Autores de los capítulos del volumen I
(Por orden de aparición)

Paula Canalís Martínez, Profesora Colaboradora en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza y Jefa de Proyecto en el Grupo BERA (Biomasa Evaluación Recursos y Aprovechamiento) del Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE).

Maryori Díaz Rámirez, Ingeniera Química, Investigadora-Ingeniera en el Grupo BERA (Biomasa Evaluación Recursos y Aprovechamiento) del Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE), actualmente desarrollando su tesis doctoral en la Universidad de Zaragoza sobre los problemas relacionados con las cenizas de los biocombustibles sólidos en los equipos de combustión.

Daniel García-Galindo, Ingeniero Industrial, Investigador-Ingeniero en el Grupo BERA (Biomasa Evaluación Recursos y Aprovechamiento) del Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE), actualmente desarrollando su tesis doctoral en la Universidad de Zaragoza sobre el potencial de co-combustión en España.

Maider Gómez Palmero, Ingeniera de Montes y Licenciada en Ciencias Ambientales, Investigadora-Ingeniera en el Grupo BERA (Biomasa Evaluación Recursos y Aprovechamiento) del Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE), actualmente desarrollando su tesis doctoral en la Universidad de Zaragoza sobre la viabilidad medioambiental de los cultivos energéticos.

Eva López Hernández, Ingeniera Química, Investigadora-Ingeniera en el Grupo BERA (Biomasa Evaluación Recursos y Aprovechamiento) del Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE), actualmente desarrollando su tesis doctoral en la Universidad de Zaragoza sobre la gestión del almacenamiento de los biocombustibles sólidos y su influencia en el secado del recurso.

Daniel Maraver de Lemus, Ingeniero Industrial, Investigador-Ingeniero en el Grupo BERA (Biomasa Evaluación Recursos y Aprovechamiento) del Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE), actualmente desarrollando su tesis doctoral en la Universidad de Zaragoza sobre la trigeneración con biocombustibles sólidos.

Adeline Rezeau, Ingeniera Industrial, Investigadora-Ingeniera en el Grupo BERA (Biomasa Evaluación Recursos y Aprovechamiento) del Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE), actualmente desarrollando su tesis doctoral en la Universidad de Zaragoza sobre la modelización y el desarrollo de equipos de combustión de lecho fijo.

Javier Royo Herrer, Profesor Titular de la Universidad de Zaragoza, Departamento de Ingeniería Mecánica. Colaborador externo en el Grupo BERA (Biomasa Evaluación Recursos y Aprovechamiento) del Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE).

Fernando Sebastián Nogués, Ingeniero Industrial, Responsable del Grupo BERA (Biomasa Evaluación Recursos y Aprovechamiento) del Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE), actualmente desarrollando su tesis doctoral en la Universidad de Zaragoza sobre la la viabilidad medioambiental de la co-combustión de la biomasa.

Luis Esteban Pascual, Doctor Ingeniero de Montes, Responsable de Evaluación de Recursos y Pretratamientos en el Centro de Desarrollo de Energías Renovables (CEDER), Lubia (Soria), dependiente del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT).

Pilar Ciria Ciria, Doctora Ingeniera Agrónoma, Responsable de Cultivos Energéticos en el Centro de Desarrollo de Energías Renovables (CEDER), Lubia (Soria), dependiente del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT).

Eva Llera Sastresa, Doctora Ingeniera Industrial, Profesora ayudante en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza y Directora de la Sección Postgrados en el Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE).

Miguel Gil Cinca, Ingeniero Industrial, Investigador-Ingeniero de la División Térmica del Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE), actualmente desarrollando su tesis doctoral en la Universidad de Zaragoza sobre la molienda de biomasa.

Irene Mediavilla Ruiz, Doctora Ingeniera Química, Investigadora en Pretratamientos y Combustión en el Centro de Desarrollo de Energías Renovables (CEDER), Lubia (Soria), dependiente del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT).

Gloria Gea Galindo, Doctora en Ciencias Químicas, Profesora Titular del Área de Ingeniería Química de la Universidad de Zaragoza e Investigadora del Grupo de Procesos Termoquímicos en temas relacionados con la pirólisis y la gasificación de biocombustibles sólidos.

Rafael Bilbao Duñabeitia, Doctor en Ciencias Químicas, Catedrático del Área de Ingeniería Química de la Universidad de Zaragoza, Director del Grupo de Investigación de Procesos Termoquímicos en temas relacionados con la pirólisis y la gasificación de biocombustibles sólidos.

José Luis Sánchez Cebrián, Doctor en Ciencias Químicas, Profesor Titular del Área de Ingeniería Química de la Universidad de Zaragoza e Investigador del Grupo de Procesos Termoquímicos en temas relacionados con la pirólisis y la gasificación de biocombustibles sólidos.

Jesús Arauzo Pérez, Doctor en Ciencias Químicas, Catedrático del Área de Ingeniería Química de la Universidad de Zaragoza e Investigador del Grupo de Procesos Termoquímicos en temas relacionados con la pirólisis y la gasificación de biocombustibles sólidos y con la producción de biohidrógeno.

Isabel Fonts Amador, Ingeniera Química, actualmente desarrollando su tesis doctoral en la Universidad de Zaragoza, dentro del Grupo de Procesos Termoquímicos, sobre la producción de líquidos de pirólisis a partir de biocombustibles sólidos.

Javier Ábrego Garrués, Ingeniero Químico, actualmente desarrollando su tesis doctoral en la Universidad de Zaragoza dentro del Grupo de Procesos Termoquímicos, sobre la producción de sólidos adsorbentes a partir de biocombustibles sólidos.

Pedro García Bacaicoa (D.E.P.), Doctor Ingeniero Químico, Profesor Titular en el Departamento de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente de la Universidad de Zaragoza.

Índice

Presentación 7
Prólogo 9
Agradecimientos 13
Prefacio..... 15

PARTE I 25

1. INTRODUCCIÓN AL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS 27
1.0. Introducción 27
1.1. Fuentes y evaluación de biocombustibles sólidos 28
1.1.1. Fuentes de biocombustibles sólidos 29
1.1.2. Evaluación del potencial de un recurso biomásico 35
1.2. Caracterización y pretratamientos de biocombustibles sólidos 41
1.2.1. Características de la biomasa como combustible 41
1.2.2. Pretratamientos 47
1.3. Transformaciones termoquímicas 55
1.3.1. Introducción 55
1.3.2. Pirólisis 57
1.3.3. Gasificación 60
1.3.4. Combustión 63
1.3.5. Resumen 68
1.4. Conclusiones 70
1.5. Bibliografía 72

2. FUENTES Y EVALUACIÓN DE RECURSOS 75
2.1. Introducción 75
2.2. Objetivos y relevancia de la evaluación 76
2.2.1. Clasificación de los recursos 76
2.2.2. Biomasa agro-forestal residual: definición y tipos 77
2.3. Metodologías de evaluación de residuos agrícolas 81
2.3.1. Recopilación de información 81
2.3.2. Proceso de datos: cuantificación del recurso 83
2.4. Metodologías de evaluación de biomasa forestal 86
2.4.1. Métodos para montes arbolados 86

2.4.2. Métodos para montes no arbolados 91
2.5. Metodologías de evaluación de residuos
de las industrias agroforestales 92
2.5.1. Industrias alimentarias 92
2.5.2. Industrias de la madera 93
2.6. Conclusiones 94
2.7. Vocabulario y abreviaturas 95
2.8. Bibliografía 96

3. CULTIVOS ENERGÉTICOS LIGNOCELULÓSICOS 97
3.0. Introducción 97
3.1. Características de los cultivos energéticos 98
3.2. Tipos de cultivos energéticos 99
3.3. Cultivos lignocelulósicos herbáceos 101
3.4. Cultivos lignocelulósicos leñosos 111
3.5. Factores de interés en la producción de biomasa (balances) 120
3.6. Conclusiones 121
3.7. Bibliografía 122

4. CARACTERIZACIÓN DE LOS BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS 125
4.0. Introducción: la caracterización del combustible 125
4.1. Composición estructural de la biomasa lignocelulósica 126
4.1.1. Componentes mayoritarios 127
4.1.2. Componentes minoritarios 128
4.1.3. Influencia de la composición estructural
sobre el aprovechamiento energético 128
4.2. Caracterización química de la biomasa 129
4.2.1. Análisis inmediato 131
4.2.2. Análisis elemental 136
4.2.3. Análisis de composición elemental de las cenizas 138
4.3. Caracterización energética de la biomasa 139
4.3.1. Poder calorífico: definición y método de determinación 140
4.3.2. Poder calorífico del combustible húmedo 142
4.4. Caracterización física de la biomasa 143
4.4.1. Densidad aparente 144
4.4.2. Densidad de partícula 145
4.4.3. Tamaño y forma 146
4.4.4. Durabilidad mecánica o friabilidad 148
4.4.5. Temperatura de fusibilidad de las cenizas 148

4.5. Comparación entre el carbón y la biomasa 149
4.6. Normativa y estandarización de la biomasa 151
4.7. Conclusiones 152
4.8. Bibliografía 153

5. ALMACENAMIENTO, ALIMENTACIÓN Y TRANSPORTE EN PLANTA 155
5.0. Introducción 155
5.1. Propiedades 156
5.1.1. Densidad aparente 156
5.1.2. Ángulo de reposo 157
5.1.3. Coeficiente de fricción de pared y coeficiente de fricción interna 157
5.1.4. Cohesividad 160
5.2. Almacenamiento de la biomasa: tolvas y silos 162
5.2.1. Tipos de flujo en una tolva 164
5.2.2. Tipos de obstrucciones 165
5.2.3. Diseño de los parámetros constructivos de una tolva para que tenga lugar su descarga por gravedad 166
5.2.4. Dispositivos para ayudar la descarga de silos y tolvas 172
5.3. Sistemas de descarga, alimentación y/o transporte del recurso 172
5.3.1. Cintas transportadoras 173
5.3.2. Tornillos sinfín 175
5.3.3. Válvulas rotativas 180
5.3.4. Transporte neumático 183
5.4. Sistemas de separación o filtrado y de clasificación granulométrica 193
5.4.1. Ciclones 193
5.4.2. Filtros de mangas 200
5.4.3. Cribas y tamices 202
5.5. Conclusiones 203
5.6. Bibliografía 203

6. PRETRATAMIENTOS: REDUCCIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD 207
6.0. Introducción 207
6.1. La humedad en la biomasa 208
6.2. Parámetros para el estudio del secado 210
6.2.1. Características del agente secante y del recurso a secar 210
6.2.2. Isotermas de sorción 212
6.2.3. Cinética del secado 216

6.3. Secado natural 218
6.3.1. Parámetros del secado natural 218
6.3.2. Características de la pila y posibles manejos 220
6.3.3. Ventajas e inconvenientes del secado natural de biomasa 221
6.4. Secado forzado 222
6.4.1. Secaderos directos de tipo rotatorio 224
6.4.2. Secaderos solares 229
6.4.3. Ventajas e inconvenientes del secado forzado de biomasa 231
6.5. Torrefacción 232
6.5.1. Aspectos generales de la torrefacción 232
6.5.2. Calidad y aplicaciones del biocombustible torrefactado 234
6.6. Conclusiones 235
6.7. Bibiografía 236

7. PRETRATAMIENTOS: REDUCCIÓN GRANULOMÉTRICA 239
7.1. Introducción 239
7.2. Modelos de ruptura 240
7.2.1. Tipos de fractura 241
7.2.2. Grindabilidad 244
7.3. Requerimientos granulométricos 247
7.4. Reducción intermedia de tamaño 249
7.4.1. Maquinaria 250
7.4.2. Integración de la reducción intermedia en la explotación de la biomasa 255
7.5. Molienda 256
7.5.1. Tipos de molinos 257
7.5.2. Selección del molino 267
7.5.3. Configuraciones y estrategias en instalaciones de molienda 268
7.6. Consumos energéticos de molienda 271
7.7. Conclusiones 278
7.8. Bibliografía 279

8. PRETRATAMIENTOS: DENSIFICACIÓN 283
8.0. Introducción 283
8.1. Objetivos de la densificación 284
8.2. Empacado 284
8.3. Briquetado 286
8.3.1. Equipos de briquetado 287
8.3.2. Características de las briquetas 289

8.3.3. Calidad de las briquetas 290
8.3.4. Situación del mercado de briquetas 290
8.4. Peletizado 291
8.4.1. Equipos de peletizado 293
8.4.2. Características de los pélets 297
8.4.3. Calidad de los pélets 297
8.4.4. Situación del mercado de pélets 298
8.5. Conclusiones 300
8.6. Bibliografía 301

9. REACCIONES SÓLIDO-GAS 305
9.0. Introducción 305
9.1. Etapas de los procesos termoquímicos 307
9.1.1. Reacción química 307
9.1.2. Etapas físicas 308
9.2. Factores que afectan a la velocidad de los procesos termoquímicos de biomasa 312
9.2.1. Factores que afectan a la velocidad de la etapa de transferencia externa de materia 312
9.2.2. Factores que afectan a la velocidad de la etapa de transferencia interna de materia 313
9.2.3. Factores que afectan a la velocidad de la etapa de reacción química 313
9.3. Ecuaciones cinéticas para las reacciones sólido-gas no catalíticas. Modelo del núcleo decreciente 314
9.3.1. Modelo de núcleo decreciente para el caso particular de partículas esféricas de tamaño constante 314
9.3.2. Modelo de núcleo decreciente para el caso particular de partículas esféricas de tamaño decreciente 325
9.3.3. Metodología para determinar la etapa controlante de la velocidad 326
9.3.4. Casos más generales 328
9.4. Herramientas para determinar los factores que afectan a la cinética química: estudios termogravimétricos 330
9.5. Conclusiones 331
9.6. Bibliografía 332

10. REACTORES SÓLIDO-GAS 335
10.0. Introducción 335

10.1. Tipos de reactores sólido-gas 335
10.1.1. Reactores discontinuos para el sólido (y continuos para el gas) 336
10.1.2. Reactores continuos para el sólido y el gas 337
10.2. Comparación entre los diferentes tipos de reactores sólido-gas 347
10.2.1. Según la operación del sólido 347
10.2.2. Según el tamaño de partícula 347
10.2.3. Según la pérdida de carga 348
10.2.4. Según el tipo de flujo del gas y del sólido 348
10.3. Dimensionamiento de reactores sólido-gas 353
10.3.1. Ecuaciones de diseño 353
10.3.2. Ejemplos 357
10.4. Conclusiones 361
10.5. Bibliografía 363

11. PIRÓLISIS DE BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS 365
11.0. Introducción 365
11.1. Definición y tipos de pirólisis 365
11.2. Pirólisis lenta para la producción de sólido *(char)* 369
11.2.1. Producción de carbón vegetal *(charcoal)* 369
11.2.2. Producción de sólidos adsorbentes 373
11.3. Pirólisis rápida de biomasa lignocelulósica para la producción de líquido 375
11.3.1. Reactores de pirólisis para producción de líquido 375
11.3.2. Efecto de las condiciones de operación en la pirólisis rápida .. 378
11.3.3. Efecto de la composición del material de partida en el rendimiento a líquido 379
11.3.4. Propiedades fisicoquímicas del líquido de pirólisis de recursos lignocelulósicos 380
11.3.5. Métodos para la determinación de las propiedades fisicoquímicas del líquido de pirólisis 382
11.4. Aplicaciones de los líquidos de pirólisis 386
11.4.1. Obtención de productos químicos 387
11.4.2. Producción de gas de síntesis 388
11.4.3. Utilización del líquido pirolítico como combustible 388
11.4.4. Especificaciones para el uso de los líquidos de pirólisis como combustible 392
11.5. Conclusiones 396
11.6. Bibliografía 398

12. GASIFICACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS 401
12.0. Introducción 401
12.1. Principios básicos del proceso 402
12.2. Procesos de gasificación 404
12.2.1. Agentes gasificantes 404
12.2.2. Configuración sólido-agente gasificante 405
12.2.3. Otros factores determinantes en el modo de gasificación 406
12.3. Tipos de gasificadores 406
12.3.1. Lecho móvil en contracorriente o *updraft* 407
12.3.2. Lecho móvil en corrientes paralelas o *downdraft* 408
12.3.3. Gasificadores de lecho fluidizado 410
12.3.4. Gasificadores de lecho arrastrado 412
12.4. Clasificación de los distintos sistemas de gasificación y principales características 412
12.5. Condicionantes técnicos de un proceso de gasificación para biomasa 414
12.5.1. Factores dependientes de la biomasa 414
12.5.2. Factores dependientes de las condiciones de operación 416
12.5.3. Factores dependientes del diseño de los equipos 418
12.6. Sistemas de acondicionamiento del gas producto 419
12.6.1. Materia particulada 420
12.6.2. Compuestos orgánicos (alquitranes o *tars)* 421
12.6.3. Compuestos de nitrógeno 423
12.6.4. Compuestos de azufre 423
12.6.5. Compuestos de cloro 424
12.6.6. Metales alcalinos 424
12.7. Aplicaciones del gas producido 425
12.7.1. Producción de energía térmica en una caldera 425
12.7.2. Producción de electricidad en motores de combustión interna 425
12.7.3. Utilización del gas de gasificación en una pila de combustible 426
12.7.4. Producción de biodiésel 426
12.8. Tecnologías de gasificación para biomasa 426
12.8.1. Tecnologías *downdraft* 427
12.8.2. Tecnologías *updraft* 428
12.8.3. Lecho fluidizado 428
12.9. Conclusiones y recomendaciones 429
12.10. Bibliografía 431
12.11. Bibliografía adicional 432

13. COMBUSTIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS 435
13.0. Introducción 435
13.1. La combustión: aspectos generales 436
13.1.1. La combustión, ¿qué es? 436
13.1.2. Conceptos y definiciones 437
13.2. Combustión de biocombustibles sólidos 441
13.2.1. Principales procesos que tienen lugar en la combustión de biomasa sólida 441
13.2.2. Caracterización de la biomasa para su combustión 445
13.2.3. Diseño y control de la cámara de combustión 447
13.3. Tecnologías de combustión de biomasa sólida 449
13.3.1. Tipos de calderas 450
13.3.2. Tipos de quemadores 452
13.3.3. Síntesis de las tecnologías de combustión 473
13.4. Conclusiones 475
13.5. Bibliografía 475

14. CO-COMBUSTIÓN 479
14.0. Introducción 479
14.1. Aspectos generales de la co-combustión 479
14.1.1. ¿Qué es la co-combustión? 479
14.1.2. Características de los combustibles 481
14.1.3. Ventajas de la co-combustión frente a la combustión de combustibles fósiles 482
14.1.4. Ventajas de la co-combustión frente a la combustión aislada de biomasa 484
14.1.5. Barreras de la co-combustión 486
14.2. Particularidades de la co-combustión en función del tipo de caldera 487
14.3. Tecnologías de co-combustión en calderas de combustible pulverizado 490
14.3.1. Co-combustión directa 490
14.3.2. Co-combustión indirecta 494
14.4. Aspectos económicos de la co-combustión 498
14.5. Ejemplo práctico: co-combustión en la central térmica de Escucha 500
14.5.1. Introducción 500
14.5.2. Objetivos y fases del proyecto 501
14.5.3. Integración de la co-combustión en la central 502
14.5.4. Pruebas en funcionamiento real. Resultados 504

14.6. Conclusiones 506
14.7. Bibliografía 507

15. EFECTOS ASOCIADOS A LAS CENIZAS DE LA BIOMASA: PREDICCIÓN, EVALUACIÓN Y MITIGACIÓN 509
15.0. Introducción 509
15.1. Origen: materia que forma las cenizas 509
15.2. Comportamiento de las cenizas durante la conversión de la biomasa 511
15.2.1. Formación de las fracciones de cenizas 511
15.2.2. Problemas asociados a las cenizas 515
15.2.3. Mecanismos de formación de las cenizas de fondo y problemas de sinterización y de aglomeración 518
15.2.4. Mecanismos de formación de cenizas volantes y acumulación de depósitos en las superficies de transferencia 519
15.3. Métodos de evaluación de los efectos generados por las cenizas 522
15.3.1. Métodos predictivos 522
15.3.2. Métodos de evaluación en planta 528
15.4. Medidas para la minimización de los problemas de escorificación y deposición ocasionados por las cenizas 530
15.4.1. Medidas de acción primaria 531
15.4.2. Medidas de acción secundaria 532
15.4.3. Control y seguimiento 533
15.5. Impacto de la ceniza de biomasa sobre los procesos de corrosión en calderas 535
15.5.1. Mecanismos de corrosión 536
15.5.2. Medidas para la minimización y control de los problemas de corrosión inducida por el cloro 539
15.6. Conclusiones 541
15.7. Bibliografía 542

Autores de los capítulos del volumen I 545