

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES**



TESIS DOCTORAL

**SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA CON PILA DE
COMBUSTIBLE DE ÓXIDO SÓLIDO ALIMENTADO CON
RESIDUOS FORESTALES Y SU OPTIMIZACIÓN MEDIANTE
ALGORITMOS BASADOS EN NUBES DE PARTÍCULAS**

Autor:

Manuel Gómez González

Ingeniero Industrial

(Universidad Nacional de Educación a Distancia)

Director:

Dr. D. Francisco Jurado Melguizo

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control

2008

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Control**

TESIS DOCTORAL

**SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA CON PILA DE
COMBUSTIBLE DE ÓXIDO SÓLIDO ALIMENTADO CON
RESIDUOS FORESTALES Y SU OPTIMIZACIÓN MEDIANTE
ALGORITMOS BASADOS EN NUBES DE PARTÍCULAS**

Autor:

Manuel Gómez González

Ingeniero Industrial

Universidad Nacional de Educación a Distancia

Director:

Dr. D. Francisco Jurado Melguizo

Profesor Titular de Universidad de Ingeniería Eléctrica

Universidad de Jaén

Tutor:

Dr. D. José Carpio Ibáñez

Catedrático de Universidad de Ingeniería Eléctrica

Universidad Nacional de Educación a Distancia

TESIS DOCTORAL

**SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA CON PILA DE
COMBUSTIBLE DE ÓXIDO SÓLIDO ALIMENTADO CON
RESIDUOS FORESTALES Y SU OPTIMIZACIÓN MEDIANTE
ALGORITMOS BASADOS EN NUBES DE PARTÍCULAS**

TRIBUNAL

Agradecimientos

Quiero dedicar y expresar mi más profundo agradecimiento a mi mujer, Macarena, a mi familia, amistades, y especialmente a mi madre, que han creído siempre en mí, me han apoyado a lo largo de toda mi vida y en el transcurso de este trabajo.

Asimismo debo expresar mi más sincero agradecimiento a D. Francisco Jurado Melguizo por mostrarme un apoyo total y continuo, por compartir todos sus conocimientos, animándome constantemente y confiando plenamente en mí. Así como, a D. José Carpio Ibáñez y D. Manuel A. Castro Gil que han influido muy eficazmente en determinados momentos de mi formación académica.

A mi Manuel

Índice

LISTA DE SÍMBOLOS	XVII
LISTA DE FIGURAS	XXVII
LISTA DE TABLAS	XXXI
LISTA DE ABREVIATURAS	XXXIII
1 OBJETIVOS Y PLANTEAMIENTO DE LA TESIS DOCTORAL	1
1.1 GENERALIDADES	3
1.2 ORIGEN Y MOTIVACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	8
1.3 OBJETIVOS Y PLANTEAMIENTO DE LA TESIS.....	9
1.4 ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	10
2 GENERACIÓN DISTRIBUIDA	17
2.1 INTRODUCCIÓN.....	19
2.2 DEFINICIÓN DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA.	20
2.3 TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA.	27
2.3.1 Aprovechamiento de la biomasa.....	29
2.4 APLICACIONES DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA	30
2.5 DURACIÓN DEL SUMINISTRO DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA Y TIPO DE ENERGÍA GENERADA	32

2.6	BENEFICIOS DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA.....	34
2.7	NECESIDAD DE LA OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA.....	37
3	TÉCNICAS METAHEURÍSTICAS. ALGORITMOS BASADOS EN NUBES DE PARTÍCULAS.....	39
3.1	INTRODUCCIÓN.....	41
3.2	OPTIMIZACIÓN CON TÉCNICAS METAHEURÍSTICAS.....	42
3.2.1	Técnicas metaheurísticas.....	42
3.2.2	Clasificación de las técnicas metaheurísticas.....	45
3.2.2.1	<i>Metaheurísticas basadas en trayectoria</i>	45
3.2.2.2	<i>Metaheurísticas basadas en población</i>	46
3.3	ALGORITMO PSO.....	48
3.3.1	Introducción al algoritmo PSO.....	48
3.3.2	Descripción del algoritmo PSO.....	51
3.4	TIPOS DE ALGORITMOS PSO.....	56
3.5	PSEUDOCODIGOS DEL ALGORITMO PSO.....	57
3.5.1	Pseudocódigo del algoritmo PSO clásico.....	57
3.5.2	Pseudocódigo del PSO para codificación continua.....	59
3.5.3	Pseudocódigo del PSO para codificación binaria.....	60
4	BIOMASA, GASIFICACIÓN Y RESIDUOS FORESTALES.....	65
4.1	INTRODUCCIÓN.....	67
4.2	BIOMASA.....	71
4.2.1	Definición.....	71
4.2.2	Características energéticas de la biomasa.....	72
4.2.3	Ventajas de la biomasa.....	73
4.2.4	Tipos de biomasa.....	74

4.2.5	Sistemas de aprovechamiento energético de la biomasa	75
4.3	GASIFICACIÓN	76
4.3.1	Gasificadores	81
4.3.1.1	<i>Gasificadores de corriente ascendente o tiro directo</i>	81
4.3.1.2	<i>Gasificadores de corriente descendente o tiro invertido</i>	82
4.3.1.3	<i>Gasificadores de lecho de fluido</i>	83
4.3.2	Gas resultante	85
4.4	RESIDUOS FORESTALES.....	87
4.5	SISTEMAS DE EXTRACCIÓN DE LOS RESIDUOS FORESTALES	91
4.6	EVALUACION DE LA BIOMASA FORESTAL RESIDUAL.....	97
4.6.1	Métodos de estimación de los residuos forestales	97
4.6.2	Evaluación de la biomasa residual forestal.....	99
4.6.3	Formulación para el aprovechamiento de la biomasa utilizable.....	100
5	SISTEMA DE GENERACIÓN CON PILA DE COMBUSTIBLE DE ÓXIDO SÓLIDO	105
5.1	INTRODUCCIÓN.....	107
5.2	PILA DE COMBUSTIBLE DE ÓXIDO SÓLIDO (SOFC).....	114
5.2.1	Componentes	114
5.2.2	Configuraciones geométricas de la pila SOFC.....	116
5.2.3	Reacciones químicas en la pila SOFC.....	118
5.2.4	Consideraciones sobre su funcionamiento y aplicaciones.....	120
5.3	ESTRUCTURA DE UNA PLANTA SOFC	123
5.4	SISTEMAS HÍBRIDOS CON PILA DE COMBUSTIBLE.....	124
5.4.1	Sistema híbrido de pila SOFC con turbina de gas	125
5.4.2	Configuración de un sistema SOFC-TG.....	127
5.5	MODELO DE SISTEMA SOFC-TG	130
5.5.1	Objetivo del modelo y supuestos iniciales	130
5.5.2	Reacciones químicas que se consideran en la pila	131
5.5.3	Análisis del modelo de pila SOFC	132

5.5.4	Análisis de otros componentes del sistema	135
5.5.5	Potencia de salida del sistema	137
5.5.6	Consideraciones finales	139
6	DESCRIPCIÓN Y DESARROLLO DEL MODELO.....	141
6.1	INTRODUCCIÓN.....	143
6.2	MODELO SIMPLIFICADO PARA OPTIMIZACIÓN DE LA POTENCIA DE GENERACIÓN	145
6.2.1	Descripción.....	145
6.2.2	Análisis económico.....	148
6.2.3	Inversión inicial	149
6.2.4	Flujo de entrada. Ingresos.....	151
6.2.5	Gastos de explotación.....	152
6.2.6	Valor Actual Neto.....	154
6.2.7	Índice de rentabilidad	155
6.2.8	Período de retorno	155
6.2.9	Limitaciones del modelo	156
6.3	MODELO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL TAMAÑO Y LOCALIZACIÓN DE UN SISTEMA SOFC-TG	156
6.3.1	Descripción.....	156
6.3.2	Inversión inicial	160
6.3.3	Flujo de entrada. Ingresos.....	162
6.3.4	Gastos de explotación.....	162
6.3.5	Valor Actual Neto.....	165
6.3.6	Índice de rentabilidad	165
6.3.7	Función objetivo	166
6.4	OPTIMIZACIÓN SEGÚN LA EMPRESA DISTRIBUIDORA DE ENERGÍA	166
6.5	OPTIMIZACIÓN DESDE UN PUNTO DE VISTA GLOBAL.....	170

7	PROPUESTA DE RESOLUCIÓN MEDIANTE ALGORITMOS BASADOS EN NUBES DE PARTÍCULAS	171
7.1	INTRODUCCIÓN.....	173
7.2	PROBLEMÁTICA DE LA RESOLUCIÓN	174
7.3	JUSTIFICACIÓN DEL ALGORITMO DE RESOLUCIÓN	175
7.4	CODIFICACIÓN DEL PROBLEMA PARA EL ALGORITMO PSO BINARIO	176
7.5	ALGORITMO DE RESOLUCIÓN PROPUESTO.....	179
7.6	MODIFICACIONES REALIZADAS EN EL ALGORITMO PSO	183
7.7	FUNCIONAMIENTO DEL ALGORITMO	184
7.8	VALIDACIÓN, ROBUSTEZ E IMPLEMENTACIÓN	189
7.9	CONSIDERACIONES PARA EL MODELO GLOBAL CON RESTRICCIONES	191
8	ANÁLISIS, SIMULACIÓN Y RESULTADOS	193
8.1	INTRODUCCIÓN. CASOS DE ESTUDIO PROPUESTOS	195
8.2	OPTIMIZACIÓN DEL TAMAÑO DE LA PLANTA UTILIZANDO EL MODELO SIMPLIFICADO	197
8.2.1	Supuesto 1a) (D = 100 toneladas/km ² ; inc = 0.40)	200
8.2.2	Supuesto 1b) (D = 100 toneladas/km ² ; inc = 0.00).....	202
8.2.3	Supuesto 2a) (D = 125 toneladas/km ² ; inc = 0.40)	204
8.2.4	Supuesto 2b) (D = 125 toneladas/km ² ; inc = 0.00).....	205
8.2.5	Supuesto 3a) (D = 75 toneladas/km ² ; inc = 0.40)	206
8.2.6	Supuesto 3b) (D = 75 toneladas/km ² ; inc = 0.00).....	207
8.2.7	Supuesto 4)	208
8.2.8	Observaciones y conclusiones	209

8.3	OPTIMIZACIÓN DE UNA PLANTA SOFC-TG APLICANDO EL ALGORITMO PSO BINARIO	210
8.3.1	Datos de partida. Región 1	211
8.3.2	Optimización del tamaño y situación de planta SOFC-TG en región 1	217
8.3.2.1	<i>Optimización del tamaño y ubicación de la planta utilizando el algoritmo PSO propuesto (SIM01)</i>	218
8.3.2.2	<i>Optimización del tamaño y ubicación de la planta utilizando el algoritmo PSO versión de Afshinmanesh (SIM02)</i>	221
8.3.2.3	<i>Optimización del tamaño y ubicación de la planta utilizando algoritmos genéticos, AG (SIM03)</i>	222
8.3.2.4	<i>Observaciones y conclusiones relativas a los tres algoritmos</i>	224
8.3.3	Ubicación óptima de planta en región 1 limitando la potencia	226
8.3.3.1	<i>Ubicación óptima de planta SOFC-TG en región 1 para una potencia máxima de 10 MW (SIM04)</i>	226
8.3.3.2	<i>Ubicación óptima de planta SOFC-TG en región 1 para una potencia máxima de 5 MW (SIM05)</i>	230
8.3.3.3	<i>Observaciones y conclusiones</i>	233
8.3.4	Influencia de la dimensión del problema o número de parcelas para la optimización del tamaño y situación de planta SOFC-TG en región 1.	234
8.3.4.1	<i>Optimización de IR en región 1 considerando rejilla de 128x128 (SIM06)</i>	236
8.3.4.2	<i>Optimización de IR en región 1 considerando rejilla de 256x256 (SIM07)</i>	238
8.3.4.3	<i>Optimización de IR en región 1 considerando rejilla de 64x64 (SIM08)</i>	239
8.3.4.4	<i>Observaciones y conclusiones</i>	241
8.3.5	Comparación de 3 sistemas de generación. Optimización del tamaño y situación de planta en región 1	242
8.3.5.1	<i>Optimización de IR para sistema SOFC-TG en región 1 (SIM09)</i>	243
8.3.5.2	<i>Optimización de IR para sistema TG en región 1 (SIM10)</i>	245
8.3.5.3	<i>Optimización de IR para sistema MCG en región 1 (SIM11)</i>	246
8.3.5.4	<i>Observaciones conclusiones</i>	248
8.3.6	Comparación de 3 sistemas de generación. Ubicación óptima en región 1 de planta de menos de 5 MW	249
8.3.6.1	<i>Optimización de planta SOFC-TG en región 1 para $Pe \leq 5$ MW (SIM12)</i>	249
8.3.6.2	<i>Optimización de planta TG en región 1 para $Pe \leq 5$ MW (SIM13)</i>	251
8.3.6.3	<i>Optimización de planta MCG en región 1 para $Pe \leq 5$ MW (SIM14)</i>	252
8.3.6.4	<i>Observaciones y conclusiones</i>	254

8.4	ANÁLISIS ELÉCTRICO. PUNTO DE VISTA DE LA EMPRESA DISTRIBUIDORA.....	254
8.5	OPTIMIZACIÓN DE PLANTA SOFC-TG MEDIANTE EL ALGORITMO PSO Y CONSIDERANDO RESTRICCIONES DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN .	263
8.5.1	Región 2.....	263
8.5.2	Ubicación óptima de planta de 2 MW en región 2 (simulación SIM15)...	268
8.5.3	Ubicación óptima de planta de 2 MW en región 2 desde un punto de vista global (simulación SIM16)	271
8.6	CONCLUSIONES GENERALES DEL MODELO CON EL USO DEL ALGORITMO PSO.....	276
9	CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	279
9.1	CONCLUSIONES Y APORTACIONES DE LA TESIS.....	281
9.2	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	284
	BIBLIOGRAFÍA	277
	APÉNDICE I: IMPLEMENTACIÓN EN MATLAB DEL ALGORITMO PSO PROPUESTO.....	311
AI.1	IMPLEMENTACIÓN PROGRAMA PRINCIPAL.....	313
	APÉNDICE II	319
AII.1	INTRODUCCIÓN.....	321
AII.2	PRINCIPIOS BÁSICOS Y CARACTERÍSTICAS DE LOS AG	322
AII.3	FUNCIONAMIENTO DE LOS ALGORITMOS GENÉTICOS.....	324
AII.4	PSEUDOCODIGO ALGORITMO GENÉTICO	326

AII.5 ADAPTACIÓN E IMPLEMENTACION EN MATLAB AL PROBLEMA CONSIDERADO	327
CURRICULUM VITAE	333

Lista de símbolos

En esta Tesis, las variables y funciones utilizadas tienen la siguiente notación:

AP	≡ Apotema.
AP_{max}	≡ Valor máximo de la apotema.
$aptitud_{x_i}$	≡ Valor de aptitud, adaptación o adecuación de la posición correspondiente al vector \mathbf{x}_i .
$aptitud_{mejorpos_i}$	≡ Valor de aptitud o adaptación de la partícula con mejor solución local encontrada, correspondiente al vector mejorpos_i .
$aptitud_{mejorpos}$	≡ Valor de aptitud o adaptación de la partícula con mejor solución local encontrada, correspondiente al vector mejorpos .
BRP_i	≡ Biomasa Residual Potencial anual obtenida en un sistema o parcela i .
BRU	≡ Biomasa Residual Utilizable.
BRU_i	≡ Biomasa Residual Utilizable anual obtenida en un sistema o parcela i .
C_L	≡ Coste de la línea eléctrica.
CM	≡ Coste anual de Mantenimiento.
CMu	≡ Coeficiente de Mantenimiento en tanto por uno.
CO	≡ Coste anual de Operación.
COF	≡ Coste de Operación Fijo.
$COVu$	≡ Coste de Operación Variable unitario.
C_P	≡ Coste total por Pérdidas de energía en la red eléctrica.
C_{PA}	≡ Coste anual de las Pérdidas de energía en la red eléctrica.
C_{PU}	≡ Coste unitario ponderado de Pérdidas de energía en la red eléctrica.
CR	≡ Coste anual de Recogida de la biomasa.
CR_i	≡ Coste anual de Recogida de residuos en un sistema o parcela i .
CRu	≡ Coste unitario de Recogida de la biomasa en toda la superficie de producción.

CRu_i	≡ Coste unitario de Recogida de biomasa en un sistema o parcela i .
CT	≡ Coste anual de Transporte.
CT_i	≡ Coste anual de Transporte de la biomasa recogida en el sistema productivo o parcela i .
CTu	≡ Coste de Transporte unitario de la biomasa recogida, constante para cualquier parcela.
CTu_i	≡ Coste de Transporte unitario de la biomasa recogida en el sistema productivo o parcela i .
C_{UE}	≡ Coste unitario de la energía en la red eléctrica.
C_{UGD}	≡ Coste unitario de la energía procedente del sistema de Generación Distribuida.
$C_{H_2}^{entrada}$	≡ Cantidad anual de hidrógeno.
$C_{H_2,eq}^{entrada}$	≡ Cantidad anual de hidrógeno equivalente.
$C_{H_2,eq,i}^{entrada}$	≡ Cantidad anual de hidrógeno equivalente relativo a la parcela i .
$C_{CO}^{entrada}$	≡ Cantidad anual de monóxido de carbono.
$C_{CH_4}^{entrada}$	≡ Cantidad anual de metano.
\mathbf{c}_{1i}	≡ Vector aleatorio de aprendizaje para la partícula i .
$c_{1i,j}$	≡ Valor binario aleatorio perteneciente al vector $\mathbf{c}_{1i} = (c_{1i,1}, c_{1i,2}, \dots, c_{1i,N})$.
\mathbf{c}_{2i}	≡ Vector aleatorio de aprendizaje para la partícula i .
$c_{2i,j}$	≡ Valor binario aleatorio perteneciente al vector $\mathbf{c}_{2i} = (c_{2i,1}, c_{2i,2}, \dots, c_{2i,N})$.
cd	≡ Relación entre la distancia real y la distancia radial.
D	≡ Densidad superficial de la biomasa residual potencial anual de una determinada superficie.
D_i	≡ Densidad superficial de la biomasa residual potencial anual obtenida en un sistema o parcela i .
d	≡ Tasa de descuento.
dH	≡ Distancia de Hamming.

- \mathbf{dH}_{1i}^t \equiv Vector que indica la distancia de Hamming entre la posición de la partícula, \mathbf{x}_i , y su mejor posición, $\mathbf{mejorpos}_i$, en la iteración t .
- $dH_{1i,j}^t$ \equiv Es el bit en la posición j del vector $\mathbf{dH}_{1i} = (dH_{1i,1}, dH_{1i,2}, \dots, dH_{1i,N})$ que denota la distancia de Hamming entre la posición de la partícula $\mathbf{x}_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,N})$ y su mejor posición, $\mathbf{mejorpos}_i = (mejorpos_{i,1}, mejorpos_{i,2}, \dots, mejorpos_{i,N})$, en la iteración t .
- \mathbf{dH}_{2i}^t \equiv Vector que indica la distancia de Hamming entre la posición de la partícula, \mathbf{x}_i , y la mejor posición global, $\mathbf{mejorposg}$, en la iteración t .
- $dH_{2i,j}^t$ \equiv Es el bit en la posición j del vector $\mathbf{dH}_{2i} = (dH_{2i,1}, dH_{2i,2}, \dots, dH_{2i,N})$ que denota la distancia de Hamming entre la posición de la partícula $\mathbf{x}_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,N})$ y la mejor posición, $\mathbf{mejorposg} = (mejorposg_1, mejorposg_2, \dots, mejorposg_N)$, en la iteración t .
- $dist(p,i)$ \equiv Distancia real de transporte de los residuos entre la parcela de recogida i y la parcela destino p .
- dm \equiv Distancia media entre la planta y el punto de carga de la biomasa.
- E \equiv Fuerza electromotriz generada en la pila.
- E_0 \equiv Tensión asociada con la energía libre de reacción.
- E_{res} \equiv Potencial energético de los residuos forestales.
- $E_{SOFC-TG}$ \equiv Energía eléctrica generada anualmente por el sistema SOFC-TG.
- F \equiv Constante de Faraday.
- $h_{ent,aire}$ \equiv Entalpía del aire de entrada.
- $h_{sal,aire}$ \equiv Entalpía del aire de salida.
- $h_{ent,g}$ \equiv Entalpía del gas de entrada.
- $h_{sal,g}$ \equiv Entalpía del gas de salida.
- I \equiv Intensidad de la pila.
- IN \equiv Inversión Inicial.
- INF \equiv Inversión Inicial Fija.
- IN_u \equiv Inversión inicial necesaria por unidad de potencia.

IR	\equiv Índice de Rentabilidad.
IS	\equiv Índice de Selección del algoritmo genético.
i	\equiv Interés anual del préstamo bancario (en tanto por uno).
inc	\equiv Porcentaje de los incentivos concedidos sobre el total de la inversión (en tanto por uno).
j	\equiv Número de electrones.
K	\equiv Parcelas seleccionadas.
K_i	\equiv Coeficiente definido por $K_i = \frac{1}{(1+d)}$.
K_g	\equiv Coeficiente definido por $K_g = \frac{1+r_g}{1+d}$.
K_M	\equiv Coeficiente definido por $K_M = \frac{1+r_M}{1+d}$.
K_O	\equiv Coeficiente definido por $K_O = \frac{1+r_O}{1+d}$.
K_P	\equiv Coeficiente definido por $K_P = \frac{1+r_P}{1+d}$.
K_R	\equiv Coeficiente definido por $K_R = \frac{1+r_R}{1+d}$.
K_T	\equiv Coeficiente definido por $K_T = \frac{1+r_T}{1+d}$.
L_{LE}	\equiv Longitud de la línea eléctrica a construir para conectar la planta de generación con la red de distribución existente.
L_X	\equiv Tamaño del eje X del mapa o región considerada.
L_Y	\equiv Tamaño del eje Y del mapa o región considerada.
\dot{m}_{aire}	\equiv Flujo de aire.
\dot{m}_g	\equiv Flujo de gas.
mejorpos	\equiv Posición de la partícula con la mejor solución o <i>aptitud</i> .
mejorpos_i	\equiv Posición encontrada por la partícula i que posee la mejor solución.
mejorpos_{i,j}	\equiv Es el bit en la posición j del vector mejorpos_i = ($mejorpos_{i,1}, mejorpos_{i,2}, \dots, mejorpos_{i,N}$).

- mejorposl_i** ≡ Posición de la mejor partícula perteneciente al entorno local de x_i .
- mejorposg** ≡ Posición de la mejor partícula considerando la nube completa.
- mejorposg_j** ≡ Es el bit en la posición j del vector
- mejorposg** = ($mejorposg_1, mejorposg_2, \dots, mejorposg_N$).
- N** ≡ Dimensión del problema. Dimensión de los vectores de las partículas.
- N_{HA}** ≡ Número medio de horas anuales de consumo.
- P** ≡ Número de partículas que componen la nube del algoritmo PSO.
- PA** ≡ Pago Anual.
- PCI** ≡ Poder Calorífico Inferior.
- PCI_i** ≡ Poder Calorífico Inferior de la biomasa obtenida en la parcela i .
- P_{AUX}** ≡ Potencia del equipamiento auxiliar.
- P_{comp,aire}** ≡ Potencia mecánica empleada por el compresor.
- P_{Di}** ≡ Potencia activa requerida en el nudo i .
- P_e** ≡ Potencia Eléctrica Nominal de Generación.
- P_{GD}** ≡ Potencia activa del sistema GD.
- P_{GEN}** ≡ Potencia de salida del generador.
- P_{Gi}** ≡ Potencia activa generada en el nudo i .
- P_i** ≡ Potencia activa inyectada en el nudo i .
- P_P** ≡ Pérdidas de potencia activa del sistema.
- PR** ≡ Plazo de Recuperación o Período de Retorno de la inversión.
- P_{SOFC,ca}** ≡ Potencia de salida de la pila SOFC en corriente alterna.
- P_{SOFC,cc}** ≡ Potencia de salida de la pila SOFC en corriente continua.
- P_{SOFC-TG}** ≡ Potencia de salida del sistema SOFC-TG.
- P_{TG}** ≡ Potencia mecánica generada por la turbina de gas.
- P_{TR}** ≡ Potencia activa total de la red considerada.
- P_ω^t** ≡ Probabilidad inercial o probabilidad de cambio del vector de inercia ω_i , en la iteración t .
- P_{ω,max}** ≡ Valor máximo de la probabilidad inercial, P_ω .
- P_{ω,min}** ≡ Valor mínimo de la probabilidad inercial, P_ω .

p_g	≡ Precio de venta de la energía eléctrica generada e inyectada a la red eléctrica.
p_{H_2}	≡ Presión parcial del hidrógeno.
p_{O_2}	≡ Presión parcial del oxígeno.
p_{H_2O}	≡ Presión parcial del vapor de agua.
Q	≡ Número de parcelas que componen un mapa.
Q_i	≡ Potencia reactiva inyectada en el nudo i .
$q_{H_2eq}^{entrada}$	≡ Caudal de hidrógeno equivalente de entrada a la pila.
$q_{H_2}^{entrada}$	≡ Caudal de hidrógeno real de entrada a la pila.
$q_{CO}^{entrada}$	≡ Caudal de monóxido de carbono de entrada a la pila.
$q_{CH_4}^{entrada}$	≡ Caudal de metano de entrada a la pila.
$q_{H_2}^r$	≡ Caudal de hidrógeno que reacciona.
R	≡ Radio de la superficie circular, S .
R_{gas}	≡ Cantidad de hidrógeno equivalente que se genera en el proceso de gasificación por tonelada de residuos aprovechados.
$R_{gas,i}$	≡ Cantidad de hidrógeno equivalente que se genera en el proceso de gasificación por tonelada de residuos aprovechados en la parcela i .
R_j	≡ Cantidad de residuos obtenidos de una determinada operación forestal j (clara, clareo, poda, corta, etc.).
R_P	≡ Porcentaje en tanto por uno de la potencia activa neta que aporta la turbina de gas con respecto a la total del sistema SOFC-TG.
R_u	≡ Constante del gas universal.
r_g	≡ Índice de incremento anual del precio de la energía.
r_M	≡ Índice de incremento anual de los costes de mantenimiento.
r_O	≡ Índice de incremento anual de los costes de operación.
r_P	≡ Índice de incremento anual de los costes de energía eléctrica pérdida en la red.
r_R	≡ Índice de incremento anual de los costes de recogida de biomasa.
r_T	≡ Índice de incremento anual de los costes de transporte.

$rand_1$	≡ Número aleatorio entre 0 y 1.
$rand_2$	≡ Número aleatorio entre 0 y 1.
S	≡ Superficie de producción de donde se extrae la biomasa.
S_i	≡ Superficie del sistema productivo o parcela i de donde se extrae la biomasa.
$sig()$	≡ Función sigmoïdal.
T	≡ Tiempo de funcionamiento anual.
T_K	≡ Temperatura absoluta en °K.
t	≡ Número de iteración actual.
t_{max}	≡ Número de máximo de iteraciones establecido.
U	≡ Coeficiente de utilización o aprovechamiento que indica la relación entre la biomasa finalmente utilizable y la potencial existente.
U_f	≡ Factor de utilización de combustible de la pila SOFC.
U_i	≡ Coeficiente de utilización o aprovechamiento que indica la relación entre la biomasa finalmente utilizable y la potencial existente en la zona de estudio o parcela i .
VAC	≡ Valor Actual de los Costes de Explotación.
VAE	≡ Valor Actual del flujo de entrada o ingresos.
VAI	≡ Valor Actual de la Inversión.
VAN	≡ Valor Actual Neto.
$VANG$	≡ Valor Actual Neto Global.
VAP	≡ Valor Actual de los Costes por Pérdidas de energía en la red eléctrica.
V_{act}	≡ Pérdidas de tensión por activación.
V_{con}	≡ Pérdidas de tensión por concentración.
V_{ohm}	≡ Pérdidas de tensión óhmicas.
V_{pc}	≡ Tensión de salida de la pila de combustible.
V_i	≡ Valor de la tensión en el nudo i .
$V_{i,min}$	≡ Valor mínimo permitido de la tensión en el nudo i .
$V_{i,max}$	≡ Valor máximo permitido de la tensión en el nudo i .
Vu	≡ Vida útil de la instalación.
\mathbf{v}_i	≡ Vector velocidad de la partícula i .

- \mathbf{v}_i^t \equiv Vector velocidad de la partícula i en la iteración t .
- $v_{i,j}^t$ \equiv Valor del bit en la posición j del vector de velocidad i ,
 $\mathbf{v}_i = (v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,N})$ en la iteración t .
- v_{\max} \equiv Valor máximo de los componentes del vector velocidad.
- \mathbf{x}_i \equiv Vector posición de la partícula i .
- \mathbf{x}_i^t \equiv Vector posición de la partícula i en la iteración t .
- $x_{i,j}^t$ \equiv Valor del bit en la posición j del vector de posición de la partícula i ,
 $\mathbf{x}_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,N})$ en la iteración t .
- Y_{ij} \equiv Admitancia entre los nudos i y j .
- Z \equiv Duración del préstamo financiero.
-
- γ_{ij} \equiv Ángulo de la admitancia Y_{ij} .
- δ_i \equiv Ángulo de fase de la tensión V_i .
- ω^t \equiv Factor de inercia en la iteración t .
- $\boldsymbol{\omega}_i^t$ \equiv Vector de inercia de la partícula i en la iteración t .
- $\omega_{i,j}^t$ \equiv Valor del bit en la posición j del vector de inercia para la partícula i ,
 $\boldsymbol{\omega}_i = (\omega_{i,1}, \omega_{i,2}, \dots, \omega_{i,N})$ en la iteración t .
- $\bar{\boldsymbol{\omega}}_i^t$ \equiv Vector de inercia complementario de la partícula i en la iteración t .
- $\bar{\omega}_{i,j}^t$ \equiv Valor del bit en la posición j del vector complementario al vector de inercia para la partícula i , $\bar{\boldsymbol{\omega}}_i = (\bar{\omega}_{i,1}, \bar{\omega}_{i,2}, \dots, \bar{\omega}_{i,N})$ en la iteración t .
- ω_{\max} \equiv Factor de inercia inicial.
- ω_{\min} \equiv Factor de inercia final.
- φ_1, φ_2 \equiv Pesos que controlan los componentes cognitivo y social del algoritmo PSO, respectivamente.
- η_{comp} \equiv Rendimiento mecánico del compresor.

η_{conv}	≡ Rendimiento de la conversión de corriente continua a alterna.
η_{gen}	≡ Rendimiento mecánico del generador eléctrico.
η_{global}	≡ Rendimiento global del sistema de generación.
η_{TG}	≡ Rendimiento mecánico de la turbina de gas.

Las referencias a ecuaciones se indicarán mediante paréntesis () y las referencias a publicaciones, textos y páginas web mediante corchetes [].

Lista de figuras

Figura 1.1: Esquema de la estructura de la Tesis Doctoral.....	11
Figura 3.1: Ejemplo de “nube”. Banco de peces.....	50
Figura 3.2: Ejemplo de “nube”. Bandada de aves.....	50
Figura 3.3: Representación gráfica del movimiento de una partícula.....	55
Figura 4.1: Esquema del proceso completo de la gasificación de la biomasa.	80
Figura 4.2: Gasificador de corriente ascendente o tiro directo.	82
Figura 4.3: Gasificador de corriente descendente o de tiro invertido.	83
Figura 4.4: Gasificador de lecho de fluido.....	84
Figura 4.5: Clasificación de la biomasa forestal.	88
Figura 4.6: Autocargador recogiendo residuos forestales.....	92
Figura 4.7: Tractor de arrastre.....	93
Figura 4.8: Astilladora transportable.....	94
Figura 4.9: Astilladora móvil.	95
Figura 4.10: Empacadora forestal Valmet.....	96
Figura 5.1: Funcionamiento genérico de una pila de combustible.....	108
Figura 5.2: Pila con configuración tubular.....	117
Figura 5.3: Acoplamiento de unidades en la configuración tubular.	117
Figura 5.4: Estructura de un sistema de generación con pilas de combustible.	123
Figura 5.5: Sistema híbrido con pila SOFC y turbina de gas.....	128
Figura 5.6: Sistema híbrido compuesto por pila SOFC y dos turbinas de gas.....	128
Figura 6.1: Superficie de producción circular en cuyo centro se sitúa la planta.....	146
Figura 7.1: Representación gráfica de la partícula en una porción de mapa determinada.	177
Figura 8.1: Índice de Rentabilidad en función del Radio.....	200
Figura 8.2: Valor Actual Neto en función del Radio.	201
Figura 8.3: Índice de Rentabilidad en función de la Potencia Nominal.....	201
Figura 8.4: Índice de Rentabilidad en función del Radio, supuesto 1b).	202

Figura 8.5: Valor Actual Neto en función del Radio (supuesto 1b).....	203
Figura 8.6: Índice de Rentabilidad en función de la Potencia Nominal (supuesto 1b).	203
Figura 8.7: Índice de Rentabilidad representado en función del Radio (supuesto 2a).204	
Figura 8.8: Índice de Rentabilidad en función del Radio (supuesto 2b).....	205
Figura 8.9: Índice de Rentabilidad en función del Radio (supuesto 3a).	206
Figura 8.10: Índice de Rentabilidad en función del Radio (supuesto 3b).....	207
Figura 8.11: IR en función de R (supuesto 4 e incentivos del 40 %).....	208
Figura 8.12: IR en función de R (supuesto 4 e incentivos del 50 %).....	209
Figura 8.13: Región 1 con líneas eléctricas.	212
Figura 8.14: Región 1 - Potencial de residuos forestales (toneladas de biomasa seca / km ² año).....	213
Figura 8.15: Región 1 - Potencial energético de la biomasa disponible (MWh / año)214	
Figura 8.16: Región 1 - Potencial energético de la biomasa utilizable (MWh / año) . 214	
Figura 8.17: Región 1 - Coste de recogida de la biomasa (€/tonelada).	215
Figura 8.18: Región 1 – Distribución del tipo de residuos generados en la región. ...	215
Figura 8.19: SIM01 - Ubicación de planta y área de extracción de biomasa óptima..	220
Figura 8.20: SIM01 - Evolución del Índice de Rentabilidad en función del número de iteraciones.....	220
Figura 8.21: SIM02 - Evolución del Índice de Rentabilidad en función del número de iteraciones.....	222
Figura 8.22: SIM03 - Evolución del Índice de Rentabilidad en función del número de iteraciones.....	223
Figura 8.23: Evolución del Índice de Rentabilidad para los tres algoritmos.	224
Figura 8.24: SIM04 - Ubicación de planta óptima para $P_e \leq 10$ MW.	228
Figura 8.25: SIM04 - Evolución del VAN en función del número de iteraciones ($P_e \leq 10$ MW).	229
Figura 8.26: SIM05 - Ubicación de planta óptima para $P_e \leq 5$ MW.	231
Figura 8.27: SIM05 - Evolución del VAN en función del número de iteraciones ($P_e \leq 10$ MW).	233
Figura 8.28: SIM06 - Ubicación de planta y superficie de extracción óptima.....	237

Figura 8.29: SIM06 - Evolución de IR en función del número de iteraciones.	237
Figura 8.30: SIM07 - Ubicación de planta y superficie de extracción óptima.....	238
Figura 8.31: SIM07 - Evolución de IR en función del número de iteraciones.	239
Figura 8.32: SIM08 - Ubicación de planta y superficie de extracción óptima.....	240
Figura 8.33: SIM08 - Evolución de IR en función del número de iteraciones.	240
Figura 8.34: Evolución de IR en función del número de iteraciones (SIM06, SIM07, SIM08).....	241
Figura 8.35: SIM09 - Ubicación de planta SOFC-TG y superficie de extracción óptima.	244
Figura 8.36: SIM09 - Evolución de IR. Sistema SOFC-TG.	244
Figura 8.37: SIM10 - Ubicación de planta con TG y superficie de extracción óptima.	245
Figura 8.38: SIM10 - Evolución de IR. Sistema TG.....	246
Figura 8.39: SIM11 - Ubicación de planta MCG y superficie de extracción óptima.	247
Figura 8.40: SIM11 - Evolución de IR. Sistema MCG.....	247
Figura 8.41: SIM12 - Ubicación de planta SOFC-TG para $Pe \leq 5$ MW.....	250
Figura 8.42: SIM12 - Evolución del VAN. Sistema SOFC-TG ($Pe \leq 5$ MW).	250
Figura 8.43: SIM13 - Ubicación de planta TG para $Pe \leq 5$ MW.	251
Figura 8.44: SIM13 - Evolución del VAN. Sistema TG ($Pe \leq 5$ MW).....	252
Figura 8.45: SIM14 - Ubicación de planta MCG para $Pe \leq 5$ MW.	253
Figura 8.46: SIM14 - Evolución del VAN. Sistema MCG ($Pe \leq 5$ MW).....	253
Figura 8.47: Red de distribución elegida.	255
Figura 8.48: Perfil de tensiones sin GD.	257
Figura 8.49: Costes de pérdidas en función de la potencia del sistema SOFC-TG y su localización.....	258
Figura 8.50: Costes de pérdidas en función de la potencia del sistema SOFC conectado en el nudo 5.	259
Figura 8.51: Costes de pérdidas en función de la potencia del sistema SOFC conectado en el nudo 6.	259
Figura 8.52: Costes de pérdidas en función de la potencia del sistema SOFC conectado en el nudo 7.	259

Figura 8.53: Costes de pérdidas en función de la potencia del sistema SOFC conectado en el nudo 8.	260
Figura 8.54: Costes de pérdidas en función de la potencia del sistema SOFC conectado en el nudo 9.	260
Figura 8.55: Costes de pérdidas en función de la potencia del sistema SOFC conectado en el nudo 10.	260
Figura 8.56: Costes de pérdidas en función del nudo donde se conecta un sistema de 2 MW.	261
Figura 8.57: Perfiles de tensiones con un sistema de 2 MW.....	262
Figura 8.58: Región 2 con red de distribución de 10 nudos.....	264
Figura 8.59: Región 2 - Potencial de residuos forestales (toneladas de biomasa seca / km ² año).....	265
Figura 8.60: Región 2 - Potencial energético de la biomasa disponible (MWh / año).....	265
Figura 8.61: Región 2 - Potencial energético de la biomasa utilizable (MWh / año) .	266
Figura 8.62: Región 2 - Coste de recogida de la biomasa (€/tonelada).	266
Figura 8.63: Región 2 – Distribución del tipo residuos generados.....	267
Figura 8.64: SIM15 – Ubicación óptima de planta de 2 MW en región 2.....	269
Figura 8.65: Perfil de tensiones con el sistema de 2 MW situado en (52, 30) y conectado al nudo 3.	270
Figura 8.66: SIM15 - Evolución del VAN en función del número de iteraciones (Pe = 2 MW).	270
Figura 8.67: SIM16 – Óptima ubicación global para Pe=2 MW.....	273
Figura 8.68: Perfil de tensiones con el sistema de 2 MW situado en (73,96) y conectado al nudo 10.	274
Figura 8.69: SIM16 - Evolución del VANG en función del número de iteraciones (Pe=2 MW).....	275
Figura II.1: Cruce de cromosomas en los AG.	325
Figura II.2: Mutación de un gen.	326

Lista de tablas

Tabla 2.1: Características de las tecnologías de generación distribuida	28
Tabla 2.2: Comparación entre tipos de GD en función de sus aplicaciones.	32
Tabla 2.3: Comparativa de los tipos de GD según la energía eléctrica producida y la duración del suministro.	33
Tabla 4.1: Poder calorífico inferior de diversos productos	73
Tabla 4.2: Composición del gas en moles en %	86
Tabla 4.3: Residuos generados en actividades forestales.....	89
Tabla 5.1: Reacciones en la pila SOFC.....	118
Tabla 5.2: Reacciones en la pila SOFC que se consideran.....	131
Tabla 8.1: Valores estándar considerados	197
Tabla 8.2: Composición del gas en kmoles por tonelada de residuo	199
Tabla 8.3: Composición del gas en kmoles por tonelada de residuo	216
Tabla 8.4: Valores estándar independientes de las parcelas elegidas.....	216
Tabla 8.5: Resultados simulación SIM01.....	219
Tabla 8.6: Mejor resultado simulación SIM01	219
Tabla 8.7: Estadísticas simulación SIM01	219
Tabla 8.8: Resultados simulación SIM02.....	221
Tabla 8.9: Mejor resultado simulación SIM02.....	221
Tabla 8.10: Estadísticas simulación SIM02	221
Tabla 8.11: Resultados simulación SIM03.....	222
Tabla 8.12: Mejor resultado simulación SIM03.....	223
Tabla 8.13: Estadísticas simulación SIM03	223
Tabla 8.14: Número de evaluaciones de la función objetivo	225
Tabla 8.15: Resultados simulación SIM04 con PSO	227
Tabla 8.16: Mejor resultado simulación SIM04 con PSO.....	227
Tabla 8.17: Estadísticas simulación SIM04 con PSO	227
Tabla 8.18: Resultados simulación SIM04 con AG	228

Tabla 8.19: Mejor resultado simulación SIM04 con AG	229
Tabla 8.20: Estadísticas simulación SIM04 con AG.....	229
Tabla 8.21: Número de evaluaciones de la función objetivo SIM04	230
Tabla 8.22: Resultados simulación SIM05 con PSO	230
Tabla 8.23: Mejor resultado simulación SIM05 con PSO.....	231
Tabla 8.24: Estadísticas simulación SIM05 con PSO	231
Tabla 8.25: Resultados simulación SIM05 con AG.....	232
Tabla 8.26: Mejor resultado simulación SIM05 con AG	232
Tabla 8.27: Estadísticas simulación SIM05 con AG.....	232
Tabla 8.28: Número de evaluaciones de la función objetivo	233
Tabla 8.29: Resultados simulación SIM06.....	236
Tabla 8.30: Resultados simulación SIM07.....	238
Tabla 8.31: Resultados simulación SIM08.....	239
Tabla 8.32: Valores específicos de los 3 sistemas.....	243
Tabla 8.33: Resultados simulación SIM09.....	243
Tabla 8.34: Resultados simulación SIM10.....	245
Tabla 8.35: Resultados simulación SIM11	246
Tabla 8.36: Resultados simulación SIM12.....	249
Tabla 8.37: Resultados simulación SIM13.....	251
Tabla 8.38: Resultados simulación SIM14.....	252
Tabla 8.39: Parámetros de la red de distribución	256
Tabla 8.40: Composición del gas en kmoles por tonelada de residuo	267
Tabla 8.41: Resultados simulación SIM15.....	268
Tabla 8.42: Estadísticas simulación SIM15 con PSO	268
Tabla 8.43: Estadísticas simulación SIM15 con AG.....	269
Tabla 8.44: Número de evaluaciones de la función objetivo	271
Tabla 8.45: Resultados simulación SIM16.....	272
Tabla 8.46: Estadísticas simulación SIM16 con PSO	273
Tabla 8.47: Estadísticas simulación SIM16 con AG.....	273
Tabla 8.48: Número de evaluaciones de la función objetivo	274

Lista de abreviaturas

ACO	<i>Ant Colony Optimization</i> . Algoritmo basado en Colonias de Hormigas.
AE	Algoritmos Evolutivos.
AFC	<i>Alkaline Fuel Cell</i> . Pila de combustible alcalina.
AG	Algoritmos Genéticos.
BD	Búsqueda Dispersa.
BLI	Búsqueda Local Iterada.
BT	Búsqueda Tabú.
BVV	Búsqueda en Vecindario Variable.
CHP	<i>Combined Heat and Power</i> . Sistema combinado de generación de energía eléctrica y térmica.
CIGRE	<i>International Council on Large Electric Systems</i> . Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas.
CIRED	<i>Internacional Conference and Exhibition on Electricity Distribution</i> . Congreso y Exposición Internacional sobre Distribución de Energía Eléctrica.
DMFC	<i>Direct Methanol Fuel Cell</i> . Pila de combustible de metanol directo.
EE	Estrategias Evolutivas.
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i> . Instituto para la Investigación de la Energía Eléctrica.
ES	Enfriamiento Simulado.
GD	Generación Distribuida.
IEA	<i>International Energy Agency</i> . Agencia Internacional de la Energía.
MCFC	<i>Molten Carbonate Fuel Cell</i> . Pila de combustible de carbonato fundido.
MCG	Motor de Combustión de Gas.
MTG	Micro-turbina de Gas.
PAFC	<i>Phosphoric Acid Fuel Cell</i> . Pila de combustible de ácido fosfórico.
PE	Programación Evolutiva.

PEMFC	<i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell</i> . Pila de combustible de membrana con intercambio de protones.
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i> . Algoritmo basado en nubes de partículas.
SIG	Sistema de Información Geográfica.
SOFC	<i>Solid Oxide Fuel Cell</i> . Pila de combustible de óxido sólido.
SOFC–TG	Sistema híbrido formado por una pila de combustible de óxido sólido y una turbina de gas.
TG	Turbina de Gas.
TV	Turbina de Vapor.
YSZ	<i>Ytria Stabilized Zirconia</i> . Óxido de zirconio estabilizado con óxido de itrio.