


Borja Velázquez Martí



TEXTOS ACADÉMICOS UNIVERSITARIOS

The background of the cover is a collage of biomass-related images. The top section shows a close-up of light-colored wood chips. The middle section features a dark, circular pattern resembling wood cross-sections. The bottom section shows a pile of dark, cylindrical biomass pellets. The text is overlaid on these images.

APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA PARA USO ENERGÉTICO

EDITORIAL REVERTÉ
ED | UPV



TEXTOS ACADÉMICOS UNIVERSITARIOS

Aprovechamiento de la biomasa para uso energético



TEXTOS ACADÉMICOS UNIVERSITARIOS

Aprovechamiento de la biomasa para uso energético

Borja Velázquez Martí



EDITORIAL
REVERTÉ

ED | UPV

Barcelona · Bogotá · Buenos Aires · Caracas · México

Serie *Textos Académicos Universitarios* ; 3

Autoría

© Borja Velázquez Martí

De la presente edición, 2018

© Editorial Reverté, S.A., 2018
ISBN: 978-84-291-4755-1

© Editorial Universitat Politècnica de València
ISBN: 978-84-9048-675-7

Distribución

Editorial Universitat Politècnica de València
Telf.: 963 877 012
www.lalibreria.upv.es
Ref.: 0609_63_02_01

Depósito legal: V-3115-2017

Imprime: Estugraf, sl

Queda prohibida la reproducción, distribución, comercialización, transformación, y en general, cualquier otra forma de explotación, por cualquier procedimiento, de todo o parte de los contenidos de esta obra sin autorización expresa y por escrito de sus autores.

Impreso en España

Prólogo

La BIOMASA, entendida como materia orgánica generada en los procesos biológicos, y al alcance del hombre, ha sido utilizada con fines energéticos desde el descubrimiento del fuego. Fue el *homo erectus*, un antecesor del *homo sapiens*, quien realizó ese trascendental descubrimiento hace cerca de un millón de años. El fuego le proporcionó y permitió luz para la vida nocturna y para las cavernas, calor para protegerse de bajas temperaturas, realizar la cocción de sus alimentos, recurso para la caza, defensa ante el ataque de las fieras y de los rivales. Una vez que nuestro ancestro obtuvo el dominio del fuego, comenzó su carrera desenfrenada hacia la humanización, tanto al perfeccionar la vida en comunidades, fortalecida al amparo del hogar y enriquecida con interacciones sociales, como por la influencia de una mejor dieta para el desarrollo y calidad de su organismo. Por tanto, es evidente la importancia que para el hombre ha tenido y tiene ese recurso energético primario, que es la biomasa.

Su hegemonía como fuente de energía ha cumplido centenares de miles de años. Después, ese dominio se va a ir compartiendo con otras fuentes de energía, que sucesivamente van descubriéndose. En orden cronológico por su aprovechamiento se sitúan básicamente, la energía hidráulica, la eólica, la fósil (carbón, petróleo y gas natural), la solar, la geotérmica y la nuclear.

Las energías hidráulica y eólica, llamadas renovables por no agotar sus fuentes, y consideradas limpias al minimizar el riesgo ambiental, son aprovechadas desde los primeros siglos de nuestra historia con las invenciones respectivas de la rueda hidráulica (noria) y el molino de viento. Pero a estas fuentes de energía les aparece la competencia de los combustibles fósiles: carbón, gas natural y petróleo. El alto valor energético de estos combustibles y las grandes cantidades existentes, ha llevado al hombre, una vez resueltas las técnicas de extracción, a su explotación desmesurada. Para el carbón, gran protagonista

de la revolución industrial y del desarrollo europeo del siglo XVIII, su extracción ha requerido la construcción de minas, ya obradas por los romanos y ampliamente extendidas al final de la edad media. Para el petróleo y el gas, hegemónicos como fuentes de energía en los siglos XIX y XX, su extracción se logra con la perforación de pozos a gran profundidad, tanto en zonas terrestres como marinas. Hoy día los combustibles fósiles suponen alrededor del 85 % del total de energías consumidas en el mundo.

El repaso de las principales fuentes de energía utilizadas por el hombre, debe incluir necesariamente la energía nuclear. Hoy día, su presencia se estima en el 4,5 % de la energía total consumida anualmente en el mundo (140.000 TW.h). El descubrimiento de la fisión nuclear del uranio y del torio en 1938 por el alemán Otto Han, cabe considerarlo como el comienzo de la carrera nuclear. La fisión de núcleos pesados es un proceso exotérmico, que libera cantidades sustanciales de energía, mucho mayores a la obtenida en las reacciones químicas convencionales. A esta enorme ventaja de carácter energético se le opone por un lado, las altas condiciones de seguridad exigibles en una central nuclear, y que nunca pueden garantizar la eliminación absoluta del riesgo, y por otro, la problemática de los residuos. En efecto, los productos resultantes de la fisión son generalmente altamente radiactivos y de larga vida. Su retirada y almacenamiento constituyen un riesgo permanente para toda la sociedad, actual y futura.

Ante los problemas que afectan al medio ambiente, y de modo singular el cambio climático, unido a los problemas económicos y de inseguridad que se han creado, por un lado, en el uso del carbón y petróleo y por otro, en el proceso de obtención, almacenamiento y destino de la energía nuclear, las energías renovables (hidráulica, biomasa, eólica, geotérmica y solar) toman un papel relevante, siquiera como alternativa parcial, exigiendo mayor atención de científicos, técnicos, economistas y políticos para lograr su implantación eficiente al servicio del desarrollo sostenible de nuestro tiempo. De hecho hay estudios que acreditan un incremento del consumo de energías renovables limpias a nivel mundial que ha pasado del 7% al 10% en los últimos diez años, a costa de una caída del 6% al 4,5% de la nuclear, junto a una reducción sensible del consumo de carbón mineral. Dentro del grupo de renovables, la bioenergía (aprovechamiento de la biomasa) avanza significativamente.

Se hace pues necesario que el conocimiento y difusión de los recursos y técnicas que aseguren el aprovechamiento y buena gestión de la biomasa con procesos eficientes y rentables, estén presentes en la literatura técnica. Y así queda justificada la oportunidad de la obra que tengo la satisfacción de prologar.

Esta obra ofrece una amplia visión del aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía renovable. Abarca desde su caracterización, cuantificación, recogida y transporte a los puntos de transformación y aprovechamiento, hasta el análisis de los diferentes procesos e instalaciones que puede ofrecer el campo energético: calderas, máquinas térmicas, gasificadores y biorreactores. También se incluye el estudio y aplicación para obtener biocombustibles sólidos (pélets, briquetas, carbón vegetal), líquidos (bioetanol y

biodiesel), y gases (biogás y syngas). Finalmente recoge una revisión sobre la producción de los principales cultivos energéticos oleaginosos.

A pesar de que, como se ha expuesto, la biomasa ha sido un recurso históricamente utilizado como fuente de energía, las enormes demandas que exigen las necesidades actuales requieren que el sistema de aprovechamiento se tecnifique, apareciendo una ciencia multidisciplinar, que es atendida en esta obra.

Los procesos de aprovechamiento de la biomasa a gran escala se han convertido en sistemas complejos, donde la técnica en los campos de la agricultura, mecánica, termodinámica, química, economía entre otros..., ofrecen herramientas donde técnicos y científicos deben basarse para garantizar la sostenibilidad en todos los niveles. En su conjunto, esta obra expone y resuelve las cuestiones de interés práctico que el aprovechamiento de la biomasa plantea, desde una perspectiva actual, moderna y tecnificada.

El profesor Borja Velázquez Martí, a quien conozco desde las etapas de formación de Grado y Posgrado, ha mostrado a lo largo de su trayectoria profesional una gran capacidad de trabajo, una probada ilusión y empeño en las tareas académicas y un propósito permanente por aprender y transmitir conocimiento.

Tras sus comienzos en el campo de la mecanización y tecnología agraria, donde a lo largo de cinco años aportó interesantes trabajos, como los relacionados con la aplicación de microondas para eliminación de malas hierbas y desinfección de suelos, accedió al conocimiento de los equipos y sistemas empleados en la producción, mantenimiento y explotación forestal, con una larga estancia en Alemania durante los años 2004 a 2006, en la Universidad Albert-Ludwig de Freiburg (Alemania), y posteriormente en la Universidad de Wageningen (Países Bajos) (2007).

Desde entonces, el concepto de biomasa como fuente de energía, va a ir ocupando un lugar preferente entre sus objetivos docentes y de investigación. Y así, esta obra es el resultado del estudio y la práctica, durante sus últimos diez años.

Varias tesis doctorales dirigidas por el autor se han centrado en la caracterización y cuantificación de la biomasa en el arco mediterráneo, principalmente leñosa, tanto agrícola como forestal. En el laboratorio de análisis de biomasa de origen vegetal de la Universitat Politècnica de València, diseñado y equipado por el profesor Velázquez, se ha desarrollado pues un importante trabajo de caracterización y determinación de propiedades físicas, químicas y energéticas, en muestras de diferentes especies vegetales (palmeras, plátano de sombra, moreras, acacias, entre otras).

También hay que destacar sus trabajos en la cuantificación de estructuras vegetales, factores de forma y de ocupación de especies arbustivas y evaluación de rodales arbustivos. Todo ello necesario para la toma de decisiones ante un plan de aprovechamiento de la biomasa en un determinado territorio.

A lo largo de los últimos siete años, con estancias prolongadas, ha vivido de cerca la situación de ciertos países latinoamericanos ante el reto del aprovechamiento energético de la biomasa. Destacan sus proyectos y realizaciones en Ecuador en conjunción con varias universidades de ese país.

Por otro lado, sus publicaciones científicas y técnicas han enriquecido la elaboración de material docente para sus alumnos en la UPV. Es una faceta que no descuida y por ello no nos sorprende que este libro ofrezca ejemplos y ejercicios prácticos, con supuestos de cálculo en buen número de sus temas. Incluso el desarrollo del temario no renuncia a la exposición de las bases conceptuales necesarias para la comprensión final de ciertos procesos termodinámicos, químicos, matemáticos, etc., presentes en la obra.

En definitiva, un libro completo, sobre un tema de gran interés que refleja una experiencia personal intensa en esa temática. Sea pues bienvenido para quienes desean formarse en el campo de la biomasa, quienes ejercen su trabajo en el aprovechamiento energético de la misma y para quienes deben tomar las decisiones políticas sobre planes energéticos.

Enhorabuena al profesor Borja Velázquez Martí, y mi deseo para que el libro cumpla el fin para el que ha sido escrito

Carlos Gracia López
Catedrático emérito de la Universitat Politècnica de València

Índice

CAPÍTULO I. LA BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE

1. Definición de biomasa y biocombustible	1
2. Fuentes de biomasa	3
3. Biomasa agrícola para uso energético	4
4. Biomasa forestal para uso energético	8
5. Conclusiones	19

CAPÍTULO II. TIPOS DE BIOCOMBUSTIBLES

1. Proceso de combustión	23
2. Tipos de biocombustibles	25

CAPÍTULO III. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA SÓLIDA

1. Masa y volumen	37
2. Distribución de tamaño de partícula	40
3. Humedad	41
4. Densidad	44
5. Poder calorífico	46
6. Análisis elemental	55

7. Análisis proximal.....	61
8. Análisis estructural	64
9. Inflamabilidad y combustibilidad	70
10. Análisis termogravimétrico.....	71
11. Durabilidad de los materiales densificados.....	74
12. Especificaciones de los biocombustibles	75
ANEXO 3.1. Normas de análisis para la caracterización de biomasa	81
ANEXO 3.2. Costes de análisis	83

CAPÍTULO IV. CUANTIFICACIÓN E INVENTARIACIÓN DE BIOMASA

1. Introducción.....	89
2. Cuantificación indirecta de la biomasa en estructuras vegetales	90
3. Cuantificación de biomasa forestal.....	96
4. Cuantificación de biomasa de árboles frutales.....	98
5. Cuantificación de biomasa arbustiva	102
6. Biomasa procedente de podas.....	108
7. Cuantificación de la biomasa ligada a la producción.....	112
8. Cuantificación de la biomasa energética obtenible de cultivos energéticos.....	116
9. Determinación de biomasa mediante teledetección	116

CAPÍTULO V. SISTEMAS DE COSECHA DE BIOMASA LEÑOSA

1. Introducción.....	141
2. Equipos para la adaptación de la biomasa leños para el transporte y posterior utilización	143
3. Cosecha de residuos de poda de frutales.....	162
4. Cosecha de biomasa forestal.....	169
5. Sistemas de desbroce, limpieza de monte bajo	183
6. Sistemas de cosecha de residuos herbáceos agrícolas.....	183

CAPÍTULO VI. EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE COSECHA

1. Evaluación técnica de una máquina.....	188
2. Definición del ciclo de trabajo y evaluación de las máquinas más usadas en el aprovechamiento de biomasa	194
3. Parámetros en la organización de varias máquinas trabajando conjuntamente.....	209
4. Evaluación económica de una máquina	211
5. Parámetros para evaluación de viabilidad de proyectos de aprovechamiento de biomasa	216

CAPÍTULO VII. MODELOS LOGÍSTICOS PARA ABASTECIMIENTO DE BIOMASA

1. Introducción	227
2. Selección de fuentes de aprovisionamiento. Modelos de programación lineal	228
3. Análisis de redes de transporte (determinación de la ruta más corta).....	238
4. Determinación de rutas cíclicas. Problema del viajero.....	242
5. Técnicas de programación y control de proyectos	246
6. Problemas de localización. <i>Borvemar model</i>	254
7. Teoría de colas	288

CAPÍTULO VIII. GENERACIÓN DE POTENCIA-CICLOS DE VAPOR

1. Introducción	301
2. Balances de materia y energía. Primer principio de la termodinámica.....	301
3. Análisis de la transferencia de energía en sistemas abiertos	309
4. Análisis de elementos de circuitos termodinámicos.....	312
5. Propiedades de las sustancias simples compresibles-relación P-V-T.....	316
6. Instalaciones de potencia de vapor: Ciclo de Rankine	319
7. Ciclo de Rankine con recalentamiento	330
8. Ciclo regenerativo de potencia: calentador abierto y cerrado.....	341
9. Ciclo binario y cogeneración.....	357
ANEXO 8.1. Tablas propiedades termodinámicas del agua	377

CAPÍTULO IX. INSTALACIONES TÉRMICAS

1. Definición de caldera	389
2. Funcionamiento de la caldera de combustibles sólidos.....	389
3. Elementos de la instalación de la caldera	393
4. Funcionamiento calderas de combustibles líquidos y gaseosos	396
5. Especificaciones técnicas de las calderas y datos en el proyecto	398
6. Determinación de la potencia de las calderas en edificios.....	400
7. Necesidades de aire en la caldera	416
8. Rendimiento y control de la combustión.....	417
9. Aplicación para transmisión de calor por convección por paredes cilíndricas	421
10. Instalaciones térmicas industriales	424
11. Sistemas no estacionarios.....	442

CAPÍTULO X. PIRÓLISIS, GASIFICACIÓN Y CARBONIZACIÓN

1. Fundamentos del proceso.....	451
2. Proceso de descomposición	453
3. Diseño del sistema de gasificación	456
4. Tipos de gasificadores	458
5. Condiciones de operación.....	462
6. Depuración del <i>syngas</i>	462
7. Motores de gas y turbinas de gas	467
8. Dimensionado de la instalación	473
9. Proceso Fisher-Tropsch	477
10. Carbonización.....	479

CAPÍTULO XI. DISEÑO DE BIORREACTORES

1. Fundamento del funcionamiento del biorreactor	484
2. Tipos de biorreactores.....	487
3. Cálculo de flujos y tiempos de retención	489
4. Reactores en serie	508
5. Determinación de los parámetros cinéticos de una cepa.....	519
6. Bombas y conexiones	529
7. Diseño sistema de aireación.....	533
8. Dimensionado mecánico del biorreactor.....	548
9. Control térmico en el biorreactor	563
10. Sistemas de esterilización del reactor	572
11. Diseño del sistema de desinfección con vapor del medio de cultivo	576
12. Desinfección del aire de alimentación	582
13. Control de pH y espuma	584
14. Sensores asociados al biorreactor	588
15. Control de espuma	592
16. Automatización.....	593

CAPÍTULO XII. TECNOLOGÍA DEL BIOETANOL

1. Introducción.....	599
2. Características generales del bioetanol	601
3. Procesos de obtención de bioetanol	602
4. Procesos de obtención de almidón a partir de cereales	603
5. Procesos de obtención de etanol a partir de biomasa lignocelulósica.....	609

6. Fermentación del azúcar.....	620
7. Destilación del etanol.....	621
8. Compuestos tóxicos para la fermentación generados en los pretratamientos e hidrólisis.....	622
9. Métodos para el aumento de la fermentabilidad de los hidrolizados pretratados.....	624
10. Perspectivas de futuro para la comercialización del etanol a partir de lignocelulosa.....	626
11. Bioetanol como combustible.....	626
12. Etanol como aditivo en las gasolinas.....	629
13. Etanol como aditivo en el gasóleo.....	629

CAPÍTULO XIII. FERMENTACIÓN ANAEROBIA- BIOGÁS

1. Introducción.....	631
2. Proceso de producción de biogás.....	636
3. Parámetros operativos de control.....	641
4. Cinética del proceso fermentativo.....	646
5. Digestores.....	649
6. Adecuación del biogás.....	654
7. Gestión de residuos.....	655
8. Dimensionado de las instalaciones.....	659

CAPÍTULO XIV. TECNOLOGÍA DEL BIODIESEL

1. Introducción.....	663
2. Análisis de la transformación de grano a aceite.....	667
3. Fase de pretratamiento. Refinado del aceite.....	681
4. Reacciones de transesterificación de triglicéridos.....	689
5. Fase de purificación de la glicerina.....	693
6. Especificaciones de calidad del biodiésel.....	696
7. Dimensionado de las instalaciones.....	698
8. Aplicaciones del biodiésel.....	701
9. Aplicaciones de la glicerina y su problemática.....	702

CAPÍTULO XV. CULTIVOS ENERGÉTICOS OLEAGINOSOS

1. Introducción.....	705
2. Estudio del girasol (<i>Helianthus annuus</i>).....	705
3. Estudio de la colza (<i>Brassica Napus Oleífera</i>).....	722

4. Estudio de la soja (<i>Glycine max</i> L.).....	736
5. Estudio de la palma africana (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq).....	749
6. Estudio de la jatrofa (<i>Jatropha curcas</i> L.).....	770
ANEXO 15.1. Evaluación de la maquinaria	786
ANEXO 15.2. Recopilación de costes unitarios	797
ANEXO 15.3. Recopilación de análisis económico del cultivo del girasol (<i>Helianthus annus</i>).....	798
ANEXO 15.4. Recopilación de análisis económico del cultivo de la colza (<i>Brassica Napus Oleifera</i>).....	804
ANEXO 15.5. Recopilación de análisis económico del cultivo de la soja (<i>Glycine max</i> L.)	810
ANEXO 15.6. Recopilación de análisis económico del cultivo de la palma africana (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq)	815
ANEXO 15.7. Recopilación de análisis económico del cultivo de la jatrofa (<i>Jatropha curcas</i> L.)	824

Simbología

A	Sección o área
A_d	Porcentaje de masa de cenizas en la muestra seca
c	Velocidad
C	Fuerza cortante
$(C)_d$	Porcentaje de masa de carbono en la muestra seca
$(Cl)_d$	Porcentaje de masa de cloro en la muestra seca
C_p	Calor específico a presión constante
C_e	Capacidad calorífica
d	Diámetro
D_c	Diámetro de copa
D_t	Diámetro de tronco
DAP	Diámetro a altura del pecho
e	Espesor
E	Energía
FC	Porcentaje de carbono fijo
J	Momento de inercia polar
k	Conductividad térmica del fluido
K_g	Coefficiente global de transmisión de calor
K_h	Constante de Henry
F	Caudal, Flujo volumétrico
F	Fuerza (en mecánica)
h	Entalpía específica
h_p	Coefficiente de película
H	Entalpía

H	Altura (en dendrometría)
H	Altura
$(H)_d$	Porcentaje de masa de hidrógeno en la muestra seca
I	Momento de inercia
λ	Exceso de aire
L	Longitud
μ	Viscosidad dinámica
μ	Tasa de crecimiento celular
η	Rendimiento energético
\dot{m}	Flujo másico
m_C	Masa de carbono
m_H	Masa de hidrógeno
m_N	Masa de nitrógeno
m_S	Masa de azufre
m_O	Masa de oxígeno
N	Velocidad de giro en rev/min
n_c	Número de cilindros en el motor
n_e	Número de moles necesario para combustión completa
n_w	Revoluciones por segundo a las que gira el motor
$(N)_d$	Porcentaje de masa de nitrógeno en la muestra seca
Nu	Número de Nusselt
P	Presión
P	Concentración de producto (en biorreactores)
PCS	Poder calorífico superior. Poder calorífico bruto a volumen constante
PCS_d	Poder calorífico superior del material seco, sin humedad
PCS_m	Poder calorífico superior del material a una determinada humedad
PCI	Poder calorífico inferior. Poder calorífico neto a volumen constante
PCN	Poder calorífico neto a presión constante
Pr	Número de Prandtl
R	Constante universal de los gases
Re	Número de Reynolds
ρ	Densidad
ρ_r	Densidad real
$(\rho)_\omega$	Densidad a humedad ω
$(\rho)_d$	Densidad de material seco
S	Entropía
S	Concentración de sustrato en biorreactores
$(S)_d$	Porcentaje de masa de azufre en la muestra seca
σ	Tensión normal
Q	Calor

\dot{Q}_c	Potencia de la caldera
\dot{Q}_s	Potencia disipada condensador
t	Tiempo
T	Temperatura
T	Momento torsor (en mecánica)
τ	Tensión tangencial
TR	Tiempo de retención
V	Volumen
VM_d	Porcentaje de masa de volátiles en la muestra seca
V_c	Volumen del cilindro
W	Trabajo
\dot{W}_b	Potencia bomba
\dot{W}_t	Potencia turbina
u	Energía interna específica
U	Energía interna
v	Volumen específico
ω_d	Porcentaje de humedad en base seca
ω_h	Porcentaje de humedad en base húmeda
x	Título en mezclas líquido-gas
X	Concentración celular

Capítulo I

La biomasa como fuente de energía renovable

1.1. Definición de biomasa y biocombustible

Se denominan energías renovables a fuentes de energía inagotables y respetuosas con el medio ambiente. Este tipo de energías podrían solucionar muchos de los problemas ambientales y económicos que supone el actual uso del resto de las fuentes de energía, como la contaminación atmosférica, los residuos radiactivos, liberación de gases que propician la destrucción de la capa de ozono e incrementan el efecto invernadero, y a su vez, frenar la dependencia de las importaciones energéticas de fuentes agotables, dado que las fuentes de energía renovables son accesibles en cualquier zona del mundo. Las energías renovables se pueden clasificar en cinco grupos:

- Energía hidráulica
- Energía eólica
- Energía geotérmica
- Energía solar
- Biomasa

Se denomina *biomasa* a la materia orgánica no fosilizada, ya sea originada en un proceso biológico espontáneo o provocado. En términos generales, esta materia tiene múltiples usos y utilidades para los hombres, pues constituye la base de nuestra alimentación y es materia prima para gran número de industrias, tal como la farmacéutica, cosmética, textil, maderera, papelera o ciertos elementos de la construcción. Asimismo, la biomasa puede suponer una fuente de energía, pues se puede transformar en sustancias combustibles denominadas biocombustibles. Es importante diferenciar estos dos

términos pues en numerosos contextos se confunden creyendo que son sinónimos, cuando no lo son. Los biocombustibles son productos finales comercializables en el mercado energético obtenidos de la transformación física, química o microbiológica de la biomasa, que es su materia prima. Es decir, los biocombustibles son directamente utilizables en procesos de combustión obteniendo calor. Ese calor podrá ser utilizado directamente o ser transformado en otros tipos de energía, principalmente mecánica o eléctrica.

Teniendo en cuenta la rápida regeneración de los sistemas productores de biomasa, puede considerarse ésta como una fuente de energía renovable, por ser inagotable. Por otra parte, los residuos de la fabricación de biocombustibles a partir de biomasa, junto sus emisiones en la combustión, presenta contaminaciones menores a las derivadas de la fabricación y uso de los combustibles procedentes del petróleo o carbón, por ello se considera que es una fuente de energía más limpia. No obstante, hay que advertir que los residuos de la fabricación de biocombustibles no son inexistentes, más aún, presentan problemáticas relevantes en muchas ocasiones.

Cambio climático

Cuando la radiación emitida por el Sol incide sobre la corteza terrestre, parte de la energía se absorbe, calentando la misma, y parte se refleja. El calor generado en el suelo por la absorción de la energía incidente aumenta la temperatura del aire por convección. De la fracción reflejada parte se libera hacia el espacio exterior cuando pasa la troposfera, y otra parte rebota, volviendo a direccionarse hacia la tierra, aumentando la radiación incidente. La presencia de CO₂ en la atmósfera hace que la fracción reflejada al espacio exterior sea menor, incrementando la radiación sobre la corteza, y en consecuencia la temperatura del suelo y aire. Esto es lo que se denomina *Efecto Invernadero*. El efecto invernadero provocado por el CO₂ es algo necesario para mantener la temperatura del planeta en unos niveles cómodos para la vida humana en la Tierra. Pero un exceso de este componente gaseoso en la atmósfera provoca que la reflexión troposférica sea mayor a la adecuada, siendo la energía incidente sobre la corteza muy grande, y con ello la temperatura del suelo, agua y aire. Las variaciones de temperatura del suelo, agua oceánica y aire provocan alteraciones impredecibles en el clima, al cambiar la dirección de los vientos, corrientes marinas, etc. Se supone que la concentración de CO₂ en la atmósfera hasta el siglo XX, oscilaba alrededor de los 280 ppm (cm³/m³), y en la actualidad hemos alcanzado los 390 ppm.

La fuente de energía primaria en la producción de biomasa es la energía solar, que permite la construcción de materia orgánica vegetal por la captación de carbono de la atmósfera a través de la fotosíntesis. La absorción de carbono en los tejidos vegetales primero, y posteriormente en los animales que consumen los mismos, permite calificar a la biomasa como sumidero del carbono atmosférico. La absorción de CO₂ ayuda a paliar el exceso de efecto invernadero.

1.2. Fuentes de biomasa

Es indudable la existencia de numerosas fuentes de biomasa y tipos, derivados de la diversidad de sistemas de producción agrícola, sistemas forestales y sistemas marinos. Una propuesta de clasificación de las fuentes más relevantes para obtener biomasa para uso energético se muestra en la Tabla 1.1. Podemos diferenciar dos grandes grupos: por un lado la biomasa procedente de plantaciones energéticas, por otro la biomasa procedente de residuos o restos de actividades humanas.

Se denomina plantaciones energéticas a aquellas plantaciones que desde su concepción tienen el objetivo principal de obtener materia prima que se va a transformar en biocombustibles.

Las plantaciones energéticas se caracterizan por cultivar especies de crecimiento rápido. Cabe distinguir las plantaciones energéticas para la producción de materiales lignocelulósicos, destinados mayoritariamente a la combustión o gasificación, y los cultivos cuyo objetivo es la producción de semillas o granos, como son el cultivo de oleaginosas para la obtención de aceite que se transformará en biodiesel, o el cultivo de cereales para la obtención de almidón destinado a la producción de etanol. El destino de los materiales lignocelulósicos es mayoritariamente la producción de biocombustibles sólidos, tanto de especies típicamente forestales como chopos, sauces, eucaliptos, robinas y acacias, como de cultivos agrícolas como el cardo y el miscanto, aunque pueden ser sometidos a procesos de hidrólisis de la celulosa y hemicelulosa para la producción de azúcares, y de éstos obtener bioetanol.

Los restos y residuos biomásicos se producen en procesos de producción y transformación de otros productos principales, tanto para la alimentación (agricultura e industria agroalimentaria) como para uso industrial (madera, papel, tejidos, sustancias químicas, etc.). Se consideran residuos biomásicos a materiales que ya no son aprovechables económicamente para ningún destino diferente que su utilización como fuente de energía. Se consideran restos biomásicos a materiales que podrían reutilizarse para la elaboración de otros subproductos; como por ejemplo, tableros de virutas orientadas, tableros de fibra, conglomerados, etc. El uso de los restos para la producción de biocombustibles supone un planteamiento ambiental inadecuado dado que el CO₂ fijado en los procesos biológicos de producción agrícola y forestal debería ser devuelto a la atmósfera lo más tarde posible en la cadena productiva para que perduren lo máximo como sumidero. Un adecuado planteamiento ambiental consistiría en prolongar lo máximo posible la utilización de la biomasa, empleando tan sólo residuos finales para la generación de energía. Sin embargo cabe puntualizar que esto debe ser analizado desde el punto de vista económico en cada caso, puesto que los restos pueden tener una mejor situación, por ser de más fácil gestión.

Tabla 1.1. Fuentes de origen de la biomasa con destino energético

Cultivos energéticos	Herbáceos	Cardo, sorgo, miscanto, girasol, soja, maíz, trigo, cebada remolacha, especies C4 agrícolas.
	Leñosos	Chopos, sauces, eucaliptos, robinas, acacias, y especies C4 forestales.
Restos y residuos	Restos de cultivos agrícolas	Herbáceos Paja, restos de cereales, restos de cultivos hortícolas
		Leñosos Poda o eliminación de plantaciones de frutales de hueso y pepita, olivo, vid, cítricos, etc.
	Restos de operaciones silvícolas	Cortas finales, podas, claras, clareos, apertura de vías y pistas forestales, limpieza de monte para prevención de incendios, catástrofes forestales (incendios)
	Restos de las industrias agroalimentarias	Piel de frutos (cítricos), cáscaras (almendra, cacahuete...), huesos (aceituna), pulpa en industrias de zumo, etc..
	Restos de industrias forestales	Serrines y virutas, polvo de lijado, corteza, tacos y recortes
	Restos de las explotaciones ganaderas	Purines, cama animal, animales fallecidos
	Productos o restos marinos	Algas, conchas, etc.
	Actividades humanas	Residuos alimenticios, papel, otros residuos industriales

1.3. Biomasa agrícola para uso energético

Es indudable el protagonismo que posee la agricultura como sistema de producción de productos biomásicos susceptibles de ser transformados en biocombustibles. La valorización de estos productos puede ser un complemento de la renta agraria, dado que supondría un ingreso adicional al percibido por la comercialización de alimentos. Tres aspectos son los que se deben considerar en la promoción de los biocombustibles agrícolas: primero, la oportunidad que ofrecen para paliar la problemática energética, por la necesidad de reducir la dependencia del carbón y del petróleo; el segundo, el beneficio mediomambiental, por la necesidad de reducir las emisiones de CO₂ que provocan el efecto invernadero y el sobrecalentamiento del planeta; y tercero, la

necesidad que tiene la agricultura y el mundo rural en ciertos países por ser competitivo en una economía globalizada. Los dos primeros aspectos, energético y medioambiental, son problemáticas globales de todo el planeta, y probablemente serán resueltos con el esfuerzo internacional. Ahora bien, el tercer aspecto, la baja rentabilidad de la agricultura en ciertas regiones, es un problema localizado, y por tanto su solución dependerá de las soluciones locales y política regional. La producción de materias primas para biocombustibles supone una oportunidad para la agricultura local.

La baja rentabilidad de la agricultura en ciertas zonas viene provocada por diversas causas. Primero, generalmente existe una mala estructura de la propiedad, esto provoca que la escala económica de las empresas agrarias sea pequeña porque los volúmenes de productos comercializados son también bajos; por otra parte, la existencia de parcelas de extensión muy reducida evita el desarrollo de la mecanización y la aplicación de tecnología apropiada. Segundo, los costes de insumos como semillas, fertilizantes, plaguicidas y mando de obra pueden resultar muy elevados, mientras que existen bajos precios de mercado de los productos, dado que suele estar saturado o monopolizado, proporcionando un margen de beneficio muy pequeño. Por último, la climatología en ciertas zonas puede ser adversa, existiendo periodos prolongados de sequía, o periodos prolongados de mucho frío.

La necesidad de biocarburantes, como sustituyentes de los derivados del petróleo hace pensar que los cultivos energéticos oleaginosos y ricos en hidratos de carbono sufrirán una proliferación en todo el mundo, llegando a globalizarse su comercialización tal como ocurre en el sistema agroalimentario. De los primeros se obtendrá biodiesel, de los segundos bioetanol. La pregunta que suscita la promoción de estos cultivos energéticos en zonas donde la agricultura alimentaria no es rentable es la siguiente: cuando el mercado de biomasa para biocombustibles esté generalizado y globalizado, ¿los cultivos energéticos agrícolas serán competitivos en las zonas donde la agricultura convencional alimentaria no lo es, teniendo éstos los mismos condicionantes que los cultivos alimentarios?

Por ejemplo, el rendimiento medio de la colza para la producción de biodiesel en el norte de España es de 1,70 t/ha según el Anuario de Estadística Agraria 2010, cuando la media de la Unión Europea es de 4,2 t/ha; o el girasol en España tiene un rendimiento medio de 0.9 t/ha en secano y 2 t/ha en regadío, pero en Argentina está cerca de los 2,3 t/ha. Por otra parte, cultivos tropicales oleaginosos que no pueden ser cultivados en Europa como la palma aceitera o la jatrofa curcas poseen rendimientos de 15 t/ha y 11,5 t/ha respectivamente, siendo los costes de producción 1/3 respecto a los cultivos europeos y la tasa de aceite en la semilla para producir biodiesel es muy similar en todos estos cultivos, un 32% aproximadamente. Probablemente los países con mejor rendimiento (t/ha) y producción más económica albergarán también la industria de transformación para producción de biodiesel o bioetanol. Ante esto, habría que diferenciar dos tipos de biocombustibles, primero los líquidos que proceden de aceites y azúcares, obtenidos de semillas oleaginosas y amiláceas respectivamente, y segundo, los

biocombustibles sólidos procedentes de residuos, de los cuales hay una amplia gama. Los biocombustibles líquidos son fácilmente trasportables, al igual que se hace con el petróleo; pero el transporte de la biomasa procedente de residuos, generalmente sólidos, no es tan apta para el transporte, y ello hace que su gestión deba realizarse en la misma zona geográfica donde se producen. En este sentido, por los condicionantes anteriormente expuestos, cuando la agricultura no sea competitiva como fuente de materia prima de biocarburantes (biodiesel y bioetanol) es necesario potenciar la gestión de residuos o los biocombustibles sólidos, aún procediendo de plantaciones energéticas para incentivar el desarrollo económico en esa zona, complementando la actividad de producción alimentaria, dado que estos biocombustibles son difícilmente importables. Entonces esa región será dependiente de la importación de biocarburantes pero más independiente de biocombustibles sólidos para obtener calor por combustión, gas de síntesis o electricidad con sistemas de cogeneración. Esto no significa que la política de potenciación de la industria de transformación de biomasa para producción de biodiesel o bioetanol en un determinado territorio no sea adecuada para ocupar una posición ventajosa en el mercado, y ganar independencia energética; sólo que en el análisis de viabilidad habría que contemplar las anteriores consideraciones.

En este sentido, en zonas donde la viabilidad de la agricultura está comprometida es necesario potenciar la gestión de residuos de la agricultura para lo cual es necesario tener un conocimiento amplio de la cantidad y tipo de residuos generados, junto su aptitud e implicaciones para sus transformaciones en biocombustibles. Una gran cantidad de biomasa residual con posible uso energético puede ser extraída de la gestión de la agricultura, especialmente en operaciones de poda, renovación de plantaciones, restos de cosecha y residuos del procesamiento de productos. Actualmente estos residuos son amontonados y eliminados por quema o trituración en campo no consiguiendo ningún beneficio directo, más bien un coste en estas operaciones. La utilización de esta biomasa adicional de la agricultura como fuente de energía podría rentabilizar las operaciones de mantenimiento dentro de una gestión sostenible, y conseguir ingresos adicionales para los agricultores, que además de comercializar sus cosechas, pueden obtener ingresos complementarios por los residuos generados en las explotaciones agrarias.

Influencia de la bioenergía en el mercado alimentario

En distintos foros se discute la influencia que tiene el empleo de superficie cultivable para la obtención de biomasa para uso energético en los precios de los alimentos tanto humanos como para la ganadería. Por ejemplo, la producción de maíz para la obtención de almidón, y de él bioetanol, ha provocado un aumento del precio de este producto, y son conocidas las quejas de los ganaderos, que ven limitada su capacidad de compra y la rentabilidad de las explotaciones. Un análisis adecuado del sistema es difícil, pero se hace necesario. Indudablemente el empresario agrario desea obtener el máximo beneficio y venderá el maíz a aquel sector cuyas exigencias de calidad pueda conseguir al menor coste y le dé por su producto el precio más alto, maximizando así el margen de

beneficio. El aumento de la demanda de biocombustibles provoca que la influencia sea prácticamente inevitable. Pero nos encontramos con una paradoja, en muchas zonas del mundo, algunas de ellas en Europa, la agricultura posee baja rentabilidad, atribuida a unos elevados costes en los insumos necesarios (mano de obra, combustible, fertilizantes y plaguicidas) y a unos bajos precios de los alimentos. La producción de biomasa para biocombustibles debería mejorar esta situación. Una propuesta razonable sería diferenciar zonas donde la producción de alimentos es rentable de zonas donde la producción de alimentos no es rentable. En las zonas donde no es rentable la producción de alimentos se tiende a abandonar esta actividad, produciéndose despoblamiento rural y otros problemas de carácter ambiental, como la desertización. Entonces la potenciación de plantaciones energéticas puede ser una oportunidad. Esto significa que mediante una planificación adecuada, es decir, una ordenación del territorio desde el punto de vista legal, se debería limitar la producción de biocombustibles en zonas de alta rentabilidad en productos alimentarios, y potenciar las plantaciones energéticas en zonas donde ésta no es rentable. Encontrar el equilibrio entre la demanda y oferta, para que los precios tanto de alimentos como biocombustibles sean asequibles y cubriesen las necesidades es difícil. Pero es indudable que la subida de precio de los alimentos puede ser paliada en zonas del tercer mundo si sube su renta por la comercialización de combustibles, dado que pueden comprarlos más fácilmente.

Varios proyectos de investigación muy interesantes han intentado predecir los efectos de la globalización de la agricultura energética, es decir, predecir sus impactos antes de que se produzcan. Estos pueden ser positivos, negativos o neutros. Uno de los impactos puede ser la interferencia de los mercados energético y alimentario (negativo o positivo). ¿Podría darse el caso de que los precios de los alimentos subiesen y el precio de los combustibles también? ¿Cuánta superficie es necesaria en plantaciones energéticas para cubrir las necesidades mundiales actualmente abastecidas por el uso del petróleo o carbón?

Pongamos como ejemplo de análisis España. Según el Instituto Nacional de Estadística (INE), España tuvo un consumo de gasóleo en 2006 de 30 millones de toneladas aunque en 2012 descendió hasta 25 millones de toneladas. Un biocombustible sustitutivo del gasóleo es el biodiésel que se obtiene de la transesterificación de los triglicéridos del aceite. El aceite para la obtención de biodiésel en España proviene de las plantaciones de girasol y colza, las cuales tienen un rendimiento medio de 1,5 t de semillas por hectárea. El contenido de aceite habitualmente extraído de estas semillas es el 30%, por lo que se obtiene una tasa de 0,45 t de aceite por hectárea. A partir de estas cifras se puede calcular la superficie requerida en cultivos oleaginosos para cubrir las necesidades de gasóleo, es decir 66,66 millones de hectáreas. La superficie agrícola en España según el censo agrario del 2011 es de 17,22 millones de hectáreas, de las cuales está utilizada 14,5 millones de hectáreas. Fácilmente se deduce que es inviable cubrir las necesidades españolas de gasóleo con biodiésel proveniente sólo de cultivos oleaginosos del propio país. Esto significa que el exceso de demanda va a provocar el aumento de precio.

Otro ejemplo puede ser Ecuador, con un consumo de 4 millones de toneladas anuales de gasóleo según el Banco Central del Ecuador (Balance Energético Nacional, 2013), 7,3 millones de hectáreas de labor agrícolas de las que hay que restar tierras de pastos, por lo que sólo tiene disponible 2,4 millones de hectáreas destinadas a cultivos permanentes o transitorios. Los cultivos potenciales para obtener aceite para biodiesel en Ecuador son la palma africana y la jatrofa curcas, con un rendimiento medio de 12 t semillas/hectárea, que equivalen a 4 t de aceite/hectárea. Esto significa que para cubrir las necesidades de gasóleo del país deben cultivarse 1 millón de hectáreas, el 41% de la superficie destinada a cultivos permanentes y transitorios. Esto parece más viable, pero, ¿Cómo influirá esto en los alimentos? Además, si la demanda mundial es elevada, ¿no exportará a otros países como España?

Tanto la alimentación como la energía son necesidades primarias del ser humano. Como se ha demostrado los recursos del planeta son escasos, y las necesidades primarias elevadas. Si comparten los medios de producción no es posible predecir de modo rápido la influencia en los sistemas económicos.

1.4. Biomasa forestal para uso energético

Generalmente la extracción de biomasa de los montes se denomina aprovechamiento forestal. El principal producto extraído en el aprovechamiento forestal es biomasa destinada a la industria de primera transformación (biomasa maderable, corcho, resinas, esparto u otros), pero en la extracción existe una fracción tradicionalmente no utilizada por la industria denominada residuos forestales. Este material está compuesto por ramas, despuntes, hojas y acículas. Hasta hace poco, en la mayor parte de los casos el material residual quedaba disperso por la zona de corta. El abandono de estos materiales en la superficie del monte supone un alto impacto ambiental. Esto es debido a que el elevado volumen de biomasa sobrante tiene una lenta descomposición, permaneciendo largo tiempo en el lugar. En la época calurosa estos residuos sufren un secado suponiendo posteriormente focos con alto riesgo de incendio. Por otra parte ejerce un impacto paisajístico visual. Además, puede suponer una fuente de parásitos y plagas. Existen varias posibilidades para la eliminación de estos residuos, una opción es la quema controlada o el amontonamiento; otra posibilidad es la trituración o el astillado abandonándose en el monte para favorecer la rápida incorporación al suelo. En algunas ocasiones, generalmente cuando se realiza una regeneración artificial, se realiza un desbroce o trituración in situ con el fin de facilitar las labores de plantación.

El correcto manejo de las masas forestales obliga a realizar podas, claros y claras, operaciones silvícolas a veces no rentables económicamente. El aprovechamiento energético de los residuos forestales originados en estas labores puede rentabilizar estas tareas. El aprovechamiento de estos residuos requiere optimizar los procesos de extracción, transporte, selección y transformación. El concepto debe ser económicamente atractivo, ecológicamente sostenible y aceptado por la sociedad. Esto significa que el

aprovechamiento energético de los residuos forestales debe quedar supeditado al correcto manejo de las masas forestales. Un incorrecto planteamiento de las operaciones forestales corre el riesgo de realizar un sistema de producción no sostenible.

En el caso de la extracción de biomasa forestal para uso energético debemos diferenciar distintas situaciones.

- Aprovechamientos forestales convencionales
- Limpieza de monte bajo
- Infraestructuras forestales
- Recogida de restos de catástrofes (incendios)
- Plantaciones energéticas
- Biomasa de las industrias forestales

Aprovechamiento forestal convencional

En los aprovechamientos convencionales el objetivo principal es la extracción de madera para la industria. Existen varios tipos de aprovechamiento:

a) Sistemas discontinuos de aprovechamiento: son aquellos sistemas en los que se cortan todos los árboles al mismo tiempo al final del turno. Es decir, después del número de años planificado que transcurre entre la formación o regeneración de la masa arbórea y el momento de su corta final. Este tipo de sistemas se denomina *cortas a hecho* o “*clear-cut*”.

El fuste del árbol es la parte maderable que será serrada en listones de diferentes dimensiones según las necesidades industriales de la empresa receptora. Estos listones después serán unidos formando tableros macizos. Por ello la verticalidad del árbol y su diámetro permitirá una mejor utilización de su madera. Los árboles suelen tener una forma conoidal. La disminución del diámetro con la altura debe ser la menor posible dado que el diámetro menor limita la amplitud de los listones serrados. Por otra parte las ramas son las causantes de nudos en los listones, que suponen por un lado un punto susceptible de deterioro y fragilidad frente a tensiones mecánicas, por otro lado, a veces son considerados poco estéticos en la madera.

En este tipo de aprovechamientos la biomasa de cada árbol que va a destino energético la componen:

- 1º) Despuntes: parte superior de la copa que corresponde a la parte más fina con gran ramosidad de diámetros pequeños.
- 2º) Ramas procedentes del procesado. Al derribo del árbol le sigue el desramado, medición de las diferentes piezas en las que será dividido el fuste y troceado. Las ramas del fuste pueden suponer el 50% de la biomasa residual disponible para usos energéticos.

La longitud y número de divisiones que se realicen en el árbol dependerá de los intereses comerciales o energéticos. En función de éstos, la cantidad de biomasa residual variará. En Centroeuropa se están estudiando dos tipos de sistemas de utilización del árbol. Ambos sistemas son mostrados en la Figura 1.1.

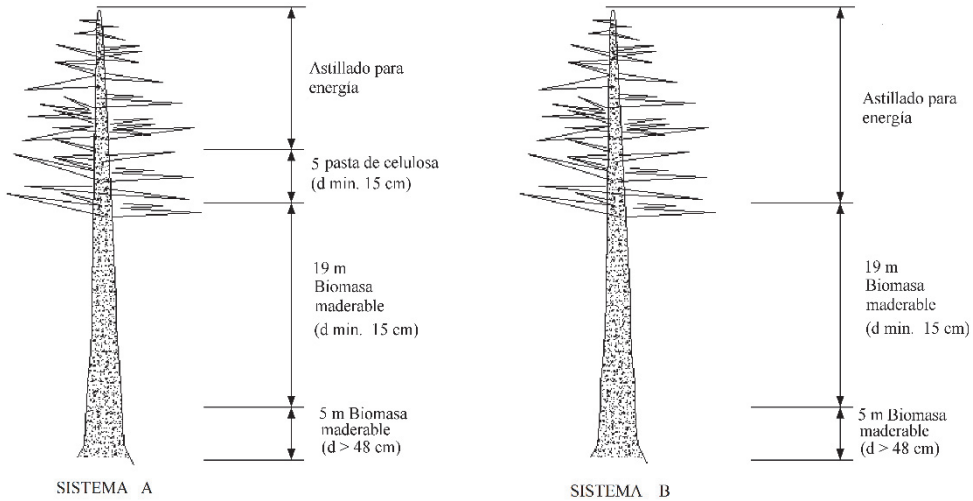


Figura 1.1. Sistemas de utilización del árbol

En el sistema A la biomasa de cada árbol es dividida en 4 partes:

- Primeros 5 m, cuando el tronco tiene un diámetro mayor a 48 cm. Ésta es la parte de mejor calidad, sin presencia de ramas, utilizada para tablero noble, carpintería e industria del mueble.
- Siguiendo parte del tronco con una longitud máxima de 19 m si el diámetro menor supera los 15 cm. Esta parte es destinada a la industria maderera para la producción de fibras, productos para la construcción, etc.
- Siguiendo parte del tronco con una longitud máxima de 5 m si el diámetro menor supera los 15 cm. Esta parte es destinada a pasta de celulosa
- Los despuntes y las ramas más gruesas suponen la biomasa residual con destino energético.

En el sistema B la biomasa de cada árbol era dividida en 3 partes:

- Primeros 5 m, cuando el tronco tiene un diámetro mayor a 48 cm, con el mismo destino que en el caso anterior.
- Siguiendo parte del tronco con una longitud máxima de 19 m si el diámetro menor supera los 15 cm. Esta parte es destinada a la industria maderera.

- El resto es destinado a uso energético, con el consiguiente aumento de biomasa destinada a este fin.

Análisis realizados en el sur de Alemania sobre latifoliadas indican que el sistema B, donde más parte de la copa del árbol es rechazada como despunte y nada es utilizado para pasta de celulosa, se obtiene entre el 30 y el 40% más volumen de materiales con destino energético que en el sistema A. Esto nos indica que en los estudios de valoración del potencial de biomasa disponible para fines energéticos de un determinado monte, el tipo de fraccionamiento de las partes del árbol para distintos fines debe ser considerado. Por otra parte, las condiciones de humedad en la madera en el momento de la tala influirán también en el sistema de fraccionamiento elegido. En árboles muy secos, por falta de lluvia o riego, o también aquellos afectados por parásitos que impiden que llegue agua y nutrientes a la copa, presentarán una madera sin buenas condiciones para la obtención de pasta de celulosa, por tanto se tiende a realizar el sistema B.

b) Sistemas continuos de aprovechamiento: Son sistemas de aprovechamiento en los que los árboles se talan en una sucesión de cortas. Este tipo de aprovechamiento puede ser debido a varias razones. En ocasiones, pueden realizarse clareos intermedios para cortar los árboles que no se quieren preservar para la corta final, para que los demás mejoren su calidad al recibir una mayor cantidad de luz y nutrientes, alcanzando mayor tamaño. Esta selección debe realizarse desde un doble enfoque: industrial y silvícola. Los criterios de calidad industriales serán

- Verticalidad del árbol
- Diámetro a 1,3 metros y 7 metros
- Escasa ramosidad en el fuste
- Densidad

Otras circunstancias que motivan el aprovechamiento continuo son debidas a que los árboles de la masa poseen edades diferentes, con diámetros y alturas distintos. Por tanto, no todos los árboles de la masa se cortan en un ciclo determinado. Este tipo de aprovechamiento también se denomina *corta selectiva*. La selección de los que se han de cortar se basa en criterios de calidad industrial y silvícolas anteriormente citados. Este tipo de sistemas se da generalmente en el aprovechamiento de selva nativa, o repoblaciones realizadas de forma discontinua en determinadas zonas.

El aprovechamiento continuo se denomina *claras* cuando los árboles talados tienen un diámetro suficiente para ser utilizados bien para pasta de celulosa o para tablero, aunque puedan ser destinados para uso energético. El aprovechamiento discontinuo se denomina *clareo* cuando los árboles cortados tienen un diámetro pequeño y para su aprovechamiento industrial deben ser astillados o tener destino energético. El clareo tiene como objetivo principal la mejora de la calidad de los árboles que no se cortan. Cuando se realiza una plantación de árboles de una determinada especie, el número de pies plantados por unidad de superficie es muy superior a la densidad conveniente para un adecuado crecimiento y su posterior aprovechamiento maderero. Por ejemplo, en la

especie *Pinus silvestris* la densidad de plantación es aproximadamente de 1000 o 2000 pies por hectárea. A los cinco años se realiza una reducción de la densidad dejando aproximadamente 200 árboles por hectárea. Los criterios de selección están basados en calidad, vitalidad (existencia de una copa con suficiente follaje) y estabilidad. De acuerdo con estos criterios se talan los árboles menos apropiados de forma que la distancia mínima entre árboles sea superior a 3 metros.

Limpieza de monte bajo

Son operaciones de eliminación de matorral bajo en zonas donde la elevada densidad provoca un riesgo elevado de incendios en las épocas secas. Estas operaciones suponen un coste económico periódico, necesario para un adecuado mantenimiento de la masa forestal, sobretudo en el área de clima mediterráneo. Dado que los materiales eliminados del monte deben ser extraídos, los costes de la operación podrían ser compensados si el destino de los restos resultantes fueran en un 100% a uso energético. En la actualidad esta inversión en las operaciones de limpieza no es realizada por propietarios privados. En cierto modo la obtención de biomasa energética puede incentivar la realización de estas operaciones.

El desbroce puede realizarse de forma manual o con desbrozadoras acopladas a tractores agrícolas.

a) Desbroce manual: se realiza por operarios en terrenos de poca accesibilidad o elevada pendiente. Para ello se utilizan desbrozadoras manuales que consisten en un rotor con latiguillos de plástico o cuchillas situado en el extremo de una lanza siendo accionado por un motor de dos tiempos de bajo peso. El operario sujeta la máquina de pie a través de unas asas, desplazándose por la zona que desea desbrozar.



Figura 1.2. Desbrozadora manual

b) Utilización de desbrozadora acoplada a tractor agrícola. Son aperos suspendidos accionados por un tractor agrícola convencional. Están constituidas por un bastidor acoplado al enganche tripuntal y un rotor formado por un eje horizontal o vertical al que se unen los elementos de corte. Estos elementos de corte pueden ser cadenas, cuchillas o martillos que giran a gran velocidad dentro de una carcasa. El rotor es accionado por la toma de fuerza del tractor. El corte de la vegetación se realiza en un plano a determinada altura del suelo por impacto, por tanto solo obtienen buenos rendimientos en montes de suave relieve. Este tipo de máquinas no es adecuado para desbroces selectivos, no debiendo ser utilizadas en montes en los que haya que respetar las plantas jóvenes de las especies arbóreas o determinadas matas o arbustos.

Estas máquinas van acopladas a tractores de pequeñas dimensiones de gran maniobrabilidad para dirigir adecuadamente el desbroce y evitar destruir ciertas especies. Éstos suelen ser equipos de 60 a 130 kW, generalmente de ruedas, capaces de operar en curvas de nivel con una inclinación de hasta un 40 o 50%. Al tener que circular por terrenos con matorral alto deben disponer de las correspondientes protecciones adecuadas al terreno forestal: protección de los bajos, radiador, faros y otras zonas sensibles del motor.



(a)

(b)

Figura 1.3. Desbrozadoras de ejes horizontal (a) y vertical (b)

Las desbrozadoras más usadas en el medio forestal son las de eje vertical, principalmente con cadenas como elementos de corte.

Una vez realizado el desbroce se debe realizar una concentración de los materiales y posteriormente la extracción hasta la pista forestal donde serán astillados o empacados para su transporte. Estas operaciones de concentración y extracción se pueden realizar con rastrillos acoplados a tractores, mediante la pala empujadora de un buldócer, su

carga mediante tractor autocargador o de forma manual. La elección del método dependerá principalmente de la pendiente y accesibilidad del terreno.

Infraestructuras forestales

Son obras de accesibilidad, cortafuegos, pistas de aterrizaje para avionetas de extinción de incendios, etc. Estas infraestructuras requieren la eliminación de la cubierta vegetal, que supone también un 100% de residuo destinable a uso energético. La primera fase de la construcción es la eliminación de los árboles de la zona de obras. Esta operación requiere primero el apeo del árbol y posteriormente la eliminación de los tocones, que corresponde a la parte basal y raíces enterradas en el suelo. El apeo se puede realizar de forma manual con motosierra, con máquinas taladoras-apiladoras o con procesadora. Dependerá del diámetro de los árboles y pendiente del terreno. El desenterrado de los tocones requiere buldócer si las raíces no son muy profundas. Esta máquina consiste en un tractor con tren de rodaje de cadenas que dispone en la parte delantera de una hoja empujadora que permite el amontonamiento de los materiales. Si las raíces son profundas, se emplearán retroexcavadoras. En el caso de tratarse de una zona de matorral se realizará un desbrozado con los mismos sistemas descritos en las operaciones de limpieza de monte bajo. Una vez eliminada la cubierta vegetal (árboles o matorral) se procede a la concentración de residuos en una zona de acopio para su posterior astillado o empacado.

Recogida de restos de catástrofes

Los incendios forestales y las inundaciones suponen una destrucción del medio natural que deja una biomasa residual que en la mayoría de las ocasiones debe ser retirada dado que suponen un obstáculo a la regeneración natural o a las operaciones de repoblación posteriores. El residuo proveniente de estas catástrofes también es aprovechable totalmente para la obtención de energía. La eliminación de estos residuos se realiza generalmente con buldócer. Éstos serán astillados o empacados para el transporte. Para la concentración de residuos también puede ser utilizado un tractor autocargador.



Figura 1.4. Concentración de residuos con buldócer

Plantaciones energéticas

Son plantaciones específicamente destinadas a la obtención de biocombustibles. Normalmente se emplean especies de crecimiento rápido con turnos cortos en zonas marginales donde no es adecuado otro destino para la biomasa producida. En estas plantaciones se realizan cortas a hecho, de forma que se eliminan todos los árboles comerciales de una determinada zona en la que no queda una cubierta arbórea significativa. Las especies más comúnmente utilizadas en este tipo de plantaciones en el área mediterránea son chopos, sauces, eucaliptos, robinas, acacias, y especies C4 forestales. La tala de los árboles se realiza con diámetros pequeños 10-15 cm, dos o tres años después de la plantación. Existen diversos sistemas generalmente utilizados en la extracción.

1º) Tala mediante máquina taladora-apiladora, los árboles talados son depositados en montones en la zona de corte. Posteriormente un tractor autocargador recoge los materiales y los agrupa en una zona de acopio donde una astilladora de elevada potencia los astilla. Mediante impulsión neumática las astillas son depositadas en un contenedor de transporte que las conducirá a la fábrica donde serán utilizadas.

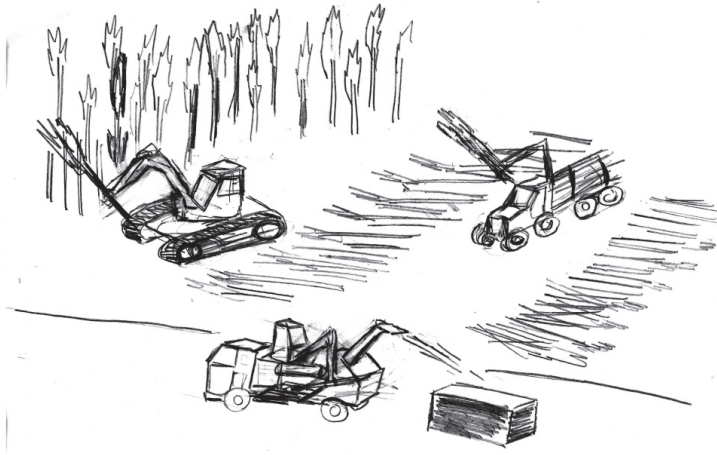


Figura 1.5. Esquema de extracción de biomasa en plantaciones energéticas

2º) Máquinas con cabezal de corte frontal. Estas máquinas disponen en su parte delantera un cabezal con cuchillas en la parte inferior que a su vez conducen los materiales hacia un triturador situado en el interior de la máquina. El corte se produce simultáneamente al avance sobre la plantación. Una vez el material está triturado es impulsado de forma neumática y dirigido mediante deflectores a un contenedor de transporte traccionado por un tractor que avanza paralelamente. El uso de estos cabezales es sólo apto para diámetros menores que el sistema anterior



Figura 1.6. Máquinas con cabezal de corte en plantaciones energéticas (Ehlert y Pecenka, 2012)

Biomasa de las industrias forestales

La materia prima que llega a la industria se utiliza para su transformación en bienes manufacturados (madera, corcho, pasta de celulosa, etc.), la parte sobrante es residuo industrial. Este planteamiento se muestra en la Figura 1.7.

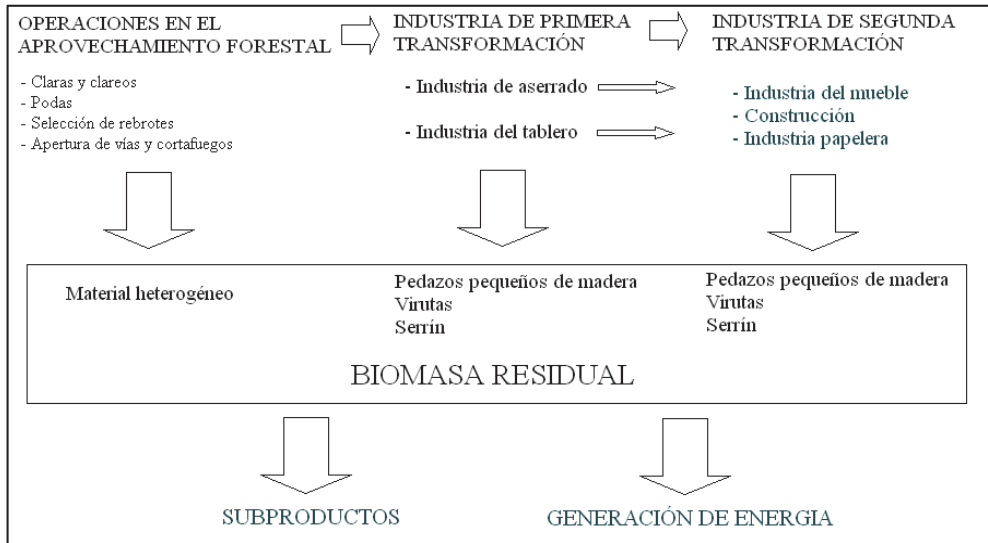


Figura 1.7. Clasificación de la biomasa forestal

La biomasa residual que procede de los procesos productivos vinculados a la cadena *aprovechamiento de los montes – industria*, es generada en diferentes puntos de la misma:

- Residuos generados directamente en las explotaciones forestales
- Industria de aserrado
- Industria de tableros y pasta
- Aplicaciones de 2ª transformación

Los residuos generados en la industria de aserrado, tableros, pasta y segunda transformación, son materiales generalmente de alta calidad calorífica, si son densos y con baja humedad, además están concentrados en las diferentes empresas. Por estas razones mediante un sistema de recogida bien organizado estos residuos son ampliamente utilizados, bien para la creación de subproductos o la generación de energía calorífica, empleada en las propias industrias o en plantas de generación de energía eléctrica. En la Tabla 1.2 se muestra los residuos generados en cada uno de los posibles destinos de la biomasa forestal.

Tabla 1.2. Biomasa residual generada en la industria forestal de primera y segunda transformación

Tipo de Residuo	Destino
A) Biomasa en aprovechamiento forestal	
Fuste	Industria de aserradero
Ramas procedentes del procesado del fuste	Astillado para aplicaciones energéticas
Despunte, parte superior de la copa, con diámetro menor y mayor número de ramas	Astillado para aplicaciones energéticas
B) Biomasa en aserradero	
Fuste	Industria del tablero
Corteza	Aplicaciones energéticas Sustratos vegetales
Serrín blanco (procedente de coníferas, eucalipto, o mezcla de ambos)	Fabricación de productos derivados de la madera
Serrín rojo (procedente de frondosas y especies tropicales)	Aplicaciones energéticas
Costeros y leñas	Industria de tableros derivados de la madera
B) Biomasa residual en la industria del tablero y chapa	
Corteza	Aplicaciones energéticas
Polvo de lijado	Aplicaciones energéticas
C) Biomasa residual en la industria de la celulosa	
Corteza	Aplicaciones energéticas
Lejías negras	
D) Biomasa residual en la industria de segunda transformación	
Serrines y virutas	Aplicaciones energéticas Industria de tableros derivados de la madera Cama animal en las explotaciones agropecuarias
Tacos y recortes	Aplicaciones energéticas
E) Biomasa residual en la industria de palets, envases y embalajes	
Serrines y virutas	Aplicaciones energéticas Tableros de partículas Cama animal en las explotaciones agropecuarias
Tacos y recortes	Aplicaciones energéticas
F) Residuos de madera urbana	
Residuos voluminosos	Aplicaciones energéticas Tableros de partículas

A pesar de que estos residuos tienen su origen en el monte, no pueden ser considerados todos residuos forestales. En sentido estricto, sólo son tales aquellos que son generados directamente en el medio forestal.

1.5. Conclusiones

Como conclusión cabe decir que mucha de la biomasa producida en los sistemas agrícola y forestal no es utilizada para la producción de bioenergía debido a que existen diversas dificultades técnicas en su extracción, manipulación y transporte, así como insuficiente información sobre la cantidad y calidad de estos residuos. Los residuos forestales o agrícolas están generalmente dispersos, ofrecen unas características heterogéneas muy variables de unos sistemas a otros al depender de condiciones no controladas como el clima, edafología, sistema de aprovechamiento, etc. Por tanto, la variedad y dispersión de estos residuos encarece las operaciones de obtención y abastecimiento, teniendo además que homogeneizar el material utilizable. Por esta razón, las industrias generadoras de energía pueden orientar su demanda prioritariamente hacia los residuos generados en la industria de primera y segunda transformación, que son materiales generalmente de alta calidad para la combustión, y además están preconcentrados en las diferentes empresas. Por tanto, mediante un sistema de recogida bien organizado resulta fácil su obtención y logística, pero provoca la existencia de una biomasa residual producida en las explotaciones del sector primario, aprovechamientos y operaciones forestales y explotaciones agrícolas que no están siendo utilizadas dado que presentan las citadas dificultades técnicas. El aprovechamiento de estos residuos requiere optimizar los procesos de extracción, transporte, selección y transformación.

La explotación racional de la biomasa para la obtención de energía por parte de las plantas generadoras, pasaría por una parte por orientar a éstas hacia el uso de residuos finales, por otra parte, utilizar biomasa agrícola y forestal que no se está movilizando en la actualidad, y que podrían aportar enormes beneficios indirectos tanto ambientales como económicos en el sector rural. Esta concepción requiere realizar una valoración global de la biomasa residual existente que defina, cual es residuo final y no está siendo utilizado para la generación de energía y qué residuos son reutilizables por los sectores industriales.

El estudio del aprovechamiento de los residuos biomásicos comprende seis fases fundamentales:

1. Valoración de la biomasa residual procedente de un determinado sistema
2. Caracterización de los residuos en sus diferentes fracciones, definiendo su aptitud para ser transformados a biocombustibles
3. Estudio de las técnicas de recogida, selección y acopio, en cuanto a su aplicabilidad, rendimiento, coste económico

4. Evaluación técnica y económica de los procesos de transformación, dado que el aprovechamiento energético de los residuos debe compensar el coste económico de su retirada del sistema
5. Balance energético: la extracción de biomasa supone un consumo para energía en el uso de maquinaria (especialmente combustibles fósiles). Debe evaluarse el balance de energía obtenido por la combustión de cada tipo de residuo
6. Evaluación del impacto ambiental vinculado a la recogida de los restos

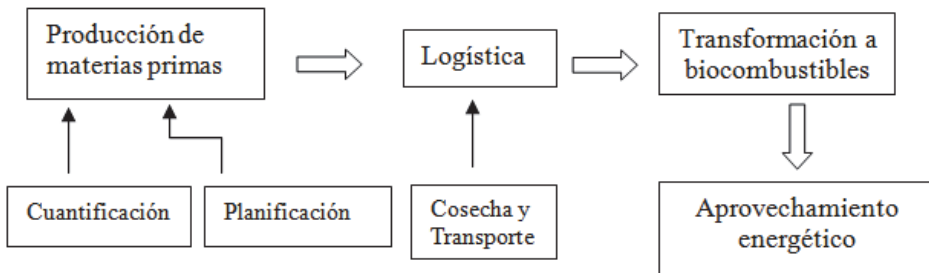


Figura 1.8. Cadena aprovechamiento de biomasa

Para el aprovechamiento de la biomasa residual leñosa procedente de la agricultura o de los sistemas forestales, y el consecuente aumento de la renta agraria, es necesario desarrollar la cadena mostrada en la Figura 1.8 y evidentemente debe ser impulsada o favorecida desde las distintas administraciones. En mi opinión, debe comenzarse por crear una necesidad de materia prima, es decir, la creación de demanda de biocombustibles; por ejemplo, con ayudas a la instalación de calderas de biomasa (pélets o astillas) para calefacción en viviendas, o para miniplantas de cogeneración (energía eléctrica + calor) en industrias. Estas instalaciones precisarán de industrias de transformación y valorización de biomasa que puede obtenerse de residuos leñosos agrícolas y forestales. Debe trabajarse en mi opinión a escala pequeña o mediana, de forma que puedan abastecerse los transformadores de zonas muy concretas y con una planificación previa. La existencia de demanda implicará la implantación de sistemas de recogida o cosecha de residuos, bien mediante recursos propios o a través de empresas agraria de servicios. Esta fuente de biomasa no ha sido utilizada hasta ahora, debido a que presentan diferentes dificultades técnicas en su extracción, manipulación y transporte que encarecen el proceso, así como por la carencia de suficiente información sobre la cantidad y aptitud de estos residuos.

CAPITULO I. RECUERDA

Biomasa es materia orgánica no fosilizada, ya sea originada en un proceso biológico espontáneo o provocado.

Biocombustible es un combustible producido de la transformación de biomasa.

Residuos biomásicos finales son materiales orgánicos cuyo aprovechamiento no energético no resulta interesante desde el punto de vista económico.

Restos orgánicos son materiales que podrían ser transformados en otros subproductos, aunque son aptos para la fabricación de biocombustibles.

Plantaciones energéticas son cultivos destinados a la obtención de materias primas para la producción de biocombustibles.

REFERENCIAS

Balance Energético Nacional, 2013. Series históricas (1995-2012). Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos. Ecuador. 159 pp.

Ehlert D., Pecenka R. 2012. Harvesters for Short Rotation Coppices: Current Status and New Solutions, International Conference on Agricultural Engineering CIGR-Ageng 2012, Valencia (Spain), July 9th, 2012

Capítulo II

Tipos de biocombustibles

2.1. Proceso de combustión

Denominamos *biocombustible* a sustancias o materiales que provienen de la transformación física o química de la biomasa que tienen la facilidad de reaccionar con el oxígeno de forma exotérmica, es decir, desprendiendo energía calorífica. La materia orgánica, que está formada principalmente por cadenas de carbono, en el proceso de combustión produce fundamentalmente CO₂ y H₂O, junto otros gases en menor cantidad como SO₂. La fracción no oxidable son las cenizas, constituidas por la fracción mineral (Figura 2.1). El gas comburente, que aporta el oxígeno para la reacción de oxidación, es el aire. El aire está formado en un 21% de O₂, 79% de N₂ y sólo una fracción muy pequeña por dióxido de carbono, alrededor de 390 ppm. Las moléculas de oxígeno y nitrógeno en la combustión a temperaturas por debajo de los 1600°C no se combinan formando óxidos de nitrógeno (NO_x), por lo que estos gases contaminantes no se producen normalmente en la combustión de biomasa.



Aunque la combustión es una reacción muy común, su control encierra cierta complejidad. Los sistemas de regulación de temperatura en un quemador se basan principalmente en el control del material combustible aportado y la cantidad de aire disponible. El proceso de combustión comprende dos fases: *Fase de encendido o ignición* y *Fase de oxidación*.

Fase de ignición: para el encendido se debe aplicar una energía de activación externa para que se inicie la reacción. Esta energía proviene de una chispa, una corriente eléctrica, una llama de menor intensidad, por fricción, impacto u otros. La energía de activación se consume en dos procesos: inicialmente en la deshidratación del combustible, en la que el material se seca evaporándose el agua que pudiera contener; posteriormente en la descomposición termal del combustible. Antes de empezar a oxidarse se produce la liberación de volátiles, es decir, una fracción del combustible cambia de estado pasando a fase gaseosa. Esta etapa se denomina *Pirólisis*. Los gases volátiles tienen una densidad menor que la del aire y tienden a ascender.

Fase de oxidación: tras la sublimación de los gases volátiles empieza la oxidación de los mismos, desprendiendo luz y calor. También se produce la oxidación de una fracción de la materia sólida, no volatilizada, denominada carbón. Este proceso es el responsable de que las llamas de combustión tengan una forma alargada y vertical. En la parte superior de la llama se produce la oxidación de los gases volátiles en movimiento ascendente, y tiene generalmente un color y una temperatura. En la parte inferior de la llama, se produce la oxidación de la fracción sólida, generalmente con un color distinto de llama y otra temperatura. El color y la temperatura dependen de la composición química de los gases y del carbón, que variarán según la naturaleza del combustible. En definitiva el proceso de combustión se produce en dos fases que forman las cuatro etapas esquematizadas en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Fases de la combustión

Fase de activación o ignición	Etapa de Deshidratación	Eliminación del agua
	Etapa de Pirólisis	Descomposición termal del combustible en gases volátiles y formación de carbón
Fase de oxidación	Etapa de oxidación de la fracción volátil	Combustión de los gases volátiles generados en la etapa anterior formando la llama
	Etapa de la oxidación de la fracción sólida	Combustión del carbón

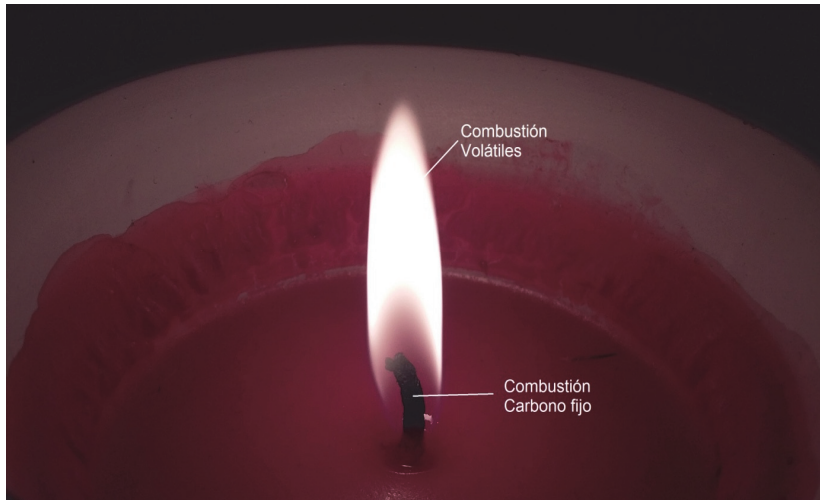


Figura 2.1. Forma de la llama en la combustión

La energía de activación está relacionada con la inflamabilidad y combustibilidad del combustible. Si la energía de activación necesaria para la ignición de un determinado combustible es pequeña, éste es muy inflamable. Si la energía de activación necesaria es grande, estamos ante un combustible menos inflamable. Cuando se aplica la energía de ignición (activación) en un combustible, no se aplica a todas sus moléculas simultáneamente, sino que se aplica en un determinado punto. Cuando las moléculas de ese punto empiezan a reaccionar con el oxígeno liberan calor. Si el calor liberado es suficiente para activar las moléculas combustibles adyacentes, la combustión se propagará, en caso contrario se extinguirá. Es condición para la propagación que el balance entre el calor liberado menos el absorbido en la fase de ignición sea positivo. Si es así, se dice que el material es muy combustible, propaga rápidamente la reacción. Si no, el material es poco combustible. Combustibilidad e inflamabilidad son propiedades relacionadas, pero no son sinónimos. Un material puede encenderse pero no propagar la reacción a lo largo del mismo, entonces es inflamable pero con baja combustibilidad. También puede darse el caso contrario, un material es difícil de encender, pero una vez encendido la combustión se propaga con facilidad, entonces es un material poco inflamable pero con mejor combustibilidad.

2.2. Tipos de biocombustibles

Los distintos tipos de transformación a los que se ve sometida la biomasa nos permite clasificar los biocombustibles. Por otra parte, según el tipo de aplicación distinguimos entre biocombustibles biocarburantes y no biocarburantes. Se denominan biocarburantes a todo combustible líquido o gaseoso producido a partir de biomasa que es posible utilizarlo en motores de combustión interna utilizable en vehículos de transporte. De

forma global existen nueve tipos de biocombustibles, tres de ellos son sólidos, tres líquidos y tres gaseosos.

Leñas y astillas

Son materiales de madera, por tanto sólidos, que se utilizan bien para la combustión directa en calderas, o para la obtención de carbón vegetal o productos densificados, como pélets o briquetas. Se obtienen de los sistemas forestales o de los cultivos agrícolas leñosos. Se denominan leñas a pedazos de madera con unas dimensiones del orden entre 25 y 50 cm de longitud; se denominan astillas a trozos de madera con dimensiones de pocos centímetros (entre 3 y 15 cm). Los procesos de transformación de la biomasa maderera para la producción de leñas y astillas son los más simples desde el punto de vista técnico. La madera extraída es fragmentada o triturada, haciéndole después una desecación, que puede ser natural o forzada.

En principio el secado puede realizarse de forma natural al aire hasta obtener un contenido de humedad de 20 a un 25 por ciento, pero posteriormente es imprescindible un secado artificial donde la humedad final quede por debajo del 10%. La humedad final depende del tratamiento y tiempo de aplicación. Los procedimientos artificiales de secado pueden clasificarse de acuerdo a los rangos de temperatura utilizados.

- Secado a baja temperatura, $T < 50^{\circ}\text{C}$. Utilizado generalmente para presecado, y se realiza por deshumidificación.
- Secado convencional. Se realiza a temperaturas intermedias, $50^{\circ}\text{C} < T < 82^{\circ}\text{C}$. Los tipos de tratamiento son
 - a. Aire Caliente Condicionado (ACC), tecnología más usada
 - b. Secado al vacío
 - c. y algunos sistemas por deshumidificación.
- Secado a alta o ultraelevada temperatura, $T > 100^{\circ}\text{C}$. Donde se usan equipos de ACC, secado a microondas o frecuencias de radio.

Carbón vegetal

Si se calienta la madera en un recinto cerrado con escasez de oxígeno, sólo una parte combustionará, pero el calor liberado en esa combustión incompleta permitirá la eliminación de los materiales volátiles de la parte no oxidada que se perderán mezclándose posteriormente con la atmósfera. La fracción sólida no oxidada y no volatilizada se denomina carbón vegetal, para diferenciarlo del carbón mineral fósil. El carbón vegetal presenta algunas ventajas como biocombustible respecto a la madera: Primero, posee mayor poder calorífico que ésta, y segundo es más inerte, es decir, más difícilmente alterable frente a las condiciones ambientales o agentes biológicos. Sin embargo posee una menor densidad, por lo que para una misma masa es necesario más volumen. El

carbón vegetal es utilizado para combustión directa en caldera o la fabricación de productos densificados.

Este biocombustible sólido obtenido de la combustión incompleta de la madera, ha sido producido históricamente de forma artesanal, a través de hornos excavados en la montaña que se rellenaban de madera provocando una pequeña combustión en el interior. La presencia de aire en el mismo quedaba limitada por la producción de humos. También se producía mediante un apilamiento de madera en forma de cono que se recubría con tierra. Actualmente existen instalaciones carbonizadoras de ladrillo refractario, u hornos metálicos.

Pélets y briquetas

Dado que la energía liberada en la combustión depende de la cantidad de materia oxidada, es conveniente tener la mayor cantidad de masa en el mínimo volumen. La densidad tanto de la madera como del carbón vegetal puede aumentarse mediante compresión de partículas. Si los materiales biomásicos son triturados o molidos, se pueden compactar, obteniendo materiales sólidos densificados. Éstos se denominan pélets si tienen una longitud de pocos centímetros (entre 3 y 6 cm aproximadamente), se denominan briquetas si poseen una longitud entre 15 y 25 cm. El uso energético de los pélets consiste en su combustión en caldera, donde su uniformidad de dimensiones permite su fácil manipulación y la automatización de la alimentación. Los pélets son transportados y almacenados en depósitos o silos que se llenan y vacían bien por aspiración neumática o por tornillo sinfin. Las dimensiones de las briquetas hacen que sean destinadas a la combustión de hogares donde anteriormente podrían quemarse leñas.

Su proceso de fabricación parte de la molienda de los materiales. Se humectan una determinada cantidad y se les comprime contra una matriz perforada con agujeros de 1 cm de diámetro generalmente. La compresión se realiza mediante un rodillo giratorio. El material finamente molido al pasar con los agujeros empuja las partículas que ya se habían introducido en los orificios. La pasta de partículas forma unos cilindros que son cortados en una determinada altura por una cuchilla. Los cilindros cortados caen en un secador donde se produce una cementación de las partículas dándole consistencia al producto. La matriz perforada puede ser plana o anular. En la matriz plana los pélets caen verticalmente en el secador, en la matriz anular salen radialmente.

Los productos densificados no sólo se fabrican de partículas de madera o carbón vegetal, sino que pueden emplearse una gran diversidad materiales biomásicos, principalmente lignocelulósicos como paja de cereales, hierba, algodón, papel, serrín, polvo de lijado, residuos urbanos, etc.. Pueden ser formados mediante mezclas de diferentes materiales e incorporar aditivos que mejoran sus cualidades, como parafina o aceite vegetal que mejora el poder calorífico, inflamabilidad y adhesión de las partículas en la compactación.

Aceites piroleñosos

Si la biomasa es calentada sin suficiente oxígeno entre 400-450°C, como en el caso de la fabricación de carbón vegetal, los materiales volátiles se desprenden sin combustión. Los gases liberados pueden condensarse de forma controlada formando un líquido combustible llamado Aceite piroleñoso, por proceder del proceso llamado Pirólisis. Este biocombustible líquido es una mezcla homogénea de compuestos orgánicos, agua y residuos sólidos carbonosos llamados (Char). Para este tipo de proceso se utilizan residuos leñosos, paja de cereales (arroz, trigo...), tallos de maíz, mazorca de maíz. Como subproductos se forma carbón vegetal y un gas pobre también combustible.

Previa filtración, los aceites piroleñosos pueden ser usados en calderas para la obtención de calor o como carburante de motores de combustión interna. Presentan el inconveniente de no poderse mezclar con los carburantes convencionales, presentando un poder calorífico un 40% menor. En motores convencionales pueden provocar ciertos desórdenes mecánicos como la deposición de residuos carbonosos en el cilindro, taponamiento de inyectores, obstrucción de la bomba de inyección, agarrotamiento de las válvulas. Ello obliga a motores específicos. Además son más inestables, es decir, modifican su composición con el tiempo, alterando sus propiedades. Estas razones hacen que su uso actualmente sea prácticamente inexistente.

Gas de síntesis u obtenido por gasificación

La gasificación consiste en un proceso de desdoblamiento térmico de la biomasa separando la fracción volátil y las cenizas en ausencia de oxígeno. Cuando la biomasa se calienta sin oxígeno a mayor temperatura (950-1300°C) en un proceso de pirólisis, el gas resultante procedente de la volatilización de parte de los compuestos orgánicos puede ser directamente utilizado como biocombustible. Este gas se denomina gas de síntesis u obtenido por gasificación de la biomasa.

El poco oxígeno existente en el gasificador oxidará completamente una pequeña parte del carbono produciendo dióxido de carbono y calor, que mejora la pirólisis del resto de moléculas volátiles (Ec. 1). En las zonas donde el oxígeno es escaso ya no realiza una oxidación completa sino parcial produciendo monóxido de carbono (Ec. 2). El monóxido de carbono ya es una molécula gaseosa combustible puesto que se puede seguir oxidando. Si los átomos de carbono no tienen oxígeno para oxidarse buscan oxidantes alternativos. Cuando el gas dominante es dióxido de carbono, éste puede actuar como oxidante alternativo al oxígeno produciendo más monóxido de carbono (Ec. 3). Lo mismo ocurre con las moléculas de vapor de agua que además de combinarse con los átomos de carbono (Ec. 4) pueden combinarse con el monóxido de carbono, produciendo hidrógeno gas (Ec. 5) lo cual mejora la inflamabilidad de gas de síntesis final. No obstante el hidrógeno puede reaccionar con el carbono en ausencia de oxígeno formando metano (Ec. 6 y 7). Las reacciones de hidratación del carbono (Ec. 4 y 5) deben producirse a alta temperatura porque si no, produciría carbonatos. En definitiva, la composición del gas de síntesis es una mezcla muy variable de CO₂, CO, H₂O,

H₂ y CH₄, que dependerá de la composición de la biomasa materia prima, de su granulometría, de la temperatura a la que se produce y de la velocidad de variación de temperatura durante el proceso, además tendrá una cantidad apreciable de residuos carbonosos, hidrocarburos y alquitranes, que es necesario eliminar antes de ser empleado como biocombustible.



En la práctica las plantas de gasificación deben hacer pruebas empíricas para encontrar las condiciones idóneas de operación (granulometría, humedad, temperatura de proceso, cantidad de oxígeno, y velocidad de variación de la temperatura) para un tipo de biomasa concreto a tratar. No existen modelos de predicción viables de componentes finales del gas del proceso de gasificación.

El esquema del proceso es mostrado en la Figura 2.2.

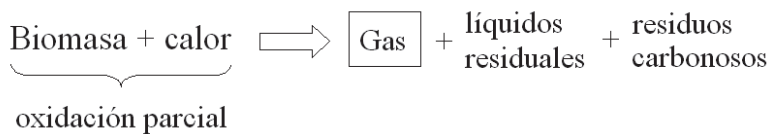


Figura 2.2. Proceso de gasificación

Para este tipo de proceso se utilizan residuos leñosos, paja de cereales (arroz, trigo...), tallos de maíz, mazorca de maíz. El gas obtenido se puede utilizar directamente en calderas para la producción de calor, en mezclas con carburantes en motores de combustión interna, turbinas de gas para la producción de energía eléctrica o la producción de otros líquidos o gases combustibles de síntesis.

Biodiésel

A diferencia de los procesos para producir los biocombustibles anteriores donde se somete la biomasa a tratamientos fundamentalmente térmicos, el biodiésel procede de una reacción química, una transesterificación de los triglicéridos con metanol o etanol produciendo *metiléster* y *dimetiléster* respectivamente, junto glicerina.

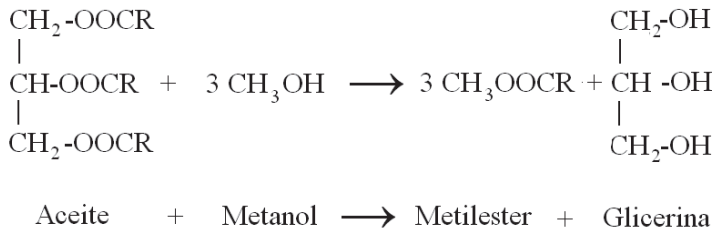


Figura 2.3. Obtención del Metiléster

Estos ésteres poseen unas cualidades en viscosidad, octanaje y poder calorífico muy semejante a los carburantes utilizados en los motores diésel, por tanto, se emplean como tales de forma directa, denominándose de forma genérica *biodiésel*.

Los triglicéridos son el componente mayoritario de los aceites vegetales. Junto los monoglicéridos, diglicéridos y ácidos grasos libres suponen la fracción saponificable (98%). El 2% lo forman otros componentes no saponificables como esteroides, fenoles, fosfolípidos, alcoholes triterpénicos, clorofila, tocoferoles y carotenos entre otros. La fracción insaponificable supone un obstáculo a la transesterificación, por ello son necesarios unos pretratamientos del aceite para su eliminación mediante un proceso llamado *refinado*. Existen más de 300 especies capaces de producir aceites aptos para la producción de biodiesel en cantidades industriales, aunque los más utilizados son la colza, el girasol y el aceite de palma. También se pueden utilizar aceites vegetales residuales de freiduría, o de procesos industriales presentando la ventaja de estar más saturados.

Bioetanol y biometanol

El metanol y el etanol son biocombustibles utilizables como biocombustibles de motores Otto de combustión interna o como aditivo mezclándose con gasolina en una proporción comprendida entre el 10 y 20%. Son alcoholes líquidos obtenidos de la fermentación de azúcares. Por tanto tiene su origen en la acción de microorganismos tales como levaduras, bacterias (*Zimomonas*) u hongos (*Clostridium*). El sustrato de estos microorganismos suelen ser azúcares monoméricos (glucosa, fructosa, galactosa, manosa o ribosa) o diméricos (sacarosa). Para cada tipo de sustrato se intenta producir los microorganismos específicos más eficientes para su degradación, por tanto, el proceso de

producción se realiza en biorreactores, en principio totalmente estériles, donde se introduce el sustrato y se inocula la cepa deseada.

La fuente de los azúcares para la producción de estos biocombustibles suele ser biomasa de origen vegetal. Sin embargo los azúcares en los vegetales puede estar de tres formas: libre en monómeros y dímeros disueltos en jugos, en forma de almidón, o en forma de celulosa. En cultivos como la remolacha o la caña de azúcar predominan los jugos con monómeros y dímeros. En los granos de los cereales o la patata predomina el almidón. En los materiales como la madera o la paja se denominan lignocelulósicos por predominar la celulosa, hemicelulosa cementadas con lignina. Cuando los monómeros están libres, el azúcar es directamente fermentable, pero cuando está en forma polimérica (almidón o celulosa) es necesaria la hidrólisis, es decir, fragmentar los polímeros en sus moléculas constituyentes. La hidrólisis del almidón se realiza mediante enzimas que poseen microorganismos como *Aspergillus sp.* o *Rhizopus Niveus*. Por lo que primero debe extraerse el almidón de la semilla, y posteriormente intervienen dos procesos microbianos: uno para la hidrólisis y otro para la fermentación. La hidrólisis de la celulosa presenta más dificultades técnicas que la del almidón, pues la lignina supone una barrera que es necesario eliminar, y además la celulosa cristalina es más difícilmente hidrolizable que la celulosa amorfa. Por ello se requiere un proceso de varias etapas: primero es necesaria la disociación de la lignina y posteriormente provocar la transformación de la mayor fracción posible de celulosa cristalina a celulosa amorfa, para que entonces puedan actuar eficazmente los microorganismos celulolíticos, como la *Trichoderma*, *Phanerochaete* o *Fusarium*, o aplicar ácidos para la hidrolíticos de la celulosa.

Tras la hidrólisis polimérica ya quedan liberados los monómeros para poder proceder a la fermentación.

El metanol y el etanol también se emplean para la síntesis de biocarburantes de mayor calidad: bioETBE (etil ter-butyl éter) producido a partir del bioetanol; bioMTBE (metil ter-butyl éter), combustible producido a partir del biometanol.

Biogás

El biogás es un biocombustible gaseoso rico en metano, procedente de una fermentación anaerobia. Es decir, es el resultado de un proceso degenerativo de la materia orgánica provocado por la acción microbiana. Junto al metano el biogás posee otras moléculas como dihidruro de azufre, nitrógeno, monóxido y dióxido de carbono, y otros gases en fracciones menores (sulfuros y amoniaco). Los materiales susceptibles de fermentación suelen tener un alto contenido de agua, siendo fluidos con sólidos en suspensión: fangos de aguas residuales, residuos sólidos urbanos, residuos agrícolas y ganaderos como purines, u otros residuos orgánicos industriales, como de la industria del aceite, vino o de zumos. La composición final del gas resultante de la fermentación depende de la composición de la materia prima inicial, relación agua-sólido, de la gra-

nulometría de las partículas en suspensión, tipo de microorganismos actuantes, temperatura, y condiciones de anaerobiosis.

En el proceso de fermentación actúan tres tipos de microorganismos en tres etapas encadenadas:

- *Fase hidrolítica*: los microorganismos hidrolíticos dividen las largas moléculas poliméricas en trozos más pequeños, generalmente ácidos de cadena corta.
- *Fase acetogénica*: los monómeros son transformados en ácido acético por microorganismos específicos
- *Fase metanogénica*: el tercer tipo de microorganismos transforman el ácido acético en metano.

A diferencia de la producción de metanol o etanol, donde se inoculaban en los biorreactores cepas de microorganismos seleccionadas, en la producción de metano a partir de la fermentación se intenta favorecer la reproducción de los más eficientes entre aquellos que ya posee la biomasa (generalmente residual).

El gas obtenido de la fermentación es un gas combustible que puede tener distintas aplicaciones según la magnitud de la instalación. En instalaciones pequeñas se utiliza en fogones de cocina o calderas de calefacción. En instalaciones medianas o grandes el gas puede utilizarse en motores de gas estacionarios, acoplados a alternadores para producir energía eléctrica, o suministrarse a una red de abastecimiento general.

Biohidrógeno

De la hidrólisis de biomasa puede obtenerse gas hidrógeno que es combustible. Evidentemente para la hidrólisis hay que aplicar una energía, por tanto, el gas supone una forma de almacenamiento energética que puede ser utilizada como biocombustible.

En la Tabla 2.2 se muestra de forma resumida las características de los distintos tipos de biocombustibles: estado físico, la biomasa de origen, tipos de transformación y aplicaciones. De todos los biocombustibles, la definición de biocombustible sólo engloba al bioetanol, biometanol, biodiésel (metiléster, dimetiléster), bioETBE (etil ter-butyl éter), bioMTBE (metil ter-butyl éter), biogás, aceites obtenidos por pirólisis e hidrógeno procedente de la hidrólisis de biomasa. Los biocombustibles se utilizan principalmente para obtener energía para equipos automotrices. También son utilizados en motores estáticos acoplados a un alternador para la obtención de electricidad. Si el calor de la refrigeración de los motores es utilizado para otras aplicaciones el sistema se denomina cogeneración. Tanto los biocombustibles como los biocombustibles sólidos pueden ser quemados directamente en caldera para la obtención de calor. La caldera preparada para un tipo concreto de biocombustible tendrá un tipo específico de quemador. El calor suele ser utilizado en sistemas de calefacción o procesos de secado ya sea de

biomasa materia prima, maderas, ladrillos, frutas, pieles u cualquier producto. Si el calor es utilizado para la producción de vapor, éste puede ser incorporado a un ciclo de Rankine para la producción de electricidad. Este es un ciclo cerrado en el que el vapor generado en la caldera se hace pasar por una turbina a cierta presión. La turbina acoplada a un alternador produce electricidad. El vapor tras la turbina ha perdido parte de su presión, entonces se hace pasar por un condensador para obtener líquido que se impulsa con una bomba para compensar la caída de presión del circuito para introducirlo de nuevo en la caldera. Al ciclo de Rankine se le puede acoplar un proceso de cogeneración mediante la utilización de una parte del vapor para procesos de aprovechamiento del calor junto otra parte que al pasar por el circuito obtiene electricidad. En definitiva, como se puede observar en la Figura 2.4, los biocombustibles tienen tres aplicaciones principales: obtención de energía automotriz, obtención de calor, y electricidad. Los combustibles sólidos se utilizan para obtener calor o electricidad, ya sea aisladamente o simultáneamente a través de sistemas de cogeneración.

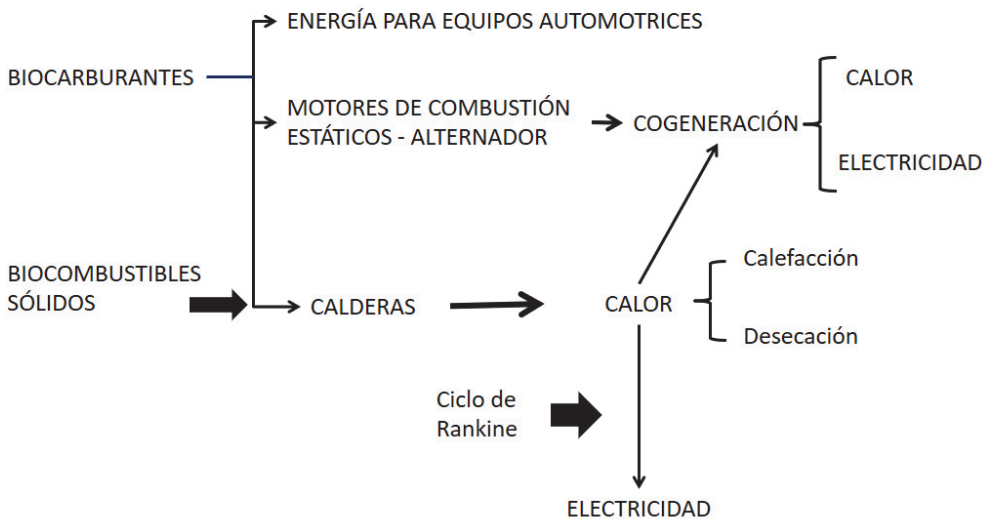


Figura 2.4. Aplicaciones de los biocombustibles

Todos estos biocombustibles suponen una alternativa a los combustibles fósiles (derivados del petróleo, carbón y gas natural). No obstante, su utilización no se ha generalizado por diversas razones:

1. De momento la mayoría de los procesos para la obtención de biocombustibles requieren un coste económico mayor que los combustibles fósiles, por depender de limitaciones técnicas.
2. Se requieren fuertes inversiones en instalaciones, de momento, poco rentables en el mercado actual.
3. Infraestructuras poco desarrolladas.
4. Inercia del sistema energético convencional
5. Conflicto de intereses de las compañías energéticas, que suponen un lobby contrario a cualquier cambio del sistema energético mundial.
6. Falta de voluntad política, a nivel internacional.
7. Es necesaria más investigación y desarrollo para mejorar la eficiencia y reducir los costes de las cadenas de producción.

Tabla 2.2. Biocombustibles obtenidos de la transformación de biomasa

Biocombustibles	Estado Físico	Biomasa de origen	Tipo y proceso de transformación		Utilización
			Física	Fragmentación y secado	
Leñas y astillas	Sólido	Cultivos energéticos de especies leñosas Restos de operaciones selvícolas Recortes y tacos procedentes de las industrias forestales Residuos de poda de árboles agrícolas o urbanos	Física	Fragmentación y secado	Combustión directa en calderas Formación de carbón vegetal Formación de pélets y briquetas
Carbón vegetal	Sólido	Cultivos energéticos de especies leñosas Restos de operaciones selvícolas Recortes y tacos procedentes de las industrias forestales	Física	Fragmentación Carbonización	Combustión directa en calderas Formación de pélets y briquetas
Pélets y briquetas	Sólido	Cultivos energéticos de especies leñosas Restos de operaciones selvícolas Recortes y tacos procedentes de las industrias forestales Residuos de poda de árboles agrícolas o urbanos	Física	Secado Molenda Humectación y mezcla con aditivos Compactación Secado	Combustión directa en calderas
Bioetanol y biometanol	Líquido	Azúcares procedentes de cultivos como la caña de azúcar o remolacha Almidón obtenido de diversas especies vegetales entre las que destaca patata, maíz y demás cereales Celulosa obtenida de materiales lignocelulósicos (maderas, pajas o material arbustivo)	Química microbiológica	Eliminación de la lignina (en materiales lignocelulósicos) Hidrólisis de polímeros (almidón o celulosa) Fermentación de azúcares Destilación	Directamente como carburantes de motores de encendido provocado Como aditivo mezclándose con gasolina en una proporción comprendida entre el 10 y 20%. En síntesis de biocarburantes de mayor calidad: ETBE, MTBE
Biodiesel	Líquido	Cualquier aceite de origen vegetal, principalmente de cultivos oleaginosos: colza, el girasol y palma africana Aceites vegetales residuales de freiduría, o de procesos industriales	Física y química	Presado de semillas Refinado del aceite Transesterificación de aceites con metanol o etanol, obteniendo el éster correspondiente junto con glicerina	Directamente como carburante para motores de encendido por compresión
Aceites piroleñosos	Líquido	Materiales leñosos, paja de cereales (arroz, trigo...), tallos de maíz, mazorca de maíz.	Química y física	Pirólisis (calentamiento de la biomasa a temperaturas entre 400-450°C y posterior enfriamiento rápido)	Calderas para la obtención de calor Como carburante para motores
Biogás	Gaseoso	Residuos ganaderos (purines) fangos aguas residuales, residuos sólidos urbanos, residuos agrícolas, residuos orgánicos industriales, como de la industria del aceite, vino o de zumos	Química	Fermentación anaerobia de origen microbiológico, obteniendo principalmente metano, nitrógeno, amoníaco e hidrógeno.	Combustión directa en calderas Como carburante para motores
Gas obtenido por gasificación	Gaseoso	Materiales leñosos, paja de cereales (arroz, trigo...), tallos de maíz, mazorca de maíz.	Química	Oxidación parcial de la biomasa a alta temperatura (1400°C) sin combustión, obteniendo hidrógeno e hidrocarburos (metano)	Combustión directa en calderas Como carburantes para motores En turbinas gas para energía eléctrica Producción de otros líquidos o gases combustibles de síntesis
Biohidrógeno	Gaseoso	Biomasa con gran contenido en agua o alcoholes	Química	Hidrólisis	Carburante

CAPÍTULO II. RECUERDA

Hay nueve grupos de biocombustibles: tres sólidos, tres líquidos y tres gaseosos

Sólo los líquidos y los gaseosos pueden ser utilizados como biocarburantes.

El carbón vegetal, los aceites piroleñosos y el gas de síntesis son biocombustibles que se obtienen del tratamiento térmico de la biomasa, aunque provoca reacciones químicas de orden diverso.

El biodiésel es un biocombustible producto de una reacción puramente química, mientras que el bioetanol y biogás proceden de reacciones metabólicas de origen microbiano.

La composición del gas de síntesis obtenido por gasificación depende del tipo de biomasa, granulometría, temperatura media del proceso y de la rampa de subida de temperatura.

Capítulo III

Caracterización de la biomasa sólida

La caracterización de la biomasa consiste en la medición de ciertos parámetros con dos objetivos: por un lado determinar la aptitud de las distintas materias primas para ser transformados en alguno de los tipos de biocombustibles, por otro lado, definir las propiedades y calidad de los mismos. La estandarización de los biocombustibles está regulada por el conjunto de normas europeas elaboradas por el Comité Técnico CEN/TC 335, por la que se regulan terminología, descripción, especificaciones, etc. El objeto de la normalización es establecer reglas que faciliten la producción en serie y el intercambio de productos a nivel nacional e internacional; hacer que todo el colectivo, fabricantes, vendedores, administración, usuarios y consumidores hablen el mismo lenguaje; y el cumplimiento de unos mínimos de calidad que garanticen el producto. El anexo a este capítulo recoge el conjunto de normas más relevantes para la caracterización de biocombustibles. A continuación se pone énfasis en los parámetros de más importancia.

3.1. Masa y volumen

La masa es la cantidad de materia. La determinación de la masa de modo sencillo resulta muy importante para las operaciones de compraventa, planificación de cosecha, transporte, almacenamiento y medición de la eficiencia del aprovechamiento. La cantidad de materia puede ser medida mediante pesada, pero su medición directa resulta a veces inviable, por ejemplo si la biomasa es de origen vegetal y las plantas no han sido cortadas; o es complicado porque el entramado voluminoso obliga a tener contenedores y básculas de elevadas dimensiones no transportables con facilidad. Por otra parte, en ocasiones la biomasa es muy higroscópica, es decir, absorbe agua de la

atmósfera que la rodea, adquiriendo distintas humedades según la temperatura ambiente, la humedad relativa del aire y su porosidad. El contenido de agua influye en la pesada, y la cantidad de materia combustible no es comparable si ésta no es anhidra, sin agua. El agua en la materia supone un obstáculo en la combustión. Por ello en muchas ocasiones en lugar de medir la masa, para la cuantificación de la biomasa sólida se utiliza el volumen. Naturalmente si se dispone de la densidad anhidra se conoce la proporcionalidad entre el volumen y la masa. En la utilización de la biomasa sólida hay que diferenciar tres tipos de volumen:

- *Volumen del sólido*: es el espacio que ocupa el material biomásico, sin contar los huecos existentes entre los distintos pedazos. Generalmente se aplica a leñas, astillas o semillas.

En ciertas aplicaciones puede ser importante conocer la biomasa contenida en la planta entera sin cortar, pues no sólo está relacionada con la fracción útil combustible, sino que está también relacionada con ciertos parámetros biológicos, agronómicos o selvícolas, según el caso. Estas relaciones, junto con los métodos de cuantificación de biomasa se expondrán con detenimiento en el Capítulo IV. Estos métodos están basados en la dendrometría y la dasometría.

- *Volumen estéreo*: se denomina estéreo al metro cúbico formado por un conjunto de leñas apiladas de forma longitudinal. Este espacio estará compuesto por material sólido y el aire existente entre los prismas apoyados unos junto a otros, según aparece en la Figura 3.1.



Figura 3.1. Disposición de la leña para ser medida por estéreos

- *Volumen de astillas o partículas:* la madera astillada en pedazos pequeños (del orden de centímetros) ocupará un volumen diferente al de los estéreos para una misma cantidad de material sólido, aunque el espacio ocupado también esté formado por material y aire entre los fragmentos.



Figura 3.2. Amontonamiento de astillas en campo

Las relaciones entre los diferentes volúmenes varían según la forma y dimensiones de cada tipo de leña o astillas comparadas y la forma de apilado. Los valores medios de dichas relaciones son mostrados en la Tabla 3.1

Tabla 3.1. Factores de conversión de entre los distintos tipos de volumen de biomasa forestal

	Volumen sólido	Volumen estéreo	Volumen de astillas
Volumen sólido	1	1,4	2,6
Volumen estéreo	0,7	1	1,8
Volumen de astillas	0,4	0,6	1

La equivalencia entre los distintos tipos de volumen depende de la granulometría de la muestra.

3.2. Distribución de tamaño de partícula

Como se ha comentado el tamaño de partícula influye en las proporcionalidades entre los distintos tipos de volumen. También influye en los sistemas de alimentación automática de materia basados en tornillo sinfin, aspiradores, cangilones u otros. Los rangos de los tamaños de las piezas obtenidas de las astilladoras de campo suelen estar comprendidas entre 40 mm y 120 mm. Éstos dependen del diseño del sistema de astillado y de las cribas que lleva incorporada cada máquina. Para este tipo de materiales no existen normas específicas para evaluar su granulometría, de forma general se utilizan tamices de orificios variables.

Para la determinación de la granulometría en laboratorio de materiales de tamaño más pequeño deben seguirse las normas EN ISO 17827 partes 1 y 2 y CEN/TS 15149-3. Esta norma se aplica a materiales de origen diverso, tales como astillas, huesos de frutos, cáscaras o granos, de tamaño más pequeño. La parte 1 describe el método de referencia para la clasificación de las partículas que forman la muestra con tamaño de partícula entre 65 mm y 3,15 mm. La parte 2 describe el procedimiento para la clasificación de partículas con tamaños menores a 3,15 mm. La distribución granulométrica en este tipo de partículas influirá en procesos industriales como la peletización, gasificación o fermentación. Los procedimientos tanto de la parte 1 como la 2 están basados en tamices que oscilan horizontalmente. Para la clasificación de partículas mayores de 3,15 mm (parte 1) la superficie mínima de cribado debe ser de 1200 cm², con un tamaño de muestra de 8 litros. La humedad de las partículas no debe superar el 20%. Los orificios recomendados de los tamices deben tener un diámetro de 3,15 mm, 8 mm, 16 mm, 45 mm y 63 mm. Los tamices se colocan en columna, situando abajo el de orificio menor y aumentando el tamaño de orificio en cada nivel. El resultado se expresa como el porcentaje de masa que es retenida en cada tamiz respecto a la masa total. Para la clasificación de las partículas menores a 3,15 mm (Parte 2) la superficie el tamiz debe ser como mínimo de 250 cm² y un tamaño de muestra 50 g. Los orificios recomendados de los tamices deben tener un diámetro de 3,15 mm, 2,5 mm, 1,4 mm, 1,0 mm 0,5 y 0,25 mm

Se define como *diámetro nominal superior de una muestra* al tamaño de abertura de tamiz por el cual pasa al menos el 95% de la masa del material.

La parte 3 describe un método de clasificación basado en tamices cilíndricos rotatorios conectados consecutivamente uno detrás de otro. La longitud de cada cilindro perforado debe ser como mínimo de 360 mm, y estar inclinado de forma que las partículas deslicen por su interior mientras el tambor gira a 16 vueltas por minuto. Las partículas que pasan por los orificios de cada tamiz se recogen en receptáculos independientes, de forma que se puede calcular el porcentaje de materiales caídos en cada uno de ellos.

3.3. Humedad

Es la fracción de agua contenida en la biomasa considerada. La humedad influirá directamente en multitud de parámetros importantes: masa, densidad, y principalmente en el poder calorífico del material si es utilizado directamente como combustible. También influirá en el procesado de las semillas oleaginosas o amiláceas para obtener biodiésel o etanol, o en los procesos de pirólisis, gasificación o fermentación de los distintos tipos de materiales, en su caso. Puede expresarse en dos formas distintas:

- Humedad en base húmeda (ω_h), calculada por la ecuación (3.1)

$$\omega_h = \frac{P_h - P_s}{P_h} \cdot 100 \quad (3.1)$$

- Humedad en base seca (ω_s), calculada por la ecuación (3.2)

$$\omega_s = \frac{P_h - P_s}{P_s} \cdot 100 \quad (3.2)$$

Donde P_h es la masa del material en un momento considerado con cierta cantidad de agua en su estructura, y P_s es la masa del material totalmente anhidro, es decir, sin contenido en agua. En muestras pequeñas el estado anhidro se consigue después de haber secado toda el agua introduciéndolas en estufa a 105°C hasta que su masa es constante. Esto suele durar un tiempo entre 12 y 24 h según el tamaño de las partículas. Superar este tiempo de desecación no es conveniente para evitar la liberación de volátiles. El método para la determinación de la humedad en la biomasa sólida está establecido por la norma EN ISO 18134 Partes 1, 2 y 3. Según esta norma las muestras a analizar deben ser tomadas y preparadas según la especificaciones recogidas en la norma EN 14778. Las muestras a analizar deben recibirse en botes herméticos cerrados, tener un tamaño máximo de 30 mm y una masa mínima de 300 g. La precisión de la balanza para la pesada debe ser de al menos de 0,1 g.

El procedimiento descrito tiene pequeñas variaciones según la precisión requerida y tamaño de la muestra a analizar. El método establecido por la parte 1 de la norma EN ISO 18134 es el reconocido como de referencia, y sólo debe ser usado cuando se requieren determinaciones de gran precisión. En él debe introducirse junto el recipiente con la muestra, otro recipiente vacío de comparación que servirá para determinar su influencia en el proceso de secado en el mismo. El procedimiento habitual seguido en procesos rápidos se realizará siguiendo el método descrito en la parte 2. Cuando el tamaño de partícula es muy pequeño, menores a 5 mm, debe utilizarse el procedimiento descrito en la parte 3. Este es el caso de las determinaciones de humedad previo posteriores análisis, tales como la determinación del poder calorífico o la composición elemental CHN, donde el contenido de humedad influye en los resultados. El pequeño tamaño de las partículas requiere especial cuidado cuando se extrae de la estufa, dado que su gran higroscopicidad puede hacer que varíe su humedad en pocos segundos. Por

eso es necesario que el recipiente que contiene la muestra sea cerrado con una tapa tras la desecación, y posteriormente sea introducido en un desecador durante su enfriamiento para evitar que la muestra absorba humedad de la atmósfera. Tras el enfriamiento se procede a su pesada.

La humedad de los materiales biomásicos lignocelulósicos recién cortados suele estar alrededor del 50%. A partir de ese momento sufrirá generalmente una disminución de humedad. La velocidad de descenso dependerá de la temperatura y humedad relativa del aire de su entorno. Experimentos realizados en la Universidad Politécnica de Valencia para evaluar el descenso de la humedad en materiales astillados en clima mediterráneo en distintas especies son mostrados en la Figura 3.3. Este tipo de curvas permite conocer la humedad tras un tiempo determinado de desecación al aire. Como se puede observar la humedad mínima obtenida se sitúa alrededor del 15-20% tras 15 días de secado, a partir de ese momento la humedad permanece constante.

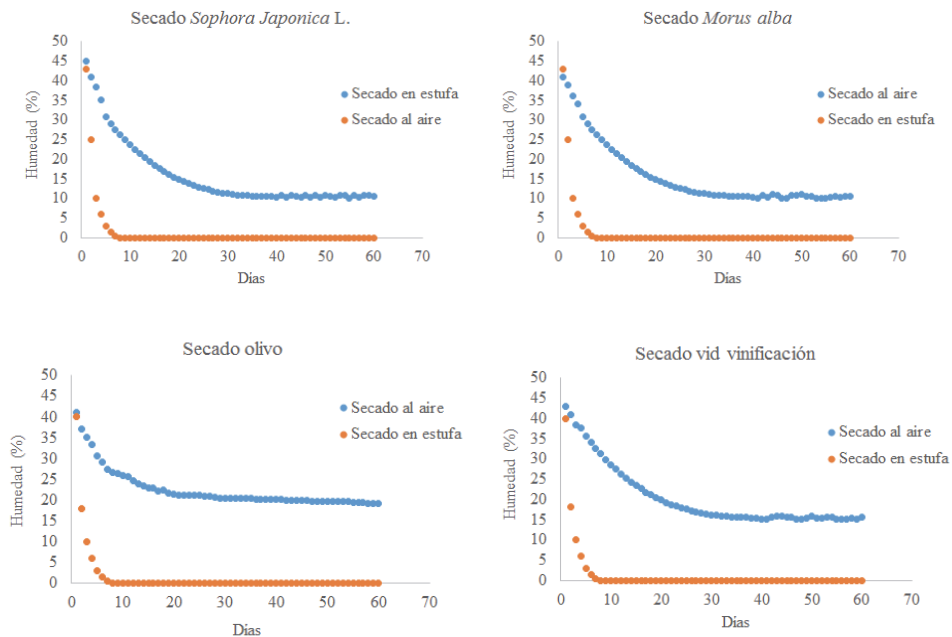


Figura 3.3. Variación de la humedad en material astillado secado al aire en la ciudad de Valencia (España) con una humedad relativa del aire del 65% y temperatura 25°C durante los experimentos

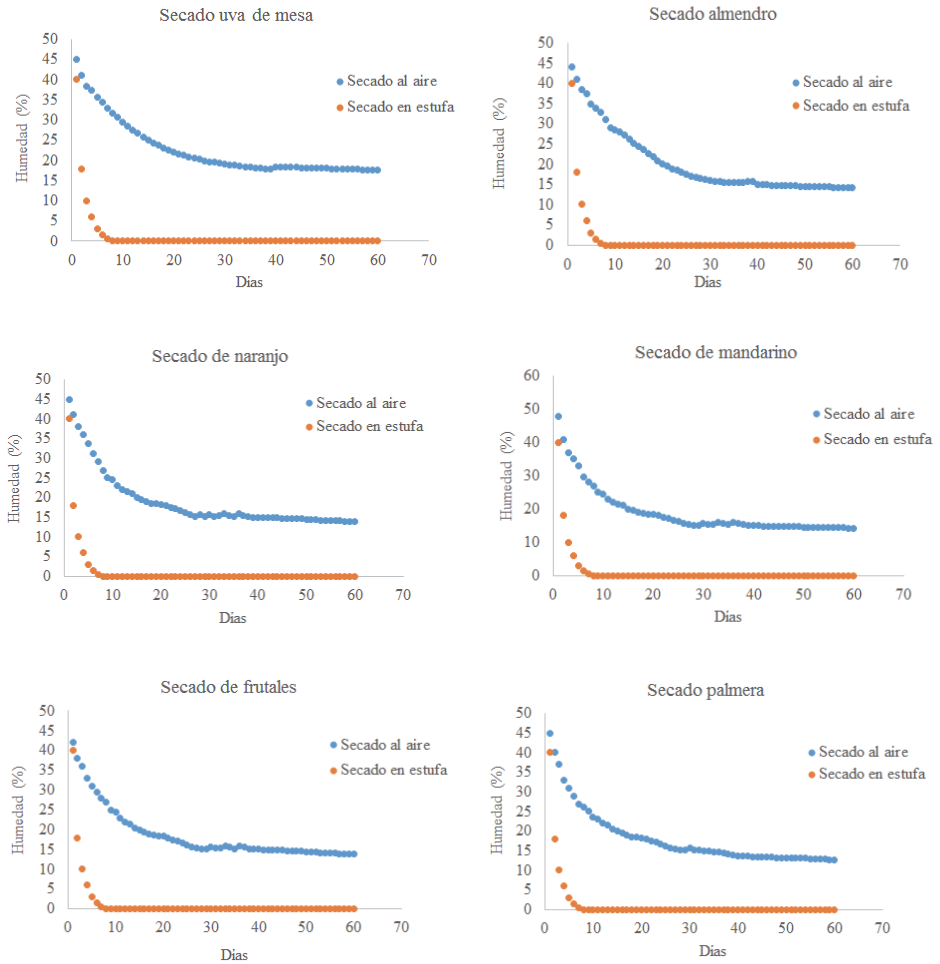


Figura 3.3. (cont.) Variación de la humedad en material astillado secado al aire en la ciudad de Valencia (España) con una humedad relativa del aire del 65% y temperatura 25°C durante los experimentos

3.4. Densidad

Es la relación que existe entre la masa de material y el volumen que ocupa. Se diferencian dos tipos de densidades:

- Densidad real (ρ_r): es el cociente de la masa de material y el volumen que ocupa excluyendo los espacios que hay entre las distintas partículas que la forman. En caso de los líquidos los huecos son considerados inexistentes.

$$\rho_r = \frac{m}{V_{\text{sólidos}}} \quad (3.3)$$

- Densidad aparente (ρ_a): es el cociente entre la masa del material y el volumen que ocupa junto los huecos existentes entre el material.

$$\rho_a = \frac{m}{V_{\text{sólidos}} + V_{\text{huecos}}} \quad (3.4)$$

Se calculan respectivamente con las ecuaciones (3.3) y (3.4), donde m es la masa del material, $V_{\text{sólidos}}$ es el volumen de sólidos y V_{huecos} es el volumen de los espacios entre los pedazos de material.

En los sólidos la densidad va a depender directamente del contenido de agua existente en la materia, por tanto, su utilización debe ser referida al porcentaje de humedad de la misma. En la caracterización de la biomasa deben considerarse $(\rho_r)_h$ y $(\rho_a)_h$, la densidad real y aparente a humedad ω_h , y los valores $(\rho_r)_a$ y $(\rho_a)_a$, densidad real y aparente del material anhidro, es decir, sin contenido de agua. Se define la densidad aparente en base seca $(\rho_a)_{bs}$ el valor dado por la ecuación (3.5), y densidad real en base seca calculada por la ecuación (3.6) $(\rho_r)_{bs}$, donde ω_h es la humedad en porcentaje de masa en base húmeda.

$$(\rho_a)_{bs} = (\rho_a)_h \cdot \left(1 - \frac{\omega_h}{100}\right) \quad (3.5)$$

$$(\rho_r)_{bs} = (\rho_r)_h \cdot \left(1 - \frac{\omega_h}{100}\right) \quad (3.6)$$

Las ecuaciones (3.5) y (3.6) se deducen del siguiente desarrollo:

$$m_{\text{total}} = m_{\text{sólido}} + m_{\text{agua}}$$

$$1 = \frac{m_{\text{sólido}}}{m_{\text{total}}} + \frac{m_{\text{agua}}}{m_{\text{total}}}$$

$$100 = 100 \frac{m_{\text{sólido}}}{m_{\text{total}}} + 100 \frac{m_{\text{agua}}}{m_{\text{total}}}$$

$$100 = 100 \frac{m_{\text{sólido}}}{m_{\text{total}}} + \omega_h$$

$$100 \cdot m_{\text{total}} = 100 \cdot m_{\text{sólido}} + m_{\text{total}} \cdot \omega_h$$

$$100 \cdot \frac{m_{\text{total}}}{V} = 100 \cdot \frac{m_{\text{sólido}}}{V} + \frac{m_{\text{total}}}{V} \cdot \omega_h$$

$$100 \cdot (\rho)_h = 100 \cdot (\rho)_{bs} + (\rho)_h \cdot \omega_h$$

$$(\rho)_{bs} = (\rho)_h \cdot \left(1 - \frac{\omega_h}{100}\right)$$

Valores medios de la densidad real para distintos tipos de biomasa se muestran en la Tabla 3.2. La densidad aparente en seco de los residuos forestales astillados de las especies europeas oscila entre 130 y 250 kg/m³. La densidad real en seco oscila entre 325 y 625 kg/m³.

La densidad aparente es un parámetro importante en los suministros de biocombustibles sólidos como las astillas, huesos de frutas, corteza, pélets o briquetas; porque multiplicado por el volumen y el poder calorífico proporciona la cantidad de energía bruta disponible. También permite estimar las necesidades de transporte y almacenamiento.

La densidad aparente no es un valor fijo para una determinada granulometría, sino que depende de varios factores, tales como los efectos de compactación y vibración a los que se ven sometidos los materiales irregulares en los recipientes de elevada altura, como pueden ser los contenedores de transporte o los silos de almacenamiento. El efecto de la compactación se puede comprobar en un depósito cilíndrico de elevada altura. Después de su llenado con partículas desde la parte superior, si el volumen se divide en tres partes iguales, se constata que existe más material en la franja inferior (y por ende menos espacio entre partículas), que en la franja media, y que en la franja media existe más material que en la franja superior donde hay más espacio entre partículas. En definitiva, la densidad aparente es variable dentro del depósito siendo creciente con la profundidad. Este efecto aumenta cuando existen también vibraciones, que pueden darse durante el transporte, dado que ayuda a la reordenación de las partículas sometidas a presión. La diferencia de densidad entre el fondo y la parte superior en vehículos de transporte puede alcanzar entre el 5 y el 20%. Estos efectos

deben considerarse tanto en la cuantificación de los materiales transportados como en las cantidades almacenables en los silos de almacenamiento.

La norma EN 17828 proporciona el método estandarizado para la determinación de la densidad aparente. Según el tamaño de partícula pueden ser empleados dos volúmenes cilíndricos para la medición, bien 5 litros o 50 litros, sometidos a vibración. La relación entre la altura y el diámetro de la base debe ser 1,5.

3.5. Poder calorífico

Es la cantidad de calor desprendido de un material por unidad de masa durante su combustión en unas condiciones dadas. Se debe distinguir tres tipos de poder calorífico en condiciones estándar:

- *Poder calorífico bruto a volumen constante*, también es llamado *Poder calorífico superior* (PCS). Es el calor generado en la combustión de un material, provocada en un recipiente cerrado, añadiendo el calor obtenido por la condensación del agua evaporada en el proceso, referido a la unidad de masa. La presión es variable porque va aumentando a medida que se van produciendo los gases resultantes de la combustión: dióxido de carbono, vapor de agua, nitrógeno y dióxido de azufre.
- *Poder calorífico neto a volumen constante*, también llamado *Poder calorífico inferior* (PCI). Es el calor por unidad de masa de material generado en la combustión en recipiente cerrado donde el vapor producido en el proceso queda libre.
- *Poder calorífico neto a presión constante*, es el calor desprendido en recinto abierto con exceso de aire a presión atmosférica. En estas condiciones los gases desprendidos quedan también libres.

El poder calorífico neto a presión constante es el que más se aproximará al realmente aprovechable en una caldera de combustión con aplicaciones domésticas o industriales. La determinación de los diferentes valores de poder calorífico se realiza siguiendo la norma EN 14918. De acuerdo a esta norma, el poder calorífico bruto a volumen constante PCS se mide en calorímetros en los que se provoca una combustión de la muestra en un recipiente cerrado, llamado bomba, de entre 250 y 300 ml, que se llena con exceso de oxígeno a 3 MPa de presión. En el interior de la bomba existen dos electrodos unidos por un alambre o filamento de masa y poder calorífico conocido, por el que circula la corriente en el momento del encendido. Dicha corriente pasando por el filamento produce calor por el efecto Joule, que funde el mismo y aporta la energía de activación necesaria para la reacción (energía de ignición). El recipiente debe estar sumergido en agua, de la cual se mide la temperatura a intervalos regulares de tiempo.

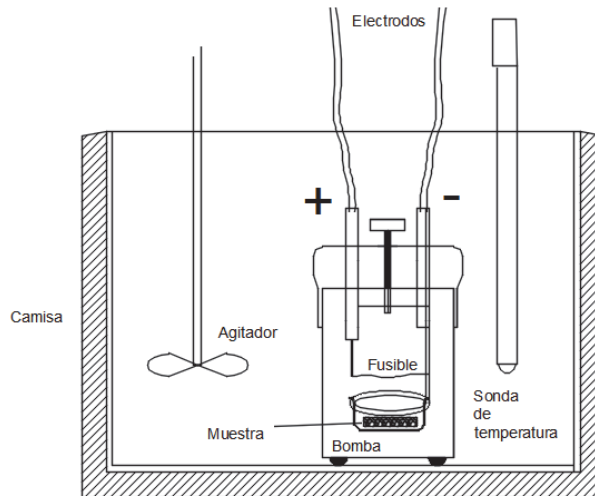


Figura 3.4. Esquema de los calorímetros

Existen dos tipos de calorímetros: *calorímetros adiabáticos* y *calorímetros isoperibólicos*.

En los calorímetros adiabáticos el vaso del calorímetro, que contiene el agua donde se sumerge la bomba, está rodeado de un material aislante, es decir, con una conductividad térmica muy baja, de forma que no existe pérdida de calor al exterior.

En los calorímetros isoperibólicos el vaso del calorímetro está rodeado de un termostato, es decir, un material que modifica su temperatura de forma automatizada al mismo tiempo que lo hace el agua donde está sumergida la bomba, de forma que existe relativamente poca transferencia de calor entre el agua y el exterior. En estos calorímetros cada ensayo se divide en tres etapas: Etapa preliminar en la que el agua equilibra su temperatura con la del termostato (Punto 4 de la Figura 3.5); una vez la temperatura del agua y la del termostato son iguales se inicia la etapa principal con la ignición a través del filamento de mecha, registrando un aumento muy rápido de la temperatura del agua hasta que alcanza un valor prácticamente constante; y la tercera etapa es un periodo más o menos prolongado para la evaluación de la inercia de transferencia de calor entre la camisa del termostato y el agua.

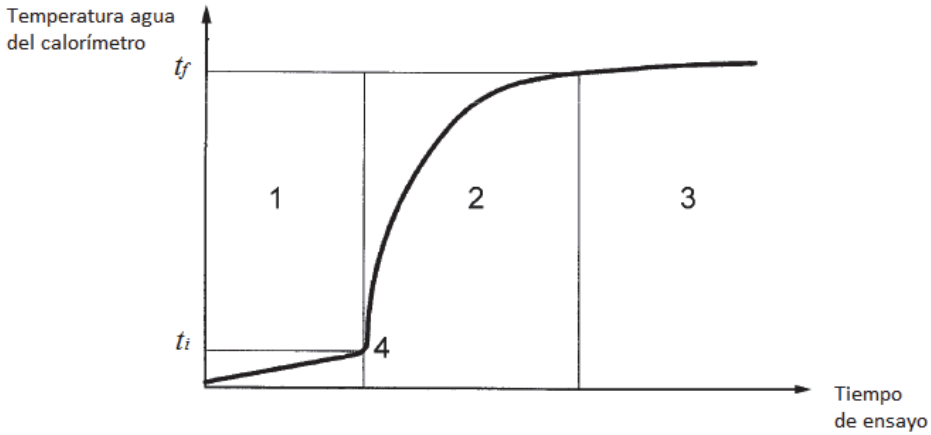


Figura 3.5. Variación de la temperatura del agua en un calorímetro isoperibólico

En ambos tipos de calorímetro el calor desprendido durante la combustión provoca el aumento de la temperatura de los gases internos de la bomba, aumento de temperatura de la propia bomba, y el aumento de la temperatura del agua. En la mayoría de los calorímetros sólo se mide la temperatura del agua, siendo la temperatura del interior de la bomba y del recipiente en principio desconocidas. Por esta razón debe medirse la *capacidad calorífica específica del calorímetro*, ε , la cual se define como el calor aportado para conseguir una variación unitaria de temperatura en el agua del vaso (J/K). La cual responde a la ecuación (3.7), donde $(t_f - t_i)$ es el incremento temperatura registrado y $Q_{bomb.}$ es el calor generado en el interior de la bomba, el cual es la suma del calor de combustión de la muestra, el calor de fusión o combustión de la mecha, y el calor desprendido por la formación de ácido nítrico a partir del nitrógeno y el agua desprendidas. Para la determinación de ε se precisa la calibración del sistema mediante un una sustancia patrón, que suele ser ácido benzoico.

$$\varepsilon = \frac{Q_{bomb.}}{t_f - t_i} \quad (3.7)$$

En los calorímetros isoperibólicos, dado que la medición de la temperatura del agua y la regulación de la temperatura del termostato no es inmediata, la norma EN 14918 establece la corrección Regnault-Pfaudler (Ec. 3.8) en el incremento de temperatura registrado, para compensar las pérdidas de calor existente.

$$\varepsilon = \frac{Q_{bomb.}}{\theta} \quad (3.8)$$

Donde:

$$\theta = t_f - t_i - \Delta t_{ext}$$

$$\Delta t_{ext} = (\tau_f - \tau_i) \cdot g_f + \frac{g_i - g_f}{t_{mf} - t_{mi}} \left[n \cdot t_{mf} - \frac{t_i + t_f}{2} - \sum_{k=1}^{k=n-1} t_k \right]$$

τ_i es el tiempo en el que se inicia la etapa principal en minutos

τ_f es el tiempo al final de la etapa principal en minutos

g_i es la velocidad de desviación de la etapa preliminar en K/min

g_f es la velocidad de desviación de la etapa posterior a la principal en K/min

t_i es la temperatura al final de la etapa principal K

t_f es la temperatura al comienzo de la etapa principal K

t_{mi} es la temperatura media de la etapa preliminar en K

t_{mf} es la temperatura media de la etapa posterior en K

n es el número de minutos la etapa principal

t_k son las sucesivas lecturas de temperatura tomadas a intervalos de un minuto durante la etapa principal.

En la práctica el valor de ε no es una constante, sino que presenta cierta variabilidad, por ello en la calibración se determina una recta de regresión

$$\varepsilon = a + b \cdot \theta$$

Una vez calibrada la capacidad calorífica efectiva, el poder calorífico bruto a volumen contante (poder calorífico superior) se calculará como:

$$PCS = \frac{\varepsilon \cdot \theta - Q_{ign} - Q_N - Q_S - m_{cod} q_{cod}}{m} \quad (\text{J/kg})$$

Donde:

ε es la capacidad calorífica determinada para el calorímetro

θ es el incremento de temperatura corregido registrado en el agua del calorímetro

Q_{ign} es el calor desprendido para la ignición por la mecha

Para seguir leyendo haga click aquí