

MARÍA ÁNGELES MARTÍN LARA  
MÓNICA CALERO DE HOCES

# ENERGÍA DE LA BIOMASA Y BIOCOMBUSTIBLES

GRANADA  
2020

COLECCIÓN MANUALES MAJOR

© MARÍA ÁNGELES MARTÍN LARA, MÓNICA CALERO DE HOCES.  
© UNIVERSIDAD DE GRANADA.  
ENERGÍA DE LA BIOMASA Y BIOCOMBUSTIBLES.

ISBN: 978-84-338-6697-4  
Depósito legal: Gr./Gr./806-2020

Edita: Editorial Universidad de Granada  
Campus Universitario de Cartuja, Granada  
Tel.: 958 24 39 30 - 958 24 62 20  
Web: editorial.ugr.es

Preimpresión: TADIGRA S.L., Granada  
Diseño de cubierta: José María Medina Alvea  
Imprime: Imprenta Comercial. Motril. Granada

*Printed in Spain*

*Impreso en España*

*Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley.*

# ÍNDICE

PRÓLOGO.....	11
--------------	----

## PARTE I: INTRODUCCIÓN

1. LA BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGÍA.....	15
1.1. Definición de biomasa.....	17
1.2. Generación de energía a partir de biomasa.....	18
1.3. Origen de la biomasa.....	23
1.4. Clasificación de la biomasa.....	24
1.5. Caracterización de la biomasa.....	25
1.6. Procesos de transformación física de la biomasa.....	30
1.7. Diferentes generaciones de biocombustibles.....	32
1.8. Biorrefinerías.....	33
2. SITUACIÓN ACTUAL DE LA BIOMASA.....	37
2.1. Situación de la biomasa en el mundo y en la Unión Europea.....	39
2.2. Situación de la biomasa en España.....	49
2.3. Situación de la biomasa en Andalucía.....	50
3. TECNOLOGÍAS PARA LA CONVERSIÓN DE LA BIOMASA.....	55
3.1. Introducción.....	57
3.2. Combustión directa.....	57
3.3. Procesos de conversión termoquímica.....	59
3.4. Procesos de conversión bioquímica.....	62
3.5. Procesos de conversión fisicoquímica.....	64

## PARTE II: PROCESOS DE CONVERSIÓN TERMOQUÍMICA

4. COMBUSTIÓN DE BIOMASA SÓLIDA.....	69
4.1. Generalidades sobre la combustión de biomasa.....	71
4.2. Tipos de reactores sólido-gas empleados para la combustión de biomasa sólida.....	75
4.3. Co-combustión de biomasa y carbón.....	81
4.4. Emisiones contaminantes de la combustión de biomasa.....	83

5. GASIFICACIÓN DE BIOMASA SÓLIDA. PRODUCCIÓN DE GAS DE SÍNTESIS .....	85
5.1. Definición, propiedades y aplicaciones del gas de síntesis .....	87
5.2. Gasificación de biomasa para la producción de gas de síntesis .....	88
5.3. Acondicionamiento y depuración del gas de síntesis .....	95
6. PIRÓLISIS RÁPIDA DE BIOMASA SÓLIDA. PRODUCCIÓN DE BIO-OIL .....	97
6.1. Definición, propiedades y aplicaciones del bio-oil .....	99
6.2. Pirólisis de biomasa para la producción de bio-oil .....	100
7. TORREFACCIÓN DE BIOMASA SÓLIDA. PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES	
SÓLIDOS MEJORADOS .....	107
7.1. Definición de torrefacción .....	109
7.2. Propiedades del biocombustible sólido torrefactado .....	109
7.3. Aplicaciones del biocombustible sólido torrefactado .....	110

### PARTE III: BIODIÉSEL

8. INTRODUCCIÓN AL BIODIÉSEL COMO FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE .....	113
8.1. Definición de biodiésel .....	115
8.2. Origen histórico del biodiésel .....	115
8.3. Ventajas e inconvenientes del empleo generalizado del biodiésel como combustible alternativo para automoción .....	116
8.4. Materias primas susceptibles de conversión en biodiésel .....	120
8.5. Hidrobiodiésel .....	127
9. SITUACIÓN ACTUAL Y FUTURA DEL BIODIÉSEL .....	129
9.1. Situación del biodiésel en el mundo y en la Unión Europea .....	131
9.2. Situación del biodiésel en España .....	138
9.3. Situación del biodiésel en Andalucía .....	139
10. PROCESOS DE PRODUCCIÓN: VÍAS QUÍMICA Y ENZIMÁTICA .....	143
10.1. Principios químicos de la reacción de transesterificación .....	145
10.2. Catálisis homogénea .....	146
10.3. Catálisis heterogénea .....	156
10.4. Catálisis enzimática .....	160
11. EMPLEO DEL BIODIÉSEL EN MOTORES .....	161
11.1. Parámetros de calidad .....	163
11.2. Uso del biodiésel en motores .....	169

## PARTE IV: BIOETANOL

12. INTRODUCCIÓN AL BIOETANOL COMO FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE .....	175
12.1. Definición y aplicaciones del bioetanol como carburante.....	177
12.2. Origen histórico del bioetanol .....	179
12.3. Ventajas e inconvenientes del empleo generalizado del bioetanol como combustible alternativo para automoción.....	179
12.4. Materias primas susceptibles de conversión en bioetanol.....	182
12.5. Pretratamiento de las materias primas.....	184
13. SITUACIÓN ACTUAL Y FUTURA DEL BIOETANOL.....	197
13.1. Situación del bioetanol en el mundo y en la Unión Europea .....	199
13.2. Situación del bioetanol en España.....	204
13.3. Situación del bioetanol en Andalucía .....	206
14. PROCESOS DE PRODUCCIÓN: TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES E INNOVADORAS .....	207
14.1. Principios de la fermentación.....	209
14.2. Fermentación de biomasa lignocelulósica.....	215
15. EMPLEO DEL BIOETANOL EN MOTORES .....	221
15.1. Especificaciones del bioetanol .....	223
15.2. Uso del bioetanol en motores .....	223

## PARTE V: BIOGÁS

16. INTRODUCCIÓN AL BIOGÁS COMO FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE .....	229
16.1. Definición y composición del biogás .....	231
16.2. Origen histórico del biogás .....	233
16.3. Ventajas e inconvenientes del empleo generalizado del biogas como combustible alternativo .....	234
16.4. Aplicaciones del biogás.....	235
16.5. Materias primas susceptibles de conversión en biogás .....	237
17. SITUACIÓN ACTUAL Y FUTURA DEL BIOGÁS .....	241
17.1. Situación del biogás en el mundo.....	243
17.2. Situación del biogás en la Unión Europea y en España .....	244
17.3. Situación del biogás en Andalucía .....	247
18. PROCESOS DE PRODUCCIÓN: TECNOLOGÍAS PARA LA DIGESTIÓN Y PURIFICACIÓN DEL BIOGÁS.....	249
18.1. Principios de la digestión anaerobia.....	251
18.2. Tecnologías para la obtención de biogás a partir de residuos .....	258
18.3. Tecnologías para el tratamiento del biosólido o digestato .....	269
18.4. Tecnologías para la depuración del biogás.....	272

## PARTE VI: OTROS BIOCOMBUSTIBLES

19. BIOMETANOL .....	287
19.1. Generalidades del biometanol .....	289
19.2. Procesos de producción .....	290
19.3. Ventajas e inconvenientes del empleo generalizado del biometanol como combustible alternativo .....	295
20. BIOBUTANOL.....	297
20.1. Generalidades del biobutanol .....	299
20.2. Procesos de producción de biobutanol .....	300
20.3. Recuperación del butanol del caldo de fermentación.....	302
21. GASOLINA Y GASÓLEO FISCHER-TROPSCH .....	307
21.1. Aspectos básicos de la síntesis Fischer-Tropsch .....	309
21.2. Desarrollo histórico .....	311
21.3. Mecanismo de reacción y distribución de productos .....	311
22. BIOHIDRÓGENO .....	313
22.1. Generalidades sobre el biohidrógeno .....	315
22.2. Procesos de producción de biohidrógeno.....	316
22.3. Ventajas e inconvenientes del empleo generalizado del biohidrógeno como combustible alternativo .....	320
EJERCICIOS NUMÉRICOS.....	323
ACTIVIDADES COMPLEMENTARIAS .....	337
BIBLIOGRAFÍA.....	349

# PRÓLOGO

En los países industrializados el sistema energético está basado principalmente en los combustibles fósiles (especialmente el carbón, el petróleo y el gas natural) que son recursos finitos que se agotarán antes o después. A esto hay que añadir que su extracción y empleo son la causa más importante de los problemas medioambientales a los que se enfrenta actualmente el hombre. Podemos decir que al quemarlos se destruye una materia prima importantísima para la industria química provocando la contaminación del aire en los centros urbanos, el calentamiento global del planeta y el fenómeno conocido como la lluvia ácida. No menos importante es, en este tipo de combustibles, la inseguridad en el suministro como consecuencia de la distribución geográfica no uniforme de los yacimientos.

La característica fundamental de las energías renovables es que son susceptibles de regenerarse al mismo ritmo que se consumen por lo que se pueden considerar como inagotables. Otros aspectos positivos provienen de su empleo que es mucho más respetuoso con el medio ambiente que el uso de las energías fósiles. Concretamente determinan una emisión cero de dióxido de carbono y, por tanto, no contribuyen al calentamiento global del planeta. Por otra parte, al tratarse de fuentes propias su empleo permite reducir el grado de dependencia energética exterior. Finalmente su implantación promueve el desarrollo tecnológico y origina un importante número de puestos de trabajo. Sin embargo, las energías renovables también tienen algunos inconvenientes. Son esencialmente intermitentes, difícilmente almacenables en grandes cantidades y no pueden emplearse directamente para el transporte.

El objetivo de este libro es que sirva de apoyo a los estudiantes de la asignatura optativa “Biocombustibles y Energías Alternativas” del Grado en Ingeniería Química de la Universidad de Granada o en general para todos aquellos interesados en el sector de la bioenergía y los biocombustibles.

En este manual se tratan los aspectos introductorios de la bioenergía con el objetivo de que el lector sea capaz de comprender la importancia de la biomasa como fuente de energía. En lo que respecta a su estructura, el libro contiene 6 grandes bloques, cada uno de ellos presentados en forma independiente. El primer bloque comprende 3 capítulos y en él se exponen los fundamentos del uso de la biomasa

como fuente energética. El segundo bloque contiene 4 capítulos que se ocupan de los procesos de conversión termoquímica de la biomasa. El tercer bloque presenta otros 4 capítulos basados en la producción de biodiésel. El cuarto bloque está destinado al biocombustible más utilizado en el mundo, el bioetanol y está formado por otros 4 capítulos. El quinto bloque comprende 3 capítulos y en él se expone una introducción al biogás como fuente de energía renovable. El sexto bloque comprende 4 nuevos capítulos destinados a otros biocombustibles como el biometanol, biobutanol, gasolina y gasóleo Fischer-Tropsch y el biohidrógeno. Finalmente, la sección final del libro ofrece algunos ejercicios numéricos útiles y algunas actividades complementarias para afianzar los conceptos expuestos.

Esta obra es el resultado del esfuerzo de las autoras, que refleja su ánimo y entrega por la docencia. Las autoras esperan que este libro sea una herramienta adecuada en la formación de los Graduados en Ingeniería Química y que los estudiantes encuentren este material comprensible y útil.

*M.A. Martín-Lara  
M. Calero*

Parte I:  
INTRODUCCIÓN

# 1

## La biomasa como fuente de energía

El rápido agotamiento y los impactos ambientales asociados a los combustibles fósiles han provocado la necesidad de utilizar fuentes alternativas de energía. La energía solar, la energía eólica, la energía de la biomasa y la energía geotérmica son algunas de las energías alternativas que se están explorando actualmente. La biomasa es un recurso de energía abundante, renovable y relativamente limpio que puede emplearse para la generación de diferentes formas de energía (calor, electricidad) y productos útiles. Hay una serie de métodos establecidos disponibles para la conversión de biomasa en diferentes formas de energía que, de manera general, pueden clasificarse en métodos termoquímicos y bioquímicos. Además, se ha integrado el concepto de biorrefinería donde, como en una refinería de petróleo, se puede procesar una gran variedad de materias primas de carácter biomásico para obtener una amplia gama de productos que incluyen biocombustibles, productos químicos y otros productos de valor añadido.

En este primer capítulo se presenta una visión general de la biomasa como fuente de energía, su definición, su origen, su clasificación, sus características como combustible y cómo la biomasa se puede pretratar para obtener biocombustibles sólidos que favorezcan el aprovechamiento energético de la misma.

### 1.1. DEFINICIÓN DE BIOMASA

Según el *Diccionario de la Real Academia Española* la biomasa es:

la materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía.

Según el *Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE)* del Ministerio para la Transición Ecológica la biomasa es:

el conjunto de la materia orgánica, de origen vegetal o animal, y los materiales que proceden de su transformación natural o artificial.

Según la *Agencia Andaluza de la Energía* de la Consejería de Empleo, Empresa y Comercio de la Junta de Andalucía la biomasa hace referencia a

cualquier fracción biodegradable de productos y residuos de origen biológico procedente de actividades agrarias y pesqueras (residuos agrícolas y ganaderos), de la silvicultura (residuos forestales), así como la fracción orgánica de los residuos industriales y municipales.

Según la *Especificación Técnica Europea CEN/TS 14588* la biomasa es:

todo material de origen biológico excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización y que puede ser utilizado como fuente de energía.

Según la *Directiva 2009/28/CE* del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, la biomasa se define como:

La fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales.

*Etimológicamente*, el término biomasa hace referencia a la «masa biológica» pues el prefijo «bio» (del griego bios) significa vida y la palabra «masa» (del latín massa) se refiere a la materia, peso, masa.

La definición general que se acepta en este manual y que se encuadra en el ámbito del aprovechamiento energético es:

Biomasa es la materia orgánica, de origen vegetal o animal, originada en un proceso biológico, espontáneo (natural) o provocado (artificial), utilizable como fuente de

energía renovable, entendiéndose como tal que se consume a un ritmo igual o inferior al que se produce.

La biomasa tiene una naturaleza muy heterogénea. Esto es, existen muchos tipos de biomasa que se puede considerar para fines energéticos. Básicamente, la biomasa más abundante es la biomasa lignocelulósica que está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. A continuación se presentan algunos residuos que pueden considerarse biomasa:

- Residuos de origen agrícola,
- Residuos de origen forestal,
- Residuos procedentes de la industria agroalimentaria y maderera,
- Residuos ganaderos,
- Residuos orgánicos generados por los núcleos urbanos.

Otro concepto muy extendido en el ámbito de la biomasa es la *bioenergía*. La bioenergía se define como la energía obtenida a partir de la biomasa sea del tipo que sea (eléctrica, térmica).

Del mismo modo se van a definir los *biocombustibles sólidos* como los combustibles sólidos, no fósiles, compuestos por materia orgánica, de origen vegetal o animal, originados a partir de la misma mediante procesos físicos y susceptibles de ser utilizados en aplicaciones energéticas.

Otro concepto de interés para este manual es el término *biocarburante*. Un biocarburante es un combustible que se puede utilizar en los motores de combustión presentes en los vehículos y, por tanto, apto para el transporte. La distinción con los carburantes convencionales es que se puede producir a partir de biomasa.

## 1.2. GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE BIOMASA

### 1.2.1. Introducción

Nuestra sociedad se caracteriza actualmente por unos consumos intensivos de energía, consumos que atienden a multitud de necesidades: el transporte, los procesos industriales de transformación, la producción y transformación de alimentos, la climatización de edificios, el alumbrado de viales, etc.

Para poder atender a todas estas necesidades energéticas se utilizan los almacenes de energía naturales y que son los que se denominan fuentes de energía primaria. Estas fuentes de energía primaria se pueden clasificar en dos grandes categorías. La primera categoría la constituyen las fuentes no renovables que son fuentes que han tardado grandes periodos de tiempo en producirse tales como el carbón, el petróleo, el gas natural o los materiales nucleares que se emplean actualmente en fisión. Estas reservas de energía que han tardado, en algunos casos, millones de años en producirse, se prevé que se consumirán en el transcurso de unos pocos siglos. Por el contrario,

hay otras fuentes de energía primaria que son susceptibles de regenerarse al mismo ritmo que se consumen y, por tanto, se pueden considerar inagotables. Éstas últimas son las que se denominan fuentes de energía renovables.

Las formas de energía renovable más populares son las que provienen del sol (energía solar) y del viento (energía eólica). Sin embargo, existen otras fuentes de energía renovable, como la energía de la biomasa, que presenta un alto potencial para abastecer la energía que se consume en el mundo.

La biomasa no es una fuente de energía nueva pues fue el primer recurso empleado por el hombre para calentar el hogar, cocinar, fabricar cerámica y metales y alimentar las máquinas de vapor en la época de la Revolución Industrial.

Sin embargo, a partir de la Revolución Industrial, las necesidades crecientes de energía promocionaron el uso del carbón y de los derivados del petróleo (fuentes energéticas con mayor poder calorífico) como materiales sustitutivos a la biomasa. Desde ese momento, el uso de la biomasa fue disminuyendo hasta mínimos históricos.

No obstante, hoy día, debido al carácter renovable y no contaminante de la biomasa y a su capacidad para generar empleo y activar la economía rural, la energía de la biomasa sigue jugando un papel apreciable como fuente de energía tanto en aplicaciones industriales como domésticas. De hecho, a nivel mundial, es la fuente de energía primaria renovable más empleada.

Al igual que otras fuentes de energía renovables, la biomasa se caracteriza principalmente por ser una fuente inagotable de energía, por su menor impacto ambiental (en comparación con los combustibles fósiles) y por su carácter de recurso autóctono. Sin embargo, la biomasa es la única energía renovable que no resulta gratuita ni instantánea en su fuente. Requiere de un ciclo productivo que dura meses o años (plantación, cultivo, recolección, tratamiento, transporte, distribución y conversión) pues la biomasa acumula la energía que se ha fijado durante el periodo de crecimiento de la planta y la energía se encuentra almacenada por lo que, por otra parte, no sufre tanto de las intermitencias del resto de fuentes renovables.

### 1.2.2. *La biomasa como alternativa energética*

La biomasa representa, en este momento, el capítulo más importante de producción energética con energías renovables y tiene unas expectativas interesantes en el abastecimiento energético de nuestro país.

La biomasa se puede utilizar para obtener energía de dos formas claramente diferenciadas. Una de ellas es la combustión directa que es la más antigua. Desde que el hombre descubrió el fuego está utilizando la biomasa para producir energía térmica. Una segunda forma de utilizar la biomasa es transformándola en biocombustibles que sean más fáciles de transportar, que tengan un mejor rendimiento, que ocupen menos volumen, etc. Estos biocombustibles pueden ser biocombustibles sólidos densificados, como son, por ejemplo, los pélets o las briquetas; biocombustibles líquidos, como es el bioetanol o el biodiésel y biocombustibles gaseosos, como el gas pobre o el biogás.