en 0,25 por ser la mínima fracción de tiempo real que se registra. El proceso continuo analizado, como aspecto común a los procesos continuos, tiene gran inercia a los cambios. El tiempo que transcurre desde que la pasta de papel se deposita en la primera sección de máquina (*fourdrinier*) hasta que llega a la pope varía en función del tipo de papel producido y la velocidad del proceso entre 3 y 8 minutos. Una rotura de papel en cualquier sección necesita una media de 5 minutos para que el papel roto abandone toda la máquina. El proceso de puesta en marcha comienza con la retirada de los restos de papel en el punto donde se ha producido la rotura y la puesta en marcha nuevamente del proceso. Estas actuaciones conjuntas justifican la adopción de esta duración mínima.

El resto de subdivisiones se adoptan con el objetivo de mejorar el análisis de los resultados. Como se evidencia en la Figura 5.9 y debido a la gran inercia del proceso entre los que se encuentra el calentamiento hasta los parámetros de producción de la sección de secado (cilindros secadores entre 100 y 150°C y presión de vapor entre 0,1 y

0,5 MPa en función de la sección del grupo de secadores en el interior de la sección de secado), no hay una influencia significativa y observable de estas paradas y el indicador. Se observa que el indicador toma todos los valores para cada duración y además están uniformemente distribuidos. Este hecho ratifica la poca influencia relativa sobre el indicador debido a la gran inercia del proceso y que la pérdida de producción al ser pequeña no tiene suficiente significancia sobre el valor tomado finalmente por el indicador.

En las Figuras 5.6 y 5.8 se analiza nuevamente la información de las paradas de más de una hora, separándolas en dos grupos, de 1 a 6 horas (5.8) y de más de 7 horas. El primer rango corresponde a las paradas por avería o técnicas programadas de corta duración en las que se realizan operaciones de mantenimiento planificadas mientras que el segundo rango se corresponde con averías mayores en el proceso.

Analizando los resultados obtenidos se puede observar un comportamiento distinto, si la duración de la parada está por debajo de las 4 horas la inercia del sistema hace que las emisiones se distribuyan uniformemente de manera similar a las micro-paradas. A partir de esta duración y como se observa más claramente en la Figura 5.6 se pone de manifiesto la relación directa entre las paradas y el indicador considerado.

Si dividimos el conjunto de datos en este caso teniendo en cuenta la media mensual de eficiencia y el indicador también en valor medio y analizamos su evolución, en la Figura 5.7 se observan dos fenómenos, el primero es que en los datos mensuales con días de parada su valor está siempre por encima de la ratio de emisiones que los datos mensuales con días sin paradas, lo que corrobora que el estudio de la Tesis puede obtener una relación entre la eficiencia del proceso productivo y las emisiones de CO₂ en el proceso de secado haciendo factible a priori pensar que el indicador considerado “t CO₂ / t Producción” puede llegar a ser un indicador válido para medir la eficiencia y la sostenibilidad del proceso.

Considerando nuevamente los datos representados en la Figura 5.7 se observa también un comportamiento cíclico en las emisiones siendo mayores en los meses que se corresponden con periodos de menor temperatura y mayor humedad externas (meses 1, 2, 3, 12, 14, 23, 24, 25 y 26). El hecho observado nos ayuda a identificar que las variables externas influyen en la fabricación del papel.

Siguiendo la metodología indicada en el apartado 3.7 *Procedimiento estadístico de datos*, en la Tabla 5.2 y la Figura 5.7 se obtienen respectivamente el modelo de ajuste

estadístico para encontrar la correlación entre las variables asociadas a la disponibilidad y el indicador considerado. La cuantificación de los datos para la disponibilidad, el tiempo de parada y la duración media frente al indicador “t CO₂ / t Producción” en valores mensuales (Ind_100) y a las Emisiones de CO₂ “t CO₂ / t Producción” en los días de parada (Ind_<100). La Tabla 5.2 a su vez muestra el modelo que proporciona mayor ajuste, después de calibrar doce modelos de regresión para cada variable.

Analizando los datos obtenidos se constata la correlación existente entre el indicador y la disponibilidad incluso en los días con parada en los que toma valores menores cuantos mayores son los valores de la disponibilidad del proceso.

Se constata también que la correlación en caso de compararlo con el tiempo de parada es elevada reduciéndose para el caso de la duración media por el efecto de la inercia que tiene el proceso de fabricación y la insensibilidad que muestra en mismo en las micro-paradas y paradas de corta duración (Figuras 5.8 y 5.9).

Si nos centramos en la variación del indicador con el tipo de producto, el estudio se realiza con el objetivo de constatar si existen variaciones apreciables dentro de los distintos tipos de papel fabricado. Es necesario hacer el análisis debido a la diferente composición de materia prima, que se deriva en la formación del papel por un tipo predominante de fibras distinto para cada tipo de papel, a parte de la adición creciente de otros aditivos químicos que pueden afectar a la dificultad de eliminación del agua de la hoja húmeda de papel.

En un primer análisis se observa en la Figura 5.11 que no hay una relación directa entre el tipo de producto, el gramaje y el indicador seleccionado de emisiones “t CO₂ / t Producción”. El indicador toma valores similares para todos los gramajes e incluso dentro de un gramaje varía entre 0,130 y 0,250. Aparentemente no se encuentran diferencias significativas entre los diferentes tipos de papel y que el proceso de secado en este tipo de papel se ve afectado principalmente por la limitación mecánica de la eliminación del agua, no constatándose influencia en los químicos añadidos respecto a la retención del agua en la hoja de papel.

Si observamos la Figura 5.7 y la 5.11, la información proporcionada por ambas conjuntamente podría ser un indicio de que el indicador puede estar influenciado de manera más significativa por las condiciones ambientales externas como la temperatura del aire exterior que por la propio tipo de papel.

En la Figura 5.12 se observa para un gramaje de 200 g/m² y para todos los tipos de producto que se fabrican con dicho gramaje, el indicador varía conforme aumenta la temperatura constatándose una ligera disminución del indicador. En la Figura 5.13 se repite el mismo gráfico que en la Figura 5.12 para 350 g/m² observándose una mayor disminución del indicador conforme aumenta la temperatura. Se evidencia en todas los tipos de productos y más acusado en C0A, C2A y C5A. En la Figura 5.14 se analiza el gramaje igual a 500 g/m². En esta Figura es más evidente la disminución del indicador que en las anteriores.

A la vista de estos resultados, puede concluirse que debido a la necesidad de versatilidad de la máquina para cubrir el amplio rango de gramajes (150 a 650 g/m²) y tipos de papel, la máquina de producción tiene capacidad más excedentaria de secado en los gramajes bajos, por lo que el sistema térmico puede compensar el efecto de la temperatura exterior sobre el consumo del propio material. Este hecho va cambiando paulatinamente y si se analizan las Figuras 5.12, 5.13, 5.14 y 5.15 se observa que en los gramajes intermedios de 350 g/m² y 500 g/m² el indicador seleccionado de emisiones “t CO₂/ t Producción” tiene una variación aparentemente más acusada que en los gramajes extremos analizados de 200 g/m² y 630 g/m².

Otro elemento a considerar son los valores entre los que se encuentran las gráficas del indicador frente a las emisiones. Aunque se constata que la influencia en los gramajes bajos 200 g/m² es menor que en los intermedios o incluso los altos 630 g/m², el máximo del indicador es similar en todos los casos y en torno a 0,200 “t CO₂ / t Producción” excepto en los gramajes bajos en los que la máquina tiene más capacidad situándose en 0,240 “t CO₂ / t Producción”.

La sobrecapacidad de secado respecto al tipo de papel a fabricar penaliza en las emisiones producidas, siendo en este punto de funcionamiento la máquina menos sostenible que en los gramajes intermedios, para la que estará más optimizada.

Un aspecto a considerar lo constituye la tendencia más acusada a la caída del indicador con gramajes intermedios y altos unidos a altas temperaturas exteriores, lo que nos da pie a analizar más en detalle el comportamiento del indicador en función de la temperatura exterior. En las Figuras 5.16, 5.17, 5.18, 5.19, 5.20 y 5.21 se analiza el comportamiento del indicador y el tipo de papel para rangos más estrechos de temperatura.

La media del indicador en cada uno de los rangos de temperatura disminuye de manera constante situándose claramente por encima de 0,180 “t CO₂ / t Producción” en la temperatura de -5°C a 5°C y conforme aumenta la temperatura esta media se va reduciendo hasta estar claramente por debajo de los 0,180 en el rango de temperatura de 25°C a 30°C. Este hecho se evidencia más de si se comparan los dos casos extremos de temperatura, Figura 5.16 y Figura 5.22 se observa más claramente la diferencia.

Para poder analizar más detalladamente este efecto, en la sección 5.7 se realiza un estudio estadístico de las variables involucradas en el proceso de secado, entre las que se encuentran la temperatura exterior (*O_t*). La Tabla 5.3 y la Tabla 5.9 muestran los resultados del análisis del que se pueden extraer las siguientes conclusiones;

El parámetro humedad del papel a salida de la sección de secado (*P_{mo}*) tiene un comportamiento especial. El indicador toma valores máximos en el intervalo central (6,5-7), reduciéndose en los extremos al mínimo con valores del (7-7,5). Este comportamiento era predecible en el intervalo de (7-7,5) debido a que se elimina menos agua de la hoja de papel y por consecuencia la producción obtenida aumenta por el aumento de contenido de agua. Resulta sin embargo menos fácil de explicar por qué tiene el valor más bajo la obtención de la máxima sequedad. Este es un comportamiento que convendría analizar en futuros estudios y que puede estar relacionado con el perfil transversal de humedad de la hoja de papel.

En el análisis de las emisiones, hay que tener en cuenta la cantidad de agua que se elimina de la hoja entre la entrada y la salida del papel en la sección de secado. Un parámetro seleccionable mediante la estrategia adecuada de la sección de prensas previa a la sección de secado y que afecta de manera significativa al indicador. El parámetro humedad del papel a la entrada de la sección de secado (*P_{mi}*) tiene un comportamiento especial, como se ve en la Figura 5.26, el valor que permite minimizar el indicador se sitúa en el centro. Este hecho se constata experimentalmente en máquina y no tiene a priori explicación técnica pero si constatación práctica. Una mayor sequedad de entrada no se traduce en una disminución del indicador. El hecho previsible de que a menor sequedad de entrada menor valor del indicador no se constata ni estadísticamente ni prácticamente.

La temperatura exterior (*O_t*), como ya se preveía anteriormente es el parámetro que se constata en este caso como más influyente en el indicador. Es un factor no controlable. Su influencia puede estar originada por afectar significativamente al menos a dos factores (*E_{at}* y *E_{bt}*). El deficiente estado del aislamiento de la instalación, lo que

provoca que el efecto de la temperatura exterior (O_t) sobre las condiciones interiores de la sección de secado (Eat) sea muy significativa. También puede ser debido al deficiente estado de mantenimiento de los diversos de los intercambiadores de calor y sistema de recuperación, lo que puede provocar que la Temperatura de Soplado (Ebt) se vea afectada significativamente también por la temperatura exterior (O_t). Según se observaba en las Tablas 5.3 y 5.7, se constata la fuerte correlación entre la Temperatura Exterior (O_t) y la Temperatura de Soplado de campana (Ebt).

Se puede establecer una combinación de factores que minimiza el indicador “t CO_2 / t Producción” en esta fábrica, lo que corrobora que se puede utilizar el indicador analizado en la Tesis para mejorar la eficiencia del proceso de secado controlando los parámetros de producción. La máquina puede ser ajustada de esta manera para obtener su máxima eficiencia y sostenibilidad con los parámetros controlables:

Pwi : el óptimo se sitúa en la mitad del rango (1,875-1,950 m de ancho de papel).

Pti : debe ser lo más alto posible (>32 °C).

Pmi : debe estar en la mitad del rango (52-55% de contenido de humedad)

Pmo : la peor combinación se produce en el rango intermedio (6,5-7% de contenido de agua). Este objetivo se ve afectado por el perfil de humeado.

Intentando minimizar en lo posible el impacto de los factores no controlables como el gramaje del papel producido, que es requisito del cliente, y la temperatura exterior (O_t).

No obstante, se constata que la influencia de los factores no controlables puede ser paliada en parte con unas pautas adecuadas de mantenimiento. De los datos obtenidos en la sección 5.9 de la Tesis en la que se analiza el comportamiento del indicador en relación a las operaciones y pautas de mantenimiento, más concretamente en el apartado 5.9.2 que se analizará más adelante, se constata que el estado de mantenimiento de los sistemas de intercambio de calor y el estado de la estanqueidad de la propia campana de cerramiento de la sección de secado afectan notablemente al valor de la temperatura del aire de soplado a campana Ebt . Teniendo en cuenta que la temperatura exterior O_t es un factor no controlable, sí se puede paliar de manera significativa su impacto con las condiciones de mantenimiento de los equipos de la sección de secado y campana. Cuanto mejor este aislado mayor será el punto de rocío

(*Dep*) al que puede trabajar, y menor flujo de aire necesario en la campana para evacuar la humedad del papel y mayor será la temperatura que se podrá obtener en la corriente de soplado a campana (*Ebt*).

Analizando el valor del indicador respecto a las operaciones de mantenimiento de fábrica, se puede constatar que hay una relación directa entre ambos. Se han estudiado dos aspectos importantes como son el agua de reposición del circuito de caldera (Apartado 5.10.1) y la relación entre el indicador y la temperatura de soplado de aire a campana (Apartado 5.10.2).

Entre las diversas variables disponibles para analizar, se ha escogido el agua de reposición al circuito de caldera por ser el elemento que indica de manera clara el estado de mantenimiento de la instalación de vapor, desde su generación en la caldera hasta el retorno al depósito nodriza de la misma después de haber cedido su energía a la hoja húmeda de papel para secarla. El esquema de su proceso se puede ver en la Figura 4.1.

En las Tablas 5.9a y 5.9b se puede constatar la importancia relativa que tiene esta variable. Afecta tanto al rendimiento del generador como al rendimiento de la propia instalación de secado por la energía perdida en sus fugas de vapor y la energía que hay que volver a aplicar para reponer el flujo perdido. Las principales pérdidas vienen en este caso analizado por el exceso de purga en la zona del generador de vapor y por el desgaste del sello en las juntas rotativas encargadas de introducir el vapor en el cilindro secador, en ambos casos además se corresponde con el punto en el que el fluido empleado como transporte tienen su mayor energía.

La influencia en concreto de la pérdida en la junta rotativa afecta a la capacidad de secado de la instalación, que teniendo en cuenta que está situado en el cuello de botella del proceso implica una pérdida real no solo de energía si no de capacidad de producción. Un parámetro importante en la sección de secado es la superficie de contacto entre los cilindros secadores y el papel, dicha superficie es proporcional al ángulo de abarque del papel en cada secador, la anchura de la máquina y el número de secadores instalados en la sección de secado.

El control de este parámetro se puede considerar, a la vista de los datos reflejados en las Tablas 5.9a y 5.9b como un factor fundamental en la estrategia de incremento de la eficiencia del proceso y reducción de las emisiones de CO₂. Se constata también como la estrategia de reducción afecta también de manera significativa al “modo” de gestionar la planta de producción, es decir, al sistema de gestión adoptado

y al uso de indicadores medioambientales como el indicador propuesto en la Tesis “t CO₂ / t Producción”. El estudio del indicador y a la descomposición del mismo en sub-indicadores relacionados directamente con el proceso productivo puede aportar ventajas como la mejora en las limitaciones del cuello de botella del proceso productivo y una reducción en los costes tanto energéticos como medioambientales que tienen relación directa con el estado de mantenimiento del proceso productivo.

Otro parámetro a tener en cuenta lo constituye el flujo de aire de soplado a campana con sus dos características principales, su temperatura (*Ebt*) principalmente y el caudal del mismo. Hay que tener en cuenta, como ya se ha explicado en el Capítulo 4 relativo al proceso de fabricación estudiado, que la hoja húmeda de papel se seca por la evaporación del agua por debajo de su punto de ebullición mediante la transferencia de humedad al aire circundante a la hoja. El aire de extracción de la campana tiene la doble función de extraer la humedad evaporada del papel desde el interior de la campana al exterior y segundo en su salida, ser la fuente de energía en los intercambiadores de calor para calentar el aire de soplado a campana.

Se puede constatar en los datos obtenidos en la Tabla 5.11 la influencia que tiene el estado de mantenimiento de los intercambiadores en el caudal de aire extraído y soplado a la campana y el incremento también en la cantidad de energía recuperada que no es necesario aportar al papel mediante vapor. El incremento de estos dos caudales de aire hace que el aire de compensación de la nave se reduzca. La mayor cantidad de aire disponible en condiciones adecuadas permite aumentar la capacidad de evaporación en el interior de la campana y reducir la limitación que la sección de secado que constituye el cuello de botella de la instalación.

Atendiendo al indicador considerado en la Tesis “t CO₂ / t Producción”, su relación se hace evidente en la Tabla 5.11 por la diferencia de energía disponible después de la reparación de los intercambiadores de calor y en la Tabla 5.12 en el balance de las emisiones donde la energía perdida en el sistema de soplado puede llegar a superar el 10% de la energía consumida.

Los valores anteriores relativos al estado de mantenimiento de la instalación, el agua de reposición al circuito de caldera (*Cw*) y el caudal y características de los flujos de aire de campana (extracción y soplado) se corresponden a los de una fábrica cuyo nivel de emisiones antes de las intervenciones era comparable al del *benchmark* de producto establecido para este tipo de papel. Hay que recordar que la fábrica objeto de estudio incluso era excedentaria en las emisiones de CO₂ respecto a la asignación

gratuita, lo que indica que su estado de mantenimiento en general era por lo menos comparable con el 10% de las mejores plantas productivas Europeas que sirvieron para establecer el *benchmark*. Hecho que, con la cautela que requiere, se extrapola al resto del sector de fabricación de papel supone un elevado potencial de ahorro.

En los apartados anteriores se ha puesto de manifiesto que hay una relación directa entre las pérdidas de energía debidas a los flujos de aire de campana y las emisiones de CO₂. También se ha observado que el aire de la nave de fabricación tiene una temperatura entre 20-21°C independientemente de la temperatura exterior. Hay que tener en cuenta que la nave de fabricación donde está situado el proceso productivo no tiene sistema de acondicionamiento de aire (calefacción). El calor aportado al aire de la nave de producción y que la mantiene caliente durante todo el año mientras el proceso está en marcha proviene principalmente por las pérdidas térmicas de la campana de secado y en menor medida del calor evacuado por los motores eléctricos, iluminación, etc.

Se puede observar en la Tabla 5.13, la energía que se ha añadido a los flujos de aire de entrada a la nave de producción procedente del exterior, que sale por los extractores y las aperturas del techo, tiene un valor muy significativo respecto al consumo total de energía utilizado en el proceso de secado de papel. El origen de la energía añadida está en las pérdidas de aislamiento de la campana. La energía proviene del vapor suministrado a la sección de secado para calentar los cilindros secadores que se produce en la caldera o generador de vapor.

Considerando el balance de los flujos de aire recogidos en la Tabla 5.13, el total de la diferencia de energía entre estos flujos de entrada y salida proviene de las pérdidas de aislamiento, evacuado por las salidas de ventilación como extractores y aberturas de techos.

En la Tabla 5.15 se evidencia la importancia de estas pérdidas. Comparándolas con el consumo medio de energía para producir una tonelada de papel en la fábrica, corresponden al 12,51% de la energía total utilizada en el secado térmico del papel.

Este valor se ha validado también por métodos tradicionales, en la Tabla 5.16 se muestran los resultados obtenidos del cálculo de las pérdidas de energía térmica por el método convencional, conducción y convección. Si comparamos estos datos de nuevo con el consumo total de energía de papel de secado, la energía perdida por el

aislamiento representa el 12,97% del total de energía suministrada a la sección de secado.

El valor obtenido de las pérdidas por el nuevo método introducido en la Tesis (estudio de los flujos de aire) y el tradicional muestran una diferencia numérica entorno al 3,6% lo suficientemente pequeño como para ser considerado válido el cálculo mediante el nuevo método de análisis.

En la Figura 5.27 como se puede observar en las imágenes no térmicas el estado general de la campana, aparentemente no presenta deficiencias notables apreciables que nos puedan hacer intuir la magnitud de estas pérdidas. Si se observa en detalle las imágenes térmicas de los mismos puntos se constatan los fallos de aislamiento. Las pérdidas están localizadas principalmente en las puertas y el techo de la campana de secado, elementos que mayor número de veces se abren u operan para el control del proceso y las operaciones de mantenimiento.

Es interesante observar en el primer par de imágenes del acceso por la parte de accionamiento de motores de la máquina, correspondientes a una zona no transitada habitualmente, que las aberturas son mucho mayores que las mostradas en el último par de imágenes de la zona denominada de mando frecuentemente empleada por el personal de operación. En la Figura 5.27.a se observa claramente el desajuste entre la puerta de cierre y la estructura. Este hueco conecta el interior de la campana de aislamiento, que está a 143°C con la nave de producción. Esta temperatura es muy superior a la observada en la Figura 5.27.b y que se corresponde a la parte superior de la campana situado encima de la puerta de acceso. En este caso los puntos calientes se corresponden con las juntas entre paneles y no supera el punto más desfavorable los 58°C. El resto de paneles laterales de la zona de accionamiento tiene deficiencias similares, como se puede observar en las imágenes térmicas en las Figuras 5.27.d.

Si observamos las imágenes de la zona de mando, Figuras 5.27.e y 5.27.f se observan también las zonas deficientemente selladas. En la zona de las puertas de acceso los desajustes son menores y la temperatura de contacto también es inferior a las de temperatura de los huecos de la zona de accionamiento, con un máximo de 85°C. En los paneles superiores de la zona de mando, los desajustes son similares a los de la zona de accionamiento. Como se puede observar en la Figura 5.27.g correspondiente al lado mando, la Figura 5.27.b correspondiente al lado de accionamiento y la Figura 5.27.d que se corresponde al panel frontal de salida del papel de la sección de secado. La temperatura máxima en ambos casos esta entre los 58 y 61°C.

Se observa en las figuras correspondientes a los paneles de cierre situados encima de las puertas de acceso, que la temperatura aumenta conforme se acerca a la parte superior, debido principalmente a ser la zona más caliente y donde se sitúa la extracción del aire del interior de la campana hacia el exterior. La Figura 5.27.c muestra la imagen de la zona superior de la campana de aislamiento donde se pueden observar las salidas de los conductos de extracción de aire. La temperatura en la parte superior del techo es similar a la de los conductos de extracción. Esta zona de la campana se encuentra a escasos metros de las aperturas del techo por donde sale el aire debido al efecto termosifón.

Aparentemente el estado de aislamiento y mantenimiento de la instalación es adecuado, según se observa en todas las imágenes no térmicas de la Figura 5.27 si se observan en concreto las Figuras 5.27.g y 5.27.h no se intuye a simple vista los defectos de ajuste de los paneles y cierres que sin embargo están.

6.3.- EVOLUCIÓN DE LAS EMISIONES DE CO₂

La acción conjunta sobre los indicadores seleccionados y a lo largo del tiempo, ha permitido, según se observa en la Figura 6.1, una reducción paulatina de las emisiones de la fábrica y consecuentemente del indicador “t CO₂ / t Producción” a lo largo de los cuatro periodos de implantación del ETS. El periodo base tomado como referencia que corresponde a los años 2001 a 2004. El primer periodo de asignación gratuita total 2005 a 2007. El segundo periodo de 2008 a 2012, en el que las emisiones tienen ya un coste real para la fábrica. El primer año del tercer periodo que empieza en 2013 y termina en 2020, en el que estamos inmersos actualmente.

Se puede observar en la Figura 6.1 la evolución del indicador entre el año 2004 y 2007 su valor es bastante estable. La bajada producida de 2001 a 2003 corresponde principalmente a sustitución de caldera e intercambiador de la misma. El tramo 2004-2007 se corresponde con un periodo de tiempo en el que se define el indicador pero como no se actúa sobre él, solamente se consideraran los datos como una referencia de valor. Al llegar a 2008 y comenzar a utilizar este indicador como principal indicador de la EMS, trabajar en su desarrollo y reducción, se puede ver claramente que la reducción lograda se acentúa, bajando significativamente el valor del indicador.

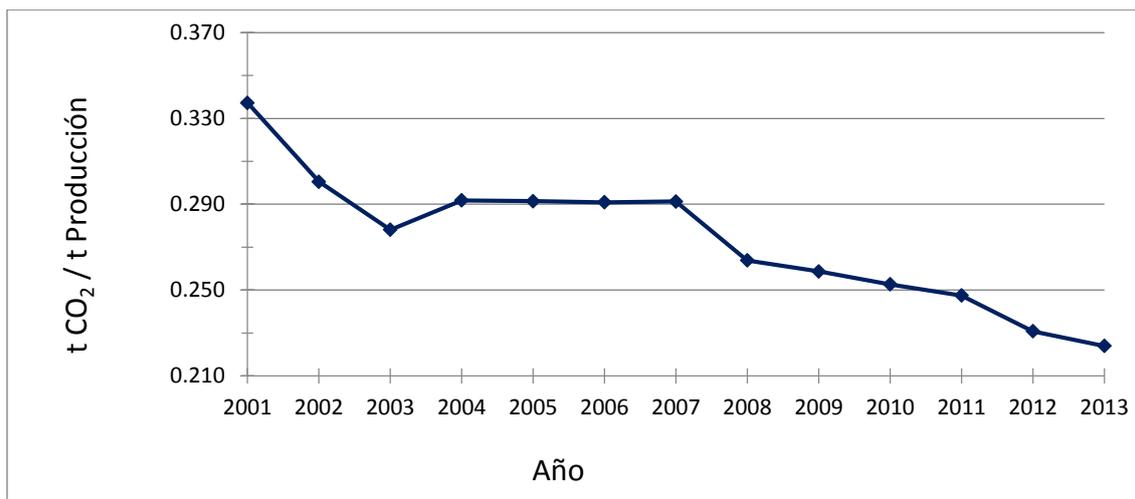
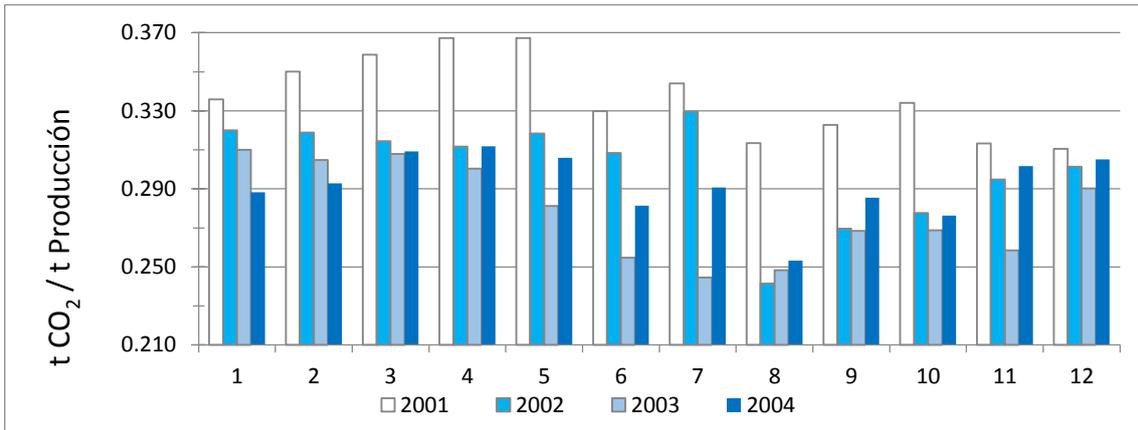


Figura 6.1. Evolución del indicador - “t CO₂ / t Producción” del 2001 al 2013.

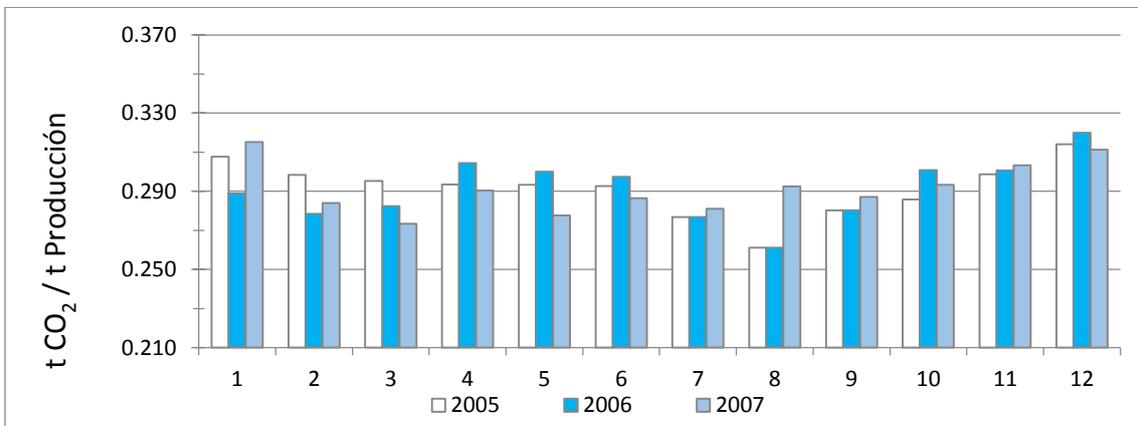
Para aclarar la interpretación de datos y análisis de instalación de ellos, el gráfico mostrado en la Figura 6.2 se divide en tres secciones. El primero contiene los datos correspondientes a los años 2001-2004, período que no era plan de emisiones ETS activa. El segundo contiene los datos de 2005 a 2007, que se corresponde con el primer período de aplicación del ETS. El tercero corresponde a 2008 hasta la fecha, incluyendo el segundo período de ETS y el primer año del tercer período de ETS.

En la Figuras 6.2.a, 6.2.b y 6.2.c pueden observarse como el indicador considerado ha ido disminuyendo también gradualmente cada año, un hecho que se hace evidente a partir de 2011. Las Figuras 6.2.a, 6.2.b y 6.2.c también muestra la variación del índice durante los doce meses del año, cuando la temperatura exterior es más frío en los meses de invierno (1, 2, 11 y 12) que en el resto, lo que hace hincapié en la importancia de controlar la temperatura del aire soplado (*Ebt*).

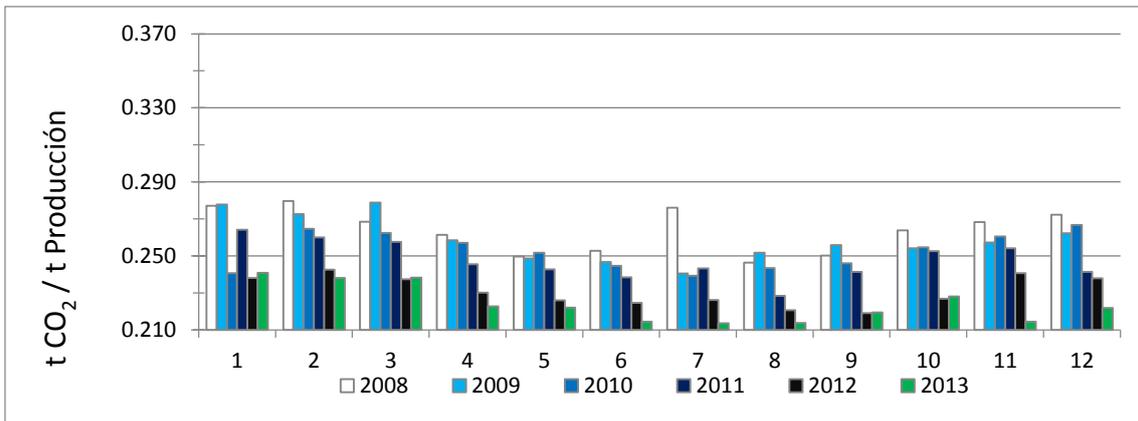
La reducción del indicador ha sido progresiva en cada periodo. En todos los gráficos la diferencia entre el primer y último año es evidente. Si se revisan los tres gráficos conjuntamente, se puede observar como las acciones llevadas a cabo hacen que el nivel del indicador en el eje de ordenadas, se reduzca significativamente sobre todo desde 2008 en el que coincide con el inicio del uso del indicador “t CO₂ / t Producción”.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.2. Evolución mensual del indicador - “t CO₂/t Producción” desde 2001 a 2013.

6.4.- CONSIDERACIONES FINALES SOBRE EL ANÁLISIS DE RESULTADOS

La presente Tesis, como se ha indicado en el Capítulo 3, ha adoptado la metodología del estudio del caso, para alcanzar los objetivos definidos en el Capítulo 1. Esta metodología se ha usado como recomendaba la literatura científica, y Fidel (1984) por la existencia de una gran cantidad de factores y relaciones en el fenómeno a estudiar, caso de la introducción en esta Tesis del indicador “t CO₂ / t Producción” como indicador de eficiencia y sostenibilidad en plantas industriales de proceso continuo, en concreto aplicado al secado del papel.

Se ha constatado en este estudio, que los factores o relaciones se pueden observar o medir directamente. Como se concluye en este Capítulo 6 sin esas premisas no se puede determinar realmente su importancia. Se puede constatar que el rigor en la sistemática en la recopilación de los datos de la fábrica objeto de estudio ha sido muy importante en la presente Tesis y evita sesgos en la interpretación.

Según se puede interpretar del análisis de datos realizado, la influencia de las condiciones de mantenimiento y parámetros de producción afectan significativamente al indicador considerado, a la eficiencia y a la sostenibilidad de la fábrica.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

Los procesos de producción continuos generalmente están asociados a plantas industriales de gran tamaño en el que los altos volúmenes de producción, el tiempo que dura el proceso y los elevados consumos tanto de materias primas como de energía, provoca que las inercias del proceso propicien que los parámetros de control utilizados para controlar la eficiencia global no varíen de forma repentina. La maquinaria asociada con este tipo de producción tiene un periodo de funcionamiento útil de varios años, provocando que las condiciones de funcionamiento del sistema a lo largo de su vida útil puedan desviarse de las inicialmente diseñadas. Este hecho puede inducir a considerar que las pequeñas desviaciones de los parámetros en el corto plazo no serán de trascendencia respecto a consumo de energía o las emisiones producidas por el complejo. Se constata sin embargo la importancia del control de esas pequeñas variaciones de los indicadores para evitar que su acción conjunta provoque una caída significativa en la eficiencia global del proceso y la contaminación que provoca.

Se hace evidente la importancia de analizar la influencia de los parámetros de bajo nivel utilizados para el control y medida del rendimiento global del proceso productivo. Se constata que es posible mejorar la eficiencia de manera significativa por medio del establecimiento de pautas de supervisión en el proceso que eviten que el punto real de funcionamiento del sistema productivo se aleje paulatinamente del punto óptimo diseñado inicialmente. Las operaciones de mantenimiento en este tipo de procesos se revelan como un aspecto fundamental a tener en cuenta.

La Tesis constata la importancia de diseñar una estrategia global en la planta para el control de los parámetros de producción, del estado de mantenimiento de las instalaciones y equipos. La reducción de las emisiones industriales y la mejora de la eficiencia no son insensibles a las acciones de control realizadas. El potencial de ahorro energético y de emisiones asociadas puede llegar a ser significativo. La reducción de las emisiones industriales, aunque en el actual Protocolo de Kioto (Naciones Unidas, 1998) se plantean con horizontes temporales lejanos (2030 y 2050) muchas veces confiando en cambios tecnológicos de los procesos y eliminación de las fuentes de energía basadas en combustibles fósiles, puede y debe acometerse a través de la mejora continua en la eficiencia y sostenibilidad de los procesos actuales.

En la Tesis ha estudiado la viabilidad de introducir un nuevo indicador de Emisiones de CO₂ calculado relativo a la producción real del complejo de fabricación “t

CO₂ / t Producción”, con el objetivo de encontrar la relación entre el indicador y las variables de disponibilidad de máquina debidas al mantenimiento y los parámetros operativos del propio proceso productivo. El resultado obtenido permite afirmar, en una primera aproximación, que esta ratio puede ser útil para identificar oportunidades que mejoren la eficiencia y la sostenibilidad en los procesos continuos.

En este estudio se pone de manifiesto que hay variables asociadas al proceso productivo que influyen más en el indicador que el propio tipo de producto fabricado y el gramaje de papel. Pese a que cada tipo de papel fabricado tiene una formulación distinta tanto de materia prima como de productos añadidos, lo que hace que tenga una característica específica en la facilidad de eliminación del agua que contiene pero menos significativa que otros parámetros de producción e incluso las condiciones de mantenimiento de la propia instalación de secado.

La influencia de variables como disponibilidad de una fábrica y factores externos al proceso se ha constatado que afectan significativamente a las emisiones de CO₂ y al indicador considerado “t CO₂ / t Producción”. Su aplicación a plantas de proceso continuo como la fabricación de papel y sobre su cuello de botella, permiten encontrar evidencias, en cuanto a lo siguiente:

La reducción de la disponibilidad de la fábrica lleva a una ratio menor de emisiones “t CO₂ / t Producción”, a pesar de que las paradas sean debidas a averías.

El tipo y gramaje del papel afecta menos en la ratio “t CO₂ / t Producción” que los factores externos y parámetros de producción.

La temperatura exterior a la que está sometida la fábrica influye en la ratio “t CO₂ / t Producción”, encontrándose valores más bajos del indicador a medida que aumenta la temperatura.

Se constata también la influencia en el indicador de;

Variables específicas del proceso asociadas al tipo de producto fabricado como la densidad superficial del papel (*Pd*), contenido de humedad a la salida de la sección de secado (*Pmo*).

VARIABLES ESPECÍFICAS DEL CONTROL DEL PROCESO COMO LA TEMPERATURA A LA ENTRADA DE LA SECCIÓN DE SECADO (P_{ti}), ANCHO DE HOJA (p_{wi}).

Otros factores incontrolables del proceso como la temperatura exterior (O_t) pueden servir para evaluar el estado de mantenimiento de las instalaciones de secado y su influencia en el en el indicador "t CO₂ / t Producción".

El uso de valores de estas variables relacionadas con el proceso de producción, centradas específicamente sobre el cuello de botella del proceso productivo, la sección de secado en este caso, y el análisis basado en experimentos llevado a cabo en el apartado 5.8 nos ha permitido identificar la relación entre las variables de proceso y el indicador "t CO₂ / t Producción". Se ha confirmado que hay una fuerte influencia en el indicador de los efectos de la humedad (O_m) y la temperatura del aire exterior (O_t) debido al estado de mantenimiento de las instalaciones de secado.

Los resultados obtenidos en la Tesis permiten confirmar la influencia significativa de las variables identificadas sobre el indicador. Este conocimiento nos permite establecer pautas de revisión de la instalación y poder evaluar su estado de mantenimiento, aspecto muy importante a la hora de mejorar la eficiencia y la sostenibilidad del proceso de producción de la fábrica.

Este estudio también pone de relieve que, una vez la influencia de la temperatura exterior se ha eliminado, hay otros parámetros que influyen en el indicador que puede estar sujeta a control con los que se puede hacer que la influencia del proceso respecto a parámetros incontrolables externos como O_t se reduce notablemente.

Los sistemas de gestión y control CMS y EMS implantados en los que se tienen en cuenta indicadores medioambientales para establecer pautas de mantenimiento sobre el proceso, tienen una importancia muy significativa en la reducción de las emisiones de CO₂ del proceso de producción en general y de la fábrica en estudio en particular. Este hecho indica que es factible alcanzar reducciones significativas de las emisiones a través del control, mantenimiento de las instalaciones, a través de la implantación de normas diarias de control sobre las instalaciones y el proceso.

Se constata que hay una relación directa entre el indicador definido "t CO₂ / t Producción" y la eficiencia instalación. Este indicador puede emplearse como una herramienta útil para identificar el estado de mantenimiento de las instalaciones. Un aumento en esta relación esta frecuentemente asociada al deterioro de las instalaciones,

por lo que se puede considerar válido para evaluar la eficiencia en la fabricación, y si se descompone en sub indicadores se puede a través de ellos encontrar las causas de las ineficiencias del proceso productivo.

La eficiencia energética afectan significativamente los procesos de producción continuos, tanto en términos económicos por el costo de la energía, como en términos medioambientales por las emisiones asociadas. El estudio llevado a cabo en esta Tesis pone de manifiesto que hay un potencial significativo de reducción de las emisiones en general y de las de CO₂ en particular mediante el control del proceso y los parámetros operativos asociados al mismo. Las plantas de producción industrial no deben relegar su actuación sobre la sostenibilidad del proceso productivo a la sustitución de equipos, tienen que encontrar formas de ayudar a mejorar la eficiencia mediante el control diario y continuo de los procesos y el funcionamiento de la maquinaria utilizada.

Se ha revelado como particularmente interesante el método indirecto de cálculo de pérdidas de energía mediante el estudio de la energía térmica añadida a los flujo de aire que circula en la nave de producción. El método permite encontrar y cuantificar de manera indirecta las pérdidas de energía térmica del proceso. El método empleado se ha comparado con el sistema tradicional de cálculo de la pérdida de energía por conducción y convección obteniendo resultados similares.

El uso de imágenes térmicas se ha demostrado válido y tiene un doble propósito:

El establecer la temperatura media de los paneles de aislamiento de la cubierta de la campana de secado.

Como una herramienta para encontrar y clasificar huecos o espacios abiertos en la campana de secado para priorizar su reparación.

Revisando los objetivos planteados en el Capítulo 1, se ha estudiado la problemática de las emisiones de CO₂ en la industria de fabricación de papel, y se ha visto que es factible utilizar las emisiones de CO₂ como indicador en el proceso, sirve para emplearlo como instrumento de medida de eficiencia y sostenibilidad en los procesos de fabricación.

Se han encontrado relaciones inequívocas entre las emisiones y el estado de mantenimiento y el control de las condiciones operativas del proceso, se constata que se

puede asociar estas variaciones del indicador de emisiones de CO₂ con el estado de operación y mantenimiento de la maquinaria asociada al proceso.

El cambio de enfoque que se pretendía introducir evaluando los procesos desde el prisma de las emisiones de CO₂, las coloca en un nivel que hasta ahora no habían tenido en los procesos industriales, pasando de ser una mera consecuencia del proceso a una oportunidad de evaluación continua para mejorarlo.

La relación existente y frecuentemente olvidada, entre el indicador analizado “t CO₂/ t Producción” de sostenibilidad y la eficiencia global de planta (OEE, OTE, OFE) se evidencia por la influencia que tienen sobre el indicador las variables de disponibilidad. La importancia de estos indicadores no es significativa solo por el coste directo que provoca (pago por uso de energía, gestión de residuos, etc.) sino también por el efecto que tiene sobre la disponibilidad de máquina y la calidad del producto fabricado.

Los resultados obtenidos en la Tesis permiten afirmar que la reducción de las emisiones asociadas a un proceso industrial no se debe asociar únicamente a la eficiencia energética del proceso que se alcanza mediante el cambio de maquinaria e instalaciones antiguas por otras nuevas más “eficientes”. La operación diaria del proceso y el establecimiento de pautas de mantenimiento conducen también a reducciones significativas del indicador y mejoras en la eficiencia y sostenibilidad del proceso.

Es habitual que en ciertas regiones geográficas la primera acción para reducir las emisiones de CO₂ sea la sustitución de la fuente de energía fósil como petróleo, carbón y fueloil por otra menos contaminante como el gas natural o incluso alternativas como la biomasa o cambio de maquinaria por otra nueva. Dichas soluciones reducen inicialmente las emisiones, pero dichas máquinas también envejecen y se vuelven menos eficientes debido al cambio en las condiciones operativas y a su estado de mantenimiento.

Se ha constatado que en los procesos de producción continuos como el de fabricación de papel, los distintos equipos implicados en el secado térmico, pueden y de hecho pierden por diversas razones la eficiencia inicialmente calculada. El abordar la reducción de emisiones como consecuencia del seguimiento y mantenimiento de las instalaciones puede aportar una ventaja significativa en el aumento de la eficiencia y sostenibilidad del proceso productivo. El presente estudio revela que se puede introducir

el indicador “t CO₂ / t Producción” como indicador válido para medir el estado de mantenimiento y puesta a punto de la maquinaria del proceso.

El uso de este indicador también puede ser empleado para ayudar a encontrar las causas de las limitaciones de producción debidas a ineficiencias y para establecer las condiciones operativas que permitan un incremento de la capacidad de producción en el proceso de fabricación.

Este trabajo ha determinado el efecto de los principales parámetros de funcionamiento en la fabricación de papel asociadas a una sección de secado térmico con el indicador “t CO₂ / t Producción”. Con esta información la fábrica puede adaptar su producción para reducir el indicador.

Se ha constatado la importancia de la introducción de indicadores ambientales en el sistema general de Gestión Corporativa (Corporate Management System CMS) como medida primaria. La gestión del indicador y la descomposición del mismo en sus componentes principales, con el objetivo de identificar las mejores prácticas, normas diarias y acciones para su control desde el punto de vista de la gestión y mantenimiento de la fábrica, tienen un efecto importante y directo en la reducción del indicador considerado.

Finalmente este estudio se ha demostrado que se puede introducir las emisiones de CO₂ como indicador válido en el proceso de fabricación, para emplearlo como instrumento de medida de la eficiencia de producción y el estado de mantenimiento y puesta a punto de la fábrica.

Sostenibilidad significa utilizar los recursos para satisfacer nuestras necesidades sin comprometer los recursos para las generaciones futuras. El indicador estudiado “t CO₂ / t Producción” ayuda en definitiva a evaluar la eficiencia y sostenibilidad de los procesos industriales que permiten un uso adecuado de los recursos.

CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA

- Aguado S., Alvarez R., Domingo R. (2012). “Model of efficient and sustainable improvements in a lean production system through processes of environmental innovation”. *Journal of Cleaner Production*, 47, 141-148.
- AI SLAM (2013). “Programa de calculo de aislamientos”. Atecyr y Universidad Politécnica de Valencia.
- Alsyouf I. (2009). “Maintenance practices in Swedish industries: Survey results”. *International Journal of Production Economics*, 121, 212–223.
- Álvarez Laverde H. (2009). “Aspectos intangibles del TPM”, nota técnica de “Apsoluti Technologies”.
- ASPAPEL (2014). “Pulp and paper sector’s sustainability report”. Asociación Española de Fabricantes de Pasta, Papel y Cartón. [Internet] Disponible en: www.aspapel.es.
- Austing P. (2010). “Reducing energy consumption in papermaking using advanced process control”. ELCF Seminar, Wed 3 Feb 2010, University of Cambridge.
- Banco Mundial (2015). “Emisiones de CO2 (kt)”. Banco Mundial, Centro de Análisis de Información sobre Dióxido de Carbono, División de Ciencias Ambientales del Laboratorio Nacional de Oak Ridge (Tennessee, Estados Unidos). [Internet] Disponible en: <http://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.KT?page=2&display=map>.
- Barber E. (2011). “Xerium dryer fabric cleaning”. [Internet] Disponible en: www.xerium.com. [consultado en 2011].
- Bauer W., Zeyringer E., Ullrich H. (1998). “Important drying parameters for the layout of a new production line”. *Coating Conference Proceedings*. Tappi-PIMA. [Internet] Disponible en: www.tappi.org.
- Baxter P., Jack S. (2008). “Qualitative case study methodology: study design and implementation for novice researchers”. *The Qualitative Report*, 13, 544-559.
- Bhutani N., Lindberg C., Starr K., Horton R. (2012). “Energy assessment of paper machines”. *Energy Procedia*, 14, 955 – 963.
- Bicudo L.C. (2008). “Avalacioes na secagem e sua area influence na qualidade do paper”. *Magazine Technical Opapel*, 4, 48-56.
- Brunnschweiler (2010). “Optimización del consumo energético en la sección de secado de la máquina de papel”. Conferencia Escuela del papel de Tolosa.
- Cancun (2010). “COP 16”. XVI Conferencia de la ONU sobre cambio climático de Cancun (Mexico) diciembre de 2010.
- Capozzi P., Masini P., Pozzato M. (2001). “Application and selection of stationary and rotating siphon system”. *Tappi Journal Peer Reviewed Paper*, 84.

- CEPI, Confederation of European Paper Industries (2013). "Sustainability report 2013". www.cepi.org.
- Chand G., Shirvani B. (2000). "Implementing of TPM in cellular manufacture". *Journal of Materials Processing Technology*, 103, 149-154.
- Chase R.B., Jacobs F.R., Aquilano N.J. (2009). "Administración de Operaciones. Producción y cadena de suministros". McGraw-Hill, México, 12 edición.
- Copenhague (2009). "COP 15". XV Conferencia de la ONU sobre cambio climático de Copenhague (Dinamarca) diciembre de 2009.
- Culaba A.B., Purvis M.R.I. (1999). "A methodology for the life cycle and sustainability analysis of manufacturing processes". *Journal of Cleaner Production*, 7, 435-445.
- Decisión 2004/156/CE de la Comisión, de 29 de enero de 2004, por la que se establecen directrices para el seguimiento y la notificación de las emisiones de gases de efecto invernadero de conformidad con la Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo. *Diario Oficial de la Unión Europea* L 59/1, 29 enero 2004.
- Decisión 2007/589/CE de la Comisión, de 18 de julio, por la que se establecen directrices para el seguimiento y la notificación de las emisiones de gases de efecto invernadero de conformidad con la Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo. *Diario Oficial de la Unión Europea* L 229/1, 18 julio 2007.
- Decisión 2010/2/UE de la Comisión, de 24 de diciembre, por la que se determina, de conformidad con la directiva 2003/87/EC del Parlamento Europeo y del Consejo, una lista de sectores y subsectores que se consideran expuestos a un riesgo significativo de fuga de carbono. *Diario Oficial de la Unión Europea* L 1/10, del 24 de diciembre de 2009.
- Decisión 2015/146 del Consejo de 26 de enero de 2015 relativa a la firma, en nombre de la Unión Europea, del Acuerdo entre la Unión Europea y sus Estados miembros, por un lado, e Islandia, por otro, sobre la participación de Islandia en el cumplimiento de los compromisos de la Unión Europea, sus Estados miembros e Islandia para el segundo período de compromiso del Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. *Diario Oficial de la Unión Europea* L 26/1, 31 de enero de 2015.
- Del Rio González P. (2005). "Analysing the factors influencing clean technology adoption: A study of the Spanish pulp and paper industry". *Business Strategy and the Environment*, 14, 20-37.
- Directiva 2008/1/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de Enero de 2008, relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación. *Diario Oficial de la Unión Europea* L 24/8, del 15 de enero de 2009.
- Doha (2012). "COP 18", XVIII Conferencia de la ONU sobre cambio climático de Doha (Qatar) diciembre de 2012.
- Domingo R., Aguado S. (2015). "Overall Environmental Equipment Effectiveness as a metric of a Lean and Green Manufacturing System". *Sustainability*, 7, 9031-9047.

- Dumortier G. (2010). "Improving drying efficiency of the coating process by optimal use of energy from infrared dryers". Papertcon`10 conference.
- Durán Romero G, (2000). "Medir la sostenibilidad con indicadores económicos, ecológicos y sociales". Universidad Autónoma de Madrid.
- Durban (2011). "COP 17", XVII Conferencia de la ONU sobre cambio climático de Durban (Sudáfrica) diciembre de 2011.
- ECOFYS (2009). "Methodology for the free allocation of emission allowances in the EU ETS post 2012". www.ecofys.com/files/files/091102_pulpandpaper.pdf
- ECOFYS (2011a). European Commission – Climate Action (2011). "Methodological guidelines". [Internet] Disponible en http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/benchmarking/documentation_en.htm.
- ECOFYS (2011b). European Commission – Climate Action, guías metodológicas. [Internet] Disponible en http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/benchmarking/documentation_en.htm.
- ECOFYS (2013). European Commission. "Benchmarks for free allocation", European Decision, reference Documents and guidelines for calculating allocation of emission rights in different processes. [Internet] Disponible en http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/cap/allocation/documentation_en.htm.
- Ecoportal (2012) www.ecoportal.net/Temas_Especiales/Desarrollo_Sustentable/De_Rio_de_Janeiro_a_Johannesburg
- Ekvall J., Hägglund T. (2008). "Improved web break strategy using a new approach for steam pressure control in paper machines". Control Engineering Practice, 16, 1151-1160.
- EN 12953 (2003). "Shell boilers - part 10: Requirements for feedwater and boiler water quality". European Committee for Standardization, Brussels.
- Eti M.C., Ogaji S.O.T., Probert S.D., (2004). "Implementing total productive maintenance in Nigerian manufacturing industries". Applied Energy, 79, 385–401.
- Eti M.C., Ogaji S.O.T., Probert S.D., (2006). "Impact of corporate culture on plant maintenance in Nigerian electric power industry". Applied Energy, 83, 299–310.
- European Commission - Climate Action (2015). "Free allocation based on benchmarks". [Internet] Disponible en: http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/cap/allocation/studies_en.htm.
- European Commission (2011b). "Benchmarks for free allocation". Documents of reference and guidelines for the calculation of allocation of emissions in the various processes. [Internet] Disponible en: http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/cap/allocation/documentation_en.htm.
- European Commission (2014). "Reference document under the IPPC Directive and the IED containing the best available techniques, reference documents". [Internet] Disponible en: <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/>.

- European IPPC Bureau, (2014). “Best Available Technologies (BAT), as required by Article 13(1) of the Industrial Emissions Directive (IED, 2010/75/EU)”. [Internet] Disponible en: <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/>
- Fidel R. (1984). “The case study method: a case study”. *LISR*, 6, 273-288.
- Flyvbjerg B. (2006). “Five misunderstandings about case-study research”. *Qualitative Inquiry*, 12, 219-245.
- Gasbarro F., Rizzi F., Frey M. (2013). “The mutual influence of environmental management systems and the EU ETS: Finding for the Italian pulp and paper industry”. *European Management Journal*, 31, 16-26.
- Ghose A., Chinga-Carrasco G. (2013). “Environmental aspects of Norwegian production of pulp fibres and printing paper”. *Journal of Cleaner Production*, 57, 293-301.
- Gomes de Matos A. (1997). “Proyecto Aridas para la gestión del desarrollo sostenible en el nordeste de Brasil”. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, Serie de Publicaciones Misceláneas, ISSN 0534-5391, Capítulo 1, 17-54.
- Holliday C., Dormann J. (2002). “Innovation technology sustainability and society”. World Business Council for Sustainable Development. ISBN 2-940240-27-2.
- Hostetler R.E., Pelletier D., Cloutie C. (2005). “Effect of drying conditions on the development of binder strength in double coated SBS paperboard”. TAPPI Coating Conference.
- Intel Eco-Technology Innovations, (2007). “White paper, advancing global sustainability through technology”. Intel. 0807/JN/OCG/XX/PDF.
- International Energy Agency (IEA), (2012). “Key world energy statistics”. [Internet] Disponible en: www.iea.org/publications/freepublications/publication/Kwes.pdf.
- IPCC, (1995). “The second assessment report”. Intergovernmental Panel on Climate Change, [Internet] Disponible en : <https://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-1995/ipcc-2nd-assessment/2nd-assessment-en.pdf>.
- IPCC, (2007). “The fourth assessment report”. Intergovernmental Panel on Climate Change. [Internet] Disponible en : https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf.
- IPCC, (2014). “The fifth assessment report”. Intergovernmental Panel on Climate Change. [Internet] Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/>.
- IPE (2011). “Auditoría de la parte seca de la máquina de papel”. Instituto Papelero Español, Jornada técnica del 3 de marzo 2011.
- ISO 536 (2012). “Paper and board - determination of grammage”. International Organization for Standardization, Geneva.
- Karlsson M. (2000). “Papermaking part 2, Drying”. Papermaking Science and Technology series, 9. Finnish Paper Engineers Association, Tappi Press.

- Karner N., Herzog F. (2008). "New drying technology for higher drying rates and improved product quality". TAPPI-PIMA Papertcon`08 conference.
- Kong L., Price L., Hasanbeigi A., Liu H., Li J. (2013). "Potential for reducing paper mill energy use and carbon dioxide emissions through plant-wide energy audits: A case study in China". *Applied Energy*, 102, 1334–1342.
- Kong L.B., Hasanbeigi A., Price L. (2014). "Emerging energy-efficiency and greenhouse gas mitigation technologies for the pulp and paper industry". Lawrence Berkeley National Laboratory, California, USA.
- Koper G.J.M., Kjelstrup S., Van de Ven T., Sadeghi M., Douglas W.J.M. (2007). "Entropy production for cylinder drying of linerboard and newsprint". *Heat and Mass Transfer*, 50, 1344-1355.
- Lang I., Smith R., Tawfik R., Poirier N. (2001). "High surface temperature drying – effect on drying rate and product quality". Tappi-PIMA.
- Laurijssen J., de Gream F.J., Worrel E., Faaij A. (2010). "Optimizing the energy efficiency of conventional multi-cylinder dryers in the paper industry". *Energy*, 35, 3738-3750.
- Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero. Boletín Oficial del Estado, de 10 de marzo de 2005, núm. 59, pp. 8405-8420.
- Ley 13/2010, de 5 de julio, por la que se modifica la Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, para perfeccionar y ampliar el régimen general de comercio de derechos de emisión e incluir la aviación en el mismo. Boletín Oficial del Estado, de 6 de julio de 2010, núm. 163, pp. 59586-59627.
- Li L., Ni J. (2009). "Short-term decision support system for maintenance task prioritization". *International Journal of Production Economics*, 121, 195-202.
- Martin A., Drotz M., Talja R., Kiajaluoto S., Puumalainen T. (2004). "Energy analysis of impulse technology; research-scale experimental trials and simulations of industrial applications alum". *Applied Thermal Engineering*, 24, 2411-2425.
- Ministerio de Medio Ambiente (2011). Informe Inventarios GEI mayo 2011, Anexo 8, Referencia del Inventario para la Aplicación del Real Decreto 1315/2005, BOE 136 de 4 de Noviembre de 2005. Ambiente. [Internet] Disponible en: http://www.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/comercio-de-derechos-de-emision/el-comercio-de-derechos-de-emision-en-espana/seguimiento-y-verificacion-de-las-emisiones/val_cal_net_inv_nac_emi.aspx
- Mollier R. (1929). "The i/x -chart for steam-air mixtures". *Journal of the Association of German Engineers (Das i/x -diagramm für Dampfluftgemische. Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure)* 73, 1009-1013.
- Moya J.A., Pardo N. (2013). "The potential for improvements in energy efficiency and CO₂ emissions in the EU27 iron and steel industry under different payback periods". *Journal of Cleaner Production*, 52, 71-83.

- Muthiah K.M.N., Huang S.H., Mahadevan S. (2008). "Automating factory performance diagnostics using overall throughput effectiveness (OTE) metric". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36, 811–824
- Muthiah K.M.N., Huang S.H.. (2007). "Overall throughput effectiveness (OTE) metric for factory-level performance monitoring and bottleneck detection". *International Journal of Production Research*, 45, 4753-4769.
- Nachiappan R.M., Anantharaman N. (2006). "Evaluation of overall line effectiveness (OLE) in a continuous product line manufacturing system". *Journal of Manufacturing Technology Management*, 17, 987-1008.
- Naciones Unidas (1998). "Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático".
- Nakajima S. (1988). "An Introduction to TPM". Productivity Press, Portland, OR.
- Navas A. (1976). "El secado del papel". Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Tarrasa, Cátedra de Tecnología Papelera – CIPAGRAF.
- Ni J., Jin X. (2012). "Decision support systems for effective maintenance operations". *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61, 411-414.
- OCA inspección, control y prevención (2013). Número de informe 1302/6400/3.
- Oechsner R., Pfeffer M., Pfitzner L., Binder H., Muller E., Vonderstrass T. (2003). "From overall equipment efficiency to overall fab effectiveness". *Material Science in Semiconductor Processing*, 5, 333-339.
- Patel K.R., Simonson E.H., Fletcher L.S. (1995). "An experimental investigation of high temperature, high pressure paper drying". *Engineering Conference Proceedings Tappi-PIMA*.
- Peng L., Zeng X., Wang Y., Hong G. (2015). "Analysis of energy efficiency and carbon dioxide reduction in the Chinese pulp and paper industry". *Energy Policy*, 80, 65-75.
- Rayen M. (2001). "Indicadores de sostenibilidad ambiental y desarrollo sostenible: estado del arte". Naciones Unidas, División de Medio Ambiente y Asentamientos Humanos. Publicación de las Naciones Unidas, ISBN 92-1-321911-3.
- Real Decreto 1315/2005, de 4 de noviembre, que establecen las bases de los sistemas de seguimiento y verificación de emisiones de gases de efecto invernadero en instalaciones. *Boletín Oficial del Estado*, de 9 de noviembre de 2005, núm. 268, pp. 36674-36677.
- Real Decreto 1370/2006, de 24 de noviembre, por el que se aprueba el Plan Nacional de asignación de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, 2008-2012. *Boletín Oficial del Estado*, de 25 de noviembre de 2006, núm. 282, pp-41320-41440.
- Real Decreto 1866/2004, de 6 de septiembre, por el que se aprueba el Plan Nacional de asignación de derechos de emisión, 2005-2007. (C de E en BOE 217 de 08/09/04). *Boletín Oficial del Estado*, de 7 de septiembre de 2004, núm. 216, pp. 30616-30642.

- Real Decreto 60/2005, de 21 de enero, modifica al Real Decreto 1866/2004, por el que se aprueba el Plan Nacional de asignación de derechos de emisión, 2005-2007. Boletín Oficial del Estado, de 22 de enero de 2005, núm. 19, pp. 2666-2669.
- Real Decreto 777/2006, de 23 de junio, modifica al Real Decreto 1866/2004, por el que se aprueba el Plan Nacional de asignación de derechos de emisión, 2005-2007. Boletín Oficial del Estado, de 24 de junio de 2006, núm. 150, pp. 24001-24004.
- Real Decreto Ley 5/2004, de 27 de agosto, por el que se regula el régimen de comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero. Boletín Oficial del Estado, de 28 de agosto de 2004, núm. 208, pp. 30096-30111.
- Red Nels - Gobierno de Navarra (2009). “Indicadores de sostenibilidad y agendas locales 21, difusión en sistemas de información corporativos”. [Internet] Disponible en: <http://agendalocal21.navarra.es/>.
- Reese J.R. (1992). “Observation from testing dryer section performance”. Engineering Conference Proceedings, Tappi-PIMA.
- Rodrigues M., Hatakeyama K. (2006). “Analysis of the fall of TPM in companies”, Journal of Materials Processing Technology, 179, 276–279.
- Rodriguez V.T. (2002) .“MRPII aplicado al TPM”. Informe profesional en Ingeniería Industrial, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú.
- Rouhonen P., Hippinen I., Tuomaala M., Athila P. (2010). “Analysis of alternative secondary heat uses to improve energy efficiency-Case: A Finish mechanical pulp and paper mill”. Resources Conservation and Recycling, 54, 326-335.
- Saidur R., Mekhifel S. (2010). “Energy use, energy savings and emission analysis in the Malasian rubber producing industries”. Applied Energy, 87, 2746-2758.
- Scodanibbio C. (2008). “World Class OEE - A TPM Tool”. ESNB: S01-639J-9K12-98W3. Feed Forward Publications. [Internet] Disponible en: http://www.feedforward.com.au/TPM_Tool_OEE_calculation.htm.
- Siitonen S., Ahtila P. (2010). “The influence of operational flexibility on the exploitation of CO₂ reduction potential in industrial energy production”. Journal of Cleaner Production, 18, 867-874.
- Siitonen S., Tuomaala M., Suomunen M., Ahtila P. (2010). “Implications of process energy efficiency improvements for primary energy consumption and CO₂ emissions at the national level”. Applied Energy, 87, 2928-2937.
- Siitonen S., Tuomaala M., Suomunen M., Ahtila P. (2010b). “Variables affecting energy efficiency and CO₂ emissions in steel industry”. Energy Policy, 38, 2477-2485.
- Silvo K., Jouttijärvi T., Melanen M. (2009). “Implications of regulation based on the IPPC Directive – A review on the Finnish pulp and paper industry”. Journal of Cleaner Production, 17, 713-723.

- Simoes J.M., Gomes C.F., Yasin M.M. (2011). "A literature review of maintenance performance measurement. A conceptual framework and directions for future research". *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 17, 116-137.
- Sivill L., Ahtila P. (2009). "Energy efficiency improvement of dryer section heat recovery systems in paper machines – a case of study". *Applied Thermal Engineering*, 29, 3663-3668.
- Sivill L., Ahtila P., Taimisto M. (2005). "Thermodynamic simulation of dryer section heat recovery in paper machines". *Applied Thermal Engineering*, 25, 1273-1292.
- Söderman J., Pettersson F. (2003). "Searching for enhanced energy system with process integration in pulp and paper industries". European symposium on computer aided process engineering – 13. Abo Akademi University, Finland.
- Spiegel M., Schiller J., Srinivasan R.A. (2012). "Probability and statistics". McGraw-Hill, 4^a edition.
- Spirax Xarco (2010). "The steam and condensate loop". ISBN 978-0-9550691-4-7.
- Stake R.E. (1995). "The art of case study research". Thousand Oaks, CA: Sage.
- Statgraphics (2000). Statistical Graphics Corp. Statpoint Technologies, Inc. Warrenton, Virginia.
- Taguchi G. (1990). "Introduction to quality engineering". Asian Productivity Organization, Tokyo.
- Tanaka K. (2008). "Assessment of energy efficiency performance measures in industry and their application for policy". *Energy Policy*, 36, 2887-2902.
- Tanasic N., Janke G., Skistad H. (2011). "Cdf analysis of air flow measurements to approach large industrial halls energy efficiency: a case study of a cardboard mill hall". *Energy and Buildings*, 43, 1200-1206.
- TAPPI T569 pm-00 (2000). "Internal bond strength (Scott type)". [Internet] Disponible en: www.tappi.org.
- Thollander P., Ottosson M. (2010). "Energy management practices in Swedish energyintensive industries". *Journal of Cleaner Production*, 18, 1125–1133.
- Torres A.L. (Coordinador) (1985). "El secado del papel y cartón". Publicaciones de la Universidad Politécnica de Cataluña.
- Triantafillopoulos N. (2010). "Nano enhances - Paper coating performance". TAPPI-PIMA magazine, November - December, 30-34.
- UNI 9439:1989. "Paper and board - determination of internal interfiber bond strength". Ente Italiano Di Normazione.
- Vilches A., Gil Perez D., Toscano J.C., Macías O. (2009). "La sostenibilidad como [r]evolución cultural, tecnocientífica y política". OEI. [Internet] Disponible en: <http://www.oei.es/decada/accion.php?accion=000>.

- Virtanen E., Haverin T., Mynttinen S. (2010). "Energy efficiency, operability and cleanliness: Keys to productivity in the drying section". *Revista técnica "El Papel"* Octubre-Noviembre, 30-35.
- Walimaki T. (2004). "Efficiency determinants of paper machine wet-end performance". Tesis Helsinki University of Technology.
- Wang Y., Liu J., Hansson L., Zhang K., Wang R. (2011). "Implementing stricter environmental regulation to enhance eco-efficiency and sustainability: A case study of Shandong Province's pulp and paper industry, China". *Journal of Cleaner Production*, 19, 303-310.
- Warner H.C. (1966). "Microwave processing of sheet materials", *Journal of Microwave Power*, 1, 81-88.
- Wedel G.L., Breiten J.D., Deshpande R.D. (2000). "Air impingement on single tier dryer". *Tappi Journal*, 83, 82-82.
- Zhang C., Liu C. (2015). "The impact of ICT industry on CO₂ emissions: A regional analysis in China". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 12-19.
- Zvolinschi A., Johannessen E., Kjelstrup S. (2006). "The second-law optimal operation of a paper drying machine". *Chemical Engineering Science*, 61, 3653-3662.