

TABLA DE CONTENIDO

0.	INTRODUCCIÓN	1
0.1.	REFERENCIAS.....	2
1.	OBJETIVOS	3
2.	ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA DE GASIFICACIÓN	5
2.1.	TERMOQUÍMICA DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN.....	7
2.2.	CÁLCULO DE LA RELACIÓN AIRE/BIOMASA	18
2.3.	CARACTERÍSTICAS DE UN GASIFICADOR DE LECHO FIJO DOWNDRAFT.....	21
2.4.	CARACTERÍSTICAS DE UN GASIFICADOR DE LECHO FLUIDO BURBUJEANTE	24
2.5.	PRODUCCIÓN Y ELIMINACIÓN DE ALQUITRANES	26
2.6.	ADAPTACIÓN DE UN MCI PARA OPERAR CON SYNGAS.....	42
2.7.	REFERENCIAS DEL CAPÍTULO	50
3.	METODOLOGÍA Y DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.....	53
3.1.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	53
3.2.	DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE GASIFICACIÓN DE LECHO FIJO DOWNDRAFT.....	53
3.3.	DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE GASIFICACIÓN DE LECHO FLUIDO BURBUJEANTE.....	75
3.4.	SELECCIÓN DEL MOTOR-GENERADOR.....	90
3.5.	EQUIPOS PARA LA PREPARACIÓN DE LA BIOMASA	92
3.6.	REFERENCIAS DEL CAPÍTULO	94
4.	PUESTA EN OPERACIÓN DE LAS PLANTAS DE GASIFICACIÓN.....	95
4.1.	METODOLOGÍA PARA LA PUESTA EN MARCHA DE LAS PLANTAS DE GASIFICACIÓN	95
4.2.	METODOLOGÍA DE LAS PRUEBAS REALIZADAS EN LAS PLANTAS DE GASIFICACIÓN	95
4.3.	MEJORAS REALIZADAS EN LA PLANTA DE GASIFICACIÓN DE LECHO FIJO.....	96
4.4.	MEJORAS REALIZADAS EN LA PLANTA DE GASIFICACIÓN DE LECHO FLUIDO	100
5.	RESULTADOS.....	103
5.1.	RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS BIOMÁSICOS ANALIZADOS.....	103
5.2.	RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS EN LA PLANTA DE GASIFICACIÓN DE LECHO FIJO	105
5.3.	RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PLANTA DE GASIFICACIÓN DE LECHO FLUIDO BURBUJEANTE.	118
5.4.	COMPARACIÓN DE LAS DOS TECNOLOGÍAS DE GASIFICACIÓN.....	125
5.5.	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....	126
5.6.	REFERENCIAS DEL CAPÍTULO	126
6.	VIABILIDAD TÉCNICA, ECONÓMICA Y MEDIOAMBIENTAL	127
6.1.	VIABILIDAD TÉCNICA	127
6.2.	VIABILIDAD ECONÓMICA.....	127
6.3.	VIABILIDAD AMBIENTAL.....	137
6.4.	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....	138
6.5.	REFERENCIAS DEL CAPÍTULO	138
7.	CONCLUSIONES.....	139
8.	REFERENCIAS	141

ANEXOS

A.	ANEXO A: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS.....	A-1
A.1.	PLANTA DE GASIFICACIÓN DE LECHO FIJO	A-1
A.2.	PLANTA DE GASIFICACIÓN DE LECHO FLUIDO.....	A-23
B.	ANEXO B: METODOLOGÍA DEL MONTAJE DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES.....	B-1
B.1.	GASIFICADOR DE LECHO FIJO DOWNDRAFT.....	B-1
B.2.	GASIFICADOR DE LECHO FLUIDO BURBUJEANTE	B-5
C.	ANEXO C: METODOLOGÍA PARA LA REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS.....	C-1
C.1.	METODOLOGÍA PARA REALIZAR LAS PRUEBAS EN EL GASIFICADOR DE LECHO FIJO.....	C-1
C.2.	METODOLOGÍA PARA REALIZAR LAS PRUEBAS EN EL GASIFICADOR DE LECHO FLUIDO	C-8
D.	ANEXO D: PLANOS DE LA PLANTA DE GASIFICACIÓN.....	D-1
D.1.	PLANTA DE GASIFICACIÓN DE LECHO FIJO	D-1
D.2.	PLANTA DE GASIFICACIÓN DE LECHO FLUIDO.....	D-10
E.	ANEXO E: PLAN DE MANTENIMIENTO DE LAS PLANTAS DE GASIFICACIÓN.....	E-1
E.1.	PLAN DE MANTENIMIENTO DE LA PLANTA DE GASIFICACIÓN DE LECHO FIJO DOWNDRAFT.	E-1
E.2.	PLAN DE MANTENIMIENTO DE LA PLANTA DE GASIFICACIÓN DE LECHO FLUIDO BURBUJEANTE.....	E-7
F.	ANEXO F: CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS BIOMÁSICOS A GASIFICAR.....	F-1
F.1.	ESTRUCTURA DE LA BIOMASA	F-1
F.2.	CONSTITUYENTES DE LA BIOMASA CELULAR	F-4
F.3.	CLASIFICACIÓN GENERAL DE LA BIOMASA	F-6
F.4.	PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DE LA BIOMASA.....	F-9
F.5.	ANÁLISIS ELEMENTAL.....	F-11
F.6.	ANÁLISIS INMEDIATO.....	F-11
F.7.	PODER CALORÍFICO DE LA BIOMASA (HV O PC).....	F-12
F.8.	CARACTERIZACIÓN DE ALGUNOS RESIDUOS BIOMÁSICOS UTILIZADOS PARA REALIZAR LAS PRUEBAS.....	F-13
F.9.	CONCLUSIONES DE LA CARACTERIZACIÓN.	F-15
G.	ANEXO G: DISEÑO DE UNA PLANTA DE GASIFICACIÓN DE BIOMASA	G-1
G.1.	TIPOS DE GASIFICADORES	G-1
G.2.	DISEÑO DEL REACTOR	G-2
H.	ANEXO H: COSTES DE UNA PLANTA DE GASIFICACIÓN	H-1
I.	REFERENCIAS DE LOS ANEXOS.....	I-1

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación de las principales reacciones en el proceso de gasificación	8
Tabla 2.2 Estructura molecular de la biomasa y de los productos de la pirólisis	11
Tabla 2.3 Características de un gasificador de lecho fijo downdraft	23
Tabla 2.4 Características de un gasificador de lecho fluido burbujeante	25
Tabla 2.5 Cantidad de alquitranes contenida en el gas según el tipo de gasificador	28
Tabla 2.6 Límites de concentración de partículas y alquitranes - aplicaciones de generación de energía	28
Tabla 2.7 Composición típica de los alquitranes	30
Tabla 2.8 Parámetros característicos de los diferentes agentes gasificantes	34
Tabla 2.9 Producción de alquitranes y PCI usando diferentes agentes gasificantes	34
Tabla 2.10 Poder calorífico y otras propiedades de los componentes del gas pobre	43
Tabla 2.11 Comparación del PCI de la mezcla de syngas con los principales combustibles.	45
Tabla 2.12 Cantidad aceptable de polvo, alquitranes y ácidos en el syngas, para su uso en un MCI	48
Tabla 3.1 Características de la planta de gasificación de lecho fijo usada para realizar las pruebas	54
Tabla 3.2 Datos del motor-generador utilizado para realizar las pruebas	65
Tabla 3.3 Parámetros medidos en la planta de gasificación de lecho fijo	70
Tabla 3.4 Especificaciones técnicas del motor FG Wilson	91
Tabla 3.5 Especificaciones técnicas de la trituradora	92
Tabla 3.6 Especificaciones técnicas del molino de martillos	93
Tabla 3.7 Especificaciones técnicas de la pelletizadora	93
Tabla 5.1 Resumen de la caracterización de residuos de biomasa y de combustibles fósiles sólidos	104
Tabla 5.2 Indicadores importantes de los gasificadores de lecho fijo downdraft	106
Tabla 5.3 Cálculo del consumo de biomasa en un gasificador de lecho fijo downdraft	106
Tabla 5.4 Potencia eléctrica de la planta de gasificación downdraft	107
Tabla 5.5 Compuesto que aportan poder calorífico al gas – Lecho fijo	113
Tabla 5.6 Compuesto que aportan poder calorífico al gas – Lecho fijo	117
Tabla 5.7 Indicadores importantes de los gasificadores de lecho fluido burbujeante	118
Tabla 5.8 Potencia eléctrica de la planta de gasificación de lecho fluido burbujeante.	119
Tabla 5.9 Comparación de la tecnología de lecho fijo downdraft y fluido burbujeante	125
Tabla 6.1 Costes de instalación en las plantas de gasificación de lecho fijo de 9 y 52 kW	128
Tabla 6.2 Análisis económico de la generación de energía eléctrica en una planta de lecho fijo	129
Tabla 6.3 Rentabilidad de las plantas de gasificación de lecho fijo downdraft de 9 y 52 kW	130
Tabla 6.4 Costes de instalación y de potencia instalada en las plantas de lecho fluido de 10 y 58 kW	131
Tabla 6.5 Análisis económico de la generación de electricidad en una planta de lecho fluido	132
Tabla 6.6 Rentabilidad de las plantas de gasificación de lecho fluido de 10 y 58 kW	134
Tabla 6.7 Generación de EE mediante gasificación, GN y gasoil comparado con la red	135
Tabla 6.8 Generación de alquitranes y cenizas en las plantas de lecho fijo y fluido	137
Tabla 6.9 Ahorro de emisiones de CO ₂ por la generación de energía en las plantas estudiadas	138

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Ubicación actual de las plantas de biomasa, biogás y pellets en España	5
Figura 2.2 Ubicación de las tecnologías en estudio entre las principales existentes en la actualidad	7
Figura 2.3 Entradas, salidas y reacciones de las etapas del proceso de gasificación	9
Figura 2.4 Diagrama ternario CHO	12
Figura 2.5 Reactividad del residuo carbonoso de la turba y de la biomasa	13
Figura 2.6 Variación de K con la temperatura para algunas reacciones de gasificación	17
Figura 2.7 Reacciones que se llevan cabo en un gasificador downdraft	22
Figura 2.8 Perfil de temperaturas en un gasificador de lecho fijo downdraft	22
Figura 2.9 Perfil de temperatura en un gasificador de lecho fluido burbujeante	26
Figura 2.10 Variación de la producción primaria, secundaria y terciaria de alquitrans	31
Figura 2.11 Reducción de alquitrans in situ	32
Figura 2.12 Reducción de alquitrans post-gasificación	32
Figura 2.13 Filtro de barrera	39
Figura 2.14 Formación de alquitrans en un gasificador de lecho fijo downdraft	40
Figura 2.15 Formación de alquitrans en un gasificador de lecho fluido burbujeante	41
Figura 2.16 Eficiencia térmica de un MCI en función de la relación de compresión	47
Figura 2.17 Componentes del sistema de regulación de la mezcla aire/syngas	49
Figura 3.1 Esquema de la planta de gasificación con todos sus componentes	55
Figura 3.2 Planta de gasificación de lecho fijo downdraft	55
Figura 3.3 Reactor del gasificador de lecho fijo downdraft	56
Figura 3.4 Depósito de Biomasa a) con pellets b) vacío c) dimensiones d) vista exterior	56
Figura 3.5 Residuo carbonoso de pellets pirolizados en el depósito de biomasa	57
Figura 3.6 Configuración de 4 agujeros de entrada de aire a la zona de combustión	58
Figura 3.7 Bóvedas formadas utilizando astillas como combustible	58
Figura 3.8 Zona de reducción	59
Figura 3.9 Rejilla ubicada debajo del cono reductor.	60
Figura 3.10 Platos perforados de 7,5 cm de diámetro con orificios de 5, 10 y 15 mm	60
Figura 3.11 Rejilla intercambiable sobre la fija (1. Sin rejilla; 2: $D_o = 1\text{cm}$; 3: 1,1x1,1 cm; 4: 0,6x0,6 cm)	61
Figura 3.12 Plato perforado en la garganta y rejilla debajo del cono reductor	61
Figura 3.13 Depósito de cenizas	62
Figura 3.14 Lavador húmedo (Scrubber)	62
Figura 3.15 Lavador húmedo y separador centrífugo	63
Figura 3.16 Filtro de gas.	64
Figura 3.17 Bomba de vacío	64
Figura 3.18 Antorcha	65
Figura 3.19 Motor-generador utilizado para realizar las pruebas	66
Figura 3.20 Simulador de carga mediante resistencias eléctricas	66
Figura 3.21 Sistema de depuración del agua	67
Figura 3.22 Separador agua-gas	67
Figura 3.23 Depósitos y bombas del sistema de depuración de agua	68
Figura 3.24 Filtro de astillas y arena	69
Figura 3.25 Aerotermo	69
Figura 3.26 Puntos de medida de la planta downdraft y de la depuradora	71
Figura 3.27 Cuadro eléctrico	72
Figura 3.28 Esquema de comunicaciones	74
Figura 3.29 Esquema de los componentes de la planta de gasificación de lecho fluido burbujeante	76
Figura 3.30 Fotografía de los componentes de la planta de gasificación de lecho fluido burbujeante	76
Figura 3.31 Tolva de alimentación de Biomasa	77
Figura 3.32 Tornillo sinfín	77

Figura 3.33 Reactor: a) Instalado b) Con carcasa C) Con aislamiento d) Sin aislar	78
Figura 3.34 Entrada de aire	78
Figura 3.35 Puerto de encendido	79
Figura 3.36 Rejilla inferior y plato perforado inferior	79
Figura 3.37 Plato perforado superior	79
Figura 3.38 Tapa superior del reactor	80
Figura 3.39 Ubicación de las medidas de temperatura en el reactor	80
Figura 3.40 Manómetro diferencial para controlar caída de presión del lecho	81
Figura 3.41 Separador de sólidos: a) esquema b) Vista frontal c) Tapa (vista superior)	81
Figura 3.42 Ciclón	82
Figura 3.43 Intercambiador de tubos y manómetro diferencial para determinar el nivel de suciedad	82
Figura 3.44 Depósito de alquitranes	83
Figura 3.45 Esquema del lavador húmedo, filtro de gruesos y filtro de finos	83
Figura 3.46 Lavador de gas, filtro de gruesos y filtro de finos	83
Figura 3.47 Bomba de vacío	84
Figura 3.48 Rotámetros	84
Figura 3.49 Antorcha	85
Figura 3.50 Depósito de agua	85
Figura 3.51 Bomba de agua del circuito de refrigeración	85
Figura 3.52 Aeroterma (Intercambiador Agua-aire)	86
Figura 3.53 Cuadro eléctrico	86
Figura 3.54 Instrumentación de la planta de gasificación de lecho fluido	87
Figura 3.55 Esquema de comunicaciones	89
Figura 3.56 Motor FG Wilson UG14P1	90
Figura 3.57 Sistema de admisión del MCI.	90
Figura 3.58 Trituradora Genergy modelo pirineo	92
Figura 3.59 Molino de martillos	93
Figura 3.60 Pelletizadora	93
Figura 4.1 Modificación de la altura de entrada de aire y del diámetro de los agujeros.	97
Figura 4.2 Bóvedas formadas en el reactor de lecho fijo	98
Figura 4.3 Mejora del filtro de gas para limpiar el gas de forma adecuada.	99
Figura 4.4 Aglomeración de cenizas y arena de sílice- $T_{\text{reactor}} > 900^{\circ}\text{C}$	100
Figura 4.5 Orificio de encendido cercano a la biomasa en la base del reactor	101
Figura 4.6. Bomba de vacío con alquitranes. El sistema de limpieza inicial no era efectivo	101
Figura 5.1 Caudal de aire vs T en las zonas de pirólisis, combustión, reducción y PCI	110
Figura 5.2 Composición del gas y PCI	112
Figura 5.3 Reacciones en las zonas de combustión y reducción, cuando se utiliza un plato perforado	112
Figura 5.4 Presiones en función del caudal de aire (todas la presiones son negativas)	114
Figura 5.5 Caudal de aire vs T en las zonas de pirólisis, combustión, reducción y PCI	115
Figura 5.6 Principales reacciones en las zonas de combustión y reducción sin plato perforado	116
Figura 5.7 Composición del gas y PCI	116
Figura 5.8 Presiones en función del caudal de aire	117
Figura 5.9 Caudal de aire, biomasa y temperaturas en las zonas de combustión y garganta	122
Figura 5.10 Temperaturas, composición del gas y PCI	123
Figura 5.11 Perfil de temperaturas en el gasificador de lecho fluido burbujeante	123
Figura 6.1 Ingresos, gastos y tiempo de recuperación de la inversión – L. fijo de 53 kWe	129
Figura 6.2 Retorno de la inversión y rentabilidad en función del precio de venta del kW –L. Fijo 52kW	130
Figura 6.3 Ingresos, gastos y tiempo de recuperación de la inversión - L. fluido 58 KW	132
Figura 6.4 Retorno de la inversión y rentabilidad en función del precio de venta -L. fluido 58 kW	133
Figura 6.5 Costes de instalación para plantas de lecho fijo downdraft y fluido burbujeante	134
Figura 6.6 Costes de generación de EE – tecnologías: gasificación y MCI con gasoil o GN	135

