

5. Parámetros, unidades y factores de conversión

Para poder determinar la calidad de los *biocombustibles* es preciso describir adecuadamente ciertas propiedades. Las fuentes y productos energéticos se pueden medir por su *masa* o por su peso, o incluso por su *volumen*, pero el factor esencial es su *contenido energético*. Con tal fin es necesario emplear parámetros energéticos mediante unidades uniformes. Esta uniformidad en el registro y la presentación de las unidades originales es una tarea primordial de los estadísticos de la energía y los montes, para que sea posible analizar y comparar cantidades. Se recomienda que, en el plano internacional, y a ser posible en el nacional, se presenten las estadísticas relativas a la energía y los montes con arreglo al Sistema Internacional de Unidades (cuya abreviatura oficial es SI).⁷ Además, al registrar estadísticamente el consumo de carbón vegetal, hay que tomar en consideración el rendimiento de los procesos de carbonización.

5.1 Propiedades de los dendrocombustibles

En la práctica, las propiedades más interesantes de los biocombustibles son *la humedad*, *el contenido energético*, *la masa*, *el volumen* y *la densidad*, así como *la forma* y *el tamaño de las partículas* (*granulometría*) y *la ceniza total*. En el cuadro 9 pueden verse datos relativos a los principales biocombustibles.

La importancia de otras propiedades de los *biocombustibles* (contenido de diferentes elementos, *fusibilidad de la ceniza*) depende del tipo de *biocombustible sólido*, de las características de la instalación de combustión, del control de emisiones, etc. En el caso de la mayoría de los *dendrocombustibles* actualmente utilizados, esas propiedades no influyen significativamente en la utilización de biocombustibles y solamente deberían tomarse en consideración en determinadas circunstancias.

5.1.1 Humedad

La *humedad* de los *biocombustibles sólidos* varía mucho, porque la *humedad* de los *combustibles derivados de la madera* depende del momento de la recolección, de la ubicación, del tipo y la duración del almacenamiento, así como de la preparación del *combustible*. Oscila entre menos del 10 % (*subproductos de la industria de la madera*) y un 50 % (*astillas de madera forestal*). La *humedad* tiene que ver no solamente con el *poder calorífico* sino también con las condiciones de almacenamiento y la temperatura de combustión, así como con el volumen de los gases resultantes de la combustión.

Suelen emplearse dos métodos (*base seca* y *base húmeda*) para especificar la *humedad de los biocombustibles sólidos*. Procede distinguir entre ellas, sobre todo cuando la *humedad* es alta.

⁷ Véase Oficina Internacional de Pesas y Medidas, en <http://www.bipm.fr/en/home/>

$$Humedad_{base\text{-}anhidra} = 100x \left(\frac{PesoEnHúmedo - PesoEnSeco}{PesoEnSeco} \right) \quad (1)$$

$$Humedad_{base\text{-}húmeda} = 100x \left(\frac{PesoEnHúmedo - PesoEnSeco}{PesoEnHúmedo} \right) \quad (2)$$

En estas expresiones, el **peso expresado sobre base húmeda** se refiere a la madera quemada tal como se encuentra. El **peso sobre base seca es un biocombustible** secado según un procedimiento normalizado. Los valores son diferentes y su falta de aclaración puede generar grandes errores de cálculo. Por tal motivo es necesario indicar sobre qué base se ha realizado la medición de la *humedad* del biocombustible sólido considerado. En la práctica, la *humedad* de la mayoría de los *biocombustibles sólidos* viene expresada sobre base seca.

Cuadro 10: Contenido de energía y concentraciones de algunos elementos de una biomasa no tratada, en comparación con el carbón

Tipo de biomasa	Humedad sobre base seca%	Poder calorífico neto MJ/kg	Cenizas sobre base seca %	Compuestos volátiles
Madera de picea (con la corteza)	20-55	18,8	0,6	82,9
Madera de haya (con la corteza)	20-55	18,4	0,5	84,0
Madera de chopo (rotación corta)	20-55	18,5	1,8	81,2
Madera de sauce (rotación corta)	20-55	18,4	2,0	80,3
Corteza de coníferas		19,2	3,8	77,2
Paja de centeno		17,4	4,8	76,4
Paja de trigo	15	17,2	5,7	77,0
Paja de triticale	15	17,1	5,9	75,2
Paja de cebada	15	17,5	4,8	77,3
Paja de colza	15	17,1	6,2	75,8
Paja de maíz	15	17,7	6,7	76,8
Paja de girasol	15	15,8	12,2	72,7
Paja de cáñamo	15	17,0	4,8	81,4
Paja de arroz	15	12,0	4,4	
Cascarilla de arroz		14,0	19,0	
Cáscara de maní (cacahuete)	3-10	16,7	4-14	
Cáscara de café	13	16,7	8-10	
Cápsula de algodón	5-10	16,7	3	
Cáscara (coir) de coco	5-10	16,7	6	
Cáscara del fruto de la palma de aceite	55	8,0	5	
Centeno entero		17,7	4,2	79,1
Trigo entero		17,1	4,1	77,6
Triticale entero		17,0	4,4	78,2
<i>Miscanthus</i>		17,6	3,9	77,6
Centeno en grano		17,1	2,0	80,9
Trigo en grano		17,0	2,7	80,0
Triticale en grano		16,9	2,1	81,0
Colza en grano		26,5	4,6	85,2
Aceitunas (residuo de prensado)	15-18	16,7	3	
Mazorca de maíz	15	13,4	15-20	
Tallo de la caña de azúcar (bagazo)	40-50	8,0	4,0	80
Heno de orígenes varios		17,4	5,7	75,4
Residuos verdes mantenimiento de arcenes		14,1	23,1	61,7
Antracita		29,7	8,3	34,7
Lignito	50	20,6	5,1	52,1

Fuente: Smith, K. R.; Kaltschmitt, M.; Thrän, D. 2001 [19].

5.1.2 Contenido energético

En la mayoría de los casos, el *poder calorífico neto* es lo que describe mejor el *contenido energético* de los *biocombustibles*. Influye mucho el contenido de la *humedad* del *biocombustible* considerado, así como el contenido de *hidrógeno* en el *combustible*. El *poder calorífico neto* real de una *biomasa* o *biocombustible* que contiene un porcentaje de agua conocido puede calcularse a partir del *poder calorífico neto* de la *biomasa* seca absoluta (que figura en la documentación sobre el particular). En la ecuación 3, $H_{v(w)}$ designa el *poder calorífico neto* (en MJ/kg) de la *biomasa* en un nivel específico de

la *humedad*, $H_{u(w)}$ el *poder calorífico neto* de la *biomasa* totalmente seca, y w la *humedad total* (en %). La constante 2,44 corresponde a la energía de evaporación del agua.

$$H_{u(w)} = [H_{u(w)} (100 - w) - 2,44 w] / 100 \quad (3)$$

La figura 7 indica que el *poder calorífico neto* de la *leña* disminuye desde unos 18,5 MJ/kg al aumentar el contenido de *humedad* del biocombustible. El *poder calorífico neto* es cero cuando la *humedad total* es aproximadamente del 88 %. Normalmente, la *humedad* de la *madera* secada al aire oscila entre el 12 y el 20 %, lo cual supone un *poder calorífico* de 13 a 16 MJ/kg. La *madera* recién recolectada se caracteriza por una *humedad* sobre base seca del 50 % o más, por lo que el *poder calorífico neto* es bajo.

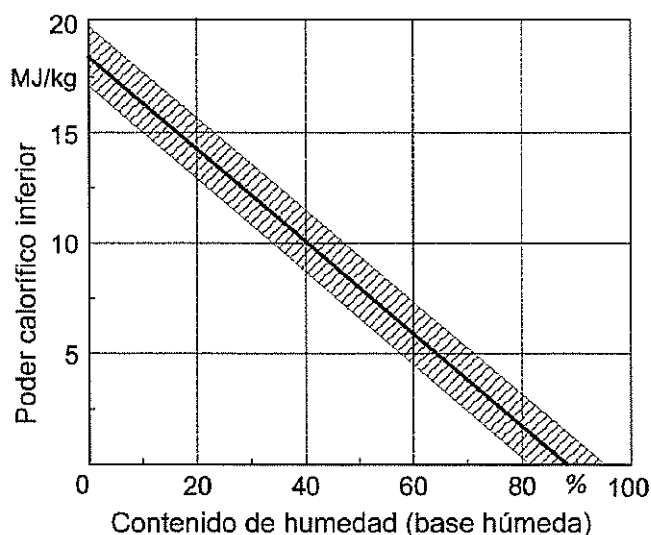


Figura 7: Poder calorífico neto de la madera en función de la humedad total

Fuente: Smith, K.R.; Kaltschmitt, M.; Thrän, D. 2001 [19].

5.1.3 Masa, volumen y densidad

Hay dos relaciones básicas para la evaluación de la bioenergía, teniendo presente que tanto el **poder calorífico** como la **densidad** dependen principalmente de la humedad del combustible de madera.

$$Energía = Masa \times Poder\ Calorífico \quad (4)$$

$$Masa = Volumen \times Densidad \quad (5)$$

Parámetros principales:

Masa. Algunos *combustibles derivados de la madera*, como el *carbón vegetal* y el *licor negro*, se miden en unidades de masa. Las unidades principales de masa utilizadas para medir los productos energéticos son el kilogramo y la tonelada métrica. La tonelada métrica (1 000 kg) es la unidad utilizada habitualmente.

Volumen. Se utilizan habitualmente unidades de *volumen* para medir la madera en rollo y la *leña*. Las unidades SI⁸ de volúmen son el litro y el kilolitro, que equivale al metro cúbico. El estéreo o volumen apilado, que se considera habitualmente equivalente a 0,65 metros cúbicos sólidos, se ha utilizado frecuentemente en el pasado para medir el *volumen* de los *combustibles de madera*, mientras que en la actualidad suele medirse la madera y la *leña* con unidades de **volumen sólido (o volumen real)**, en general el metro cúbico (m³). En general, *los pellets* y *las astillas de madera* se miden en unidades de **volumen aparente**, habitualmente se expresa en metros cúbicos (m³). En el cuadro 11 figuran los factores típicos de conversión de la *masa*, el *volumen sólido* y el *volumen aparente* en el caso de la *leña*.

Cuadro 11: Factores de conversión referentes a la leña

	masa (tonelada métrica)	volumen sólido (m ³)	volumen aparente (m ³)
masa (tonelada métrica)	1,0	1,3 – 2,5	4,9
volumen sólido (m ³)	0,4 – 0,75	1,0	2,4
volumen aparente (m ³)	0,2	0,6	1,0

Densidad: La *densidad* de la madera (esto es, el peso por unidad de volumen) varía sensiblemente en función de las diferentes especies y tipos de madera. Las especies utilizadas habitualmente como *leña* oscilan entre los 650 y los 750 kg/m³. Cabe destacar la influencia de la *humedad total* en la *densidad* de la madera. Cuanto más agua haya por unidad de peso tanto menor será la *leña*. Por ello, es imperativo precisar con exactitud la *humedad total* al establecer el peso de la *leña*. Hay dos tipos diferentes de *densidad* de interés para la utilización de *biocombustibles sólidos*:

la densidad de las partículas describe la *densidad* de la propia materia del biocombustible considerado y es de interés para la realización del cálculo de los procesos de combustión (evaporación, densidad energética, etc.), ciertos aspectos de la alimentación (de aparatos neumáticos, por ejemplo) y del almacenamiento. En el caso de las especies que se utilizan habitualmente como *leña*, la *densidad de las partículas* oscila entre los 650 y los 750 kg/m³. La *densidad de la partícula* solo puede variarse produciendo *biocombustibles comprimidos* y sirve para describir la calidad de esos productos (una *densidad de la partícula* alta denota la gran calidad de los pellets);

la densidad aparente denota la proporción entre la materia seca y el *volumen aparente* e influye en el *volumen* necesario con fines de transporte y de almacenamiento. Es muy importante a efectos de comercio y de suministro. La *densidad aparente* varía mucho. En el cuadro 12 se indican la *densidad aparente* típica de los *biocombustibles*.

⁸ Sistema Internacional de Unidades.

Cuadro 12: Densidad aparente típica de los biocombustibles

biocombustibles leñosos		densidad aparente (kg/m ³)	biomasa herbácea		densidad aparente (kg/m ³)
trozas (madera apilada)	haya	460	rollos	paja	85
	píceas	310		heno	100
astillas	coníferas	195	pacas	paja, <i>Miscanthus</i>	140
	frondosas	260		heno	160
corteza	coníferas	205		plantas enteras	190
	frondosas	320	biocombustible desmenuzado	paja, <i>Miscanthus</i>	70
serrín		170		plantas enteras	150
virutas		90			
pellets de madera		600	pellets de paja		500

5.1.4 Ceniza total y temperatura de fusión de la ceniza

El contenido de cenizas de un *biocombustible sólido* depende del tipo de *biomasa* y de las *impurezas*, tiene que ver con el *poder calorífico* y determina si el *biocombustible* es utilizable o no en una instalación de combustión dada. El contenido de cenizas se mide siempre sobre base *seca*, lo cual remite al residuo sólido que queda después de una combustión completa. El contenido de cenizas de la *leña* suele ser de un 1 %, más o menos, y puede ser mucho mayor en el caso de ciertas especies de *agrocombustibles*. Esto repercute en el valor energético de los *biocombustibles*, porque las sustancias que componen la *ceniza* no suelen tener ningún valor energético. Así por ejemplo, un *dendrocombustible seco* con un 4 % de *ceniza total* tendrá un 3 % menos de energía que una *biomasa* con un 1 % de *ceniza total*.

En el caso de ciertos *biocombustibles*, la *temperatura de fusión de la ceniza* suele ser un factor determinante de la combustión, ya que una temperatura elevada suscita la fusión de la ceniza y la expansión de las escorias, lo cual trae consigo averías y gastos de mantenimiento. La mayoría de los combustibles sólidos lignocelulósicos como la *biomasa herbácea* y de los cultivos *energéticos* poseen una temperatura baja de fusión de la ceniza, mientras que en el caso de la *biomasa leñosa* no hay normalmente problemas de fusión de ceniza.

5.1.5 Forma y tamaño de las partículas

La forma, el tamaño y la *distribución de las partículas según su tamaño*, o *distribución granulométrica*, influyen en el transporte y en la manipulación en las instalaciones de conversión. En la práctica, la forma y el tamaño varían mucho, por ejemplo entre los *biocombustibles molidos* (*harina de madera*), los *biocombustibles comprimidos* (pellets de paja), los *biocombustibles cortados* (astillas) y los *biocombustibles empacados* (balas de paja). Esas diferentes modalidades requieren una maquinaria específica para la producción, el transporte, el almacenamiento, la alimentación y la combustión. Una gran variedad de *tamaños de las partículas* puede descomponer los dispositivos de alimentación totalmente automáticos por un fenómeno de "puentes", obstrucción o adherencia.

5.2 Rendimientos de los procesos de carbonización

Cuando se consigna estadísticamente la conversión de *leña* (o de *combustibles de madera*) en *carbón vegetal*, es necesario tener en cuenta tres aspectos principales: la *densidad* de la madera, el *contenido de humedad* de la madera y el medio de producción del *carbón vegetal*. En el cuadro 13 se presenta la cantidad de carbón vegetal derivado de la *leña* utilizando diferentes tipos de horno

(FAO, *Woodfuel Survey*, 1983). En sus estadísticas (FAOSTAT), la FAO maneja un factor de conversión de 165 kg de *carbón vegetal* producidos a partir de un metro cúbico de *leña*. En otras palabras, se necesitan aproximadamente 6 kg de leña para la producción de 1 kg de carbón vegetal.

Cuadro 13: Leña necesaria para la producción de carbón vegetal (m³/tonelada de carbón)

Tipo de horno	Humedad de la leña (% base seca)					
	15	20	40	60	80	100
Horno parva	10	13	16	21	24	27
Horno de acero portátil	6	7	9	13	15	16
Horno de ladrillo	6	6	7	10	11	12
Retorta	4,5	4,5	5	7	8	9

5.3 Factores de conversión

Los factores principales que han de manejarse para la preparación de balances *bioenergéticos* con diferentes tipos de *biocombustibles*, son los que figuran en el cuadro 14. Éste presenta valores de *densidad* (necesarios únicamente cuando se da el *volumen* de *biocombustible*) y de *poder calorífico* para un contenido de *humedad* típico. Vale la pena señalar que el objetivo principal consiste en calcular el valor energético del flujo de los *biocombustibles expresados en unidades compatibles de volumen* o de *masa*. A tal efecto se aconseja utilizarse las ecuaciones (1) y (2) anteriores. Ahora bien, habida cuenta de las fuertes variaciones del *poder calorífico* y del *volumen en función* del contenido de *humedad del biocombustible* en los balances energéticos conviene usar el *poder calorífico de los biocombustibles sobre base seca y sin cenizas*.

Cuadro 14: Parámetros básicos utilizados en los balances bioenergéticos

Biocombustible	Datos primarios	Densidad (t/m ³)	Poder calorífico neto (MJ/kg)	Humedad (%, base seca)
Comb. de madera directos	Volumen	0,725	13,8	30
Carbón vegetal	Masa, Volumen		30,8	5
Comb. de madera indirectos	Masa, Volumen	0,725	13,8	
Comb. de madera recuperados	Masa, Volumen	0,725		
Comb. derivados de la madera	Masa	-		
Licor negro	Masa			
Metanol	Masa		20,9	0
Biocombustibles no forestales	Masa	-		
Etanol	Masa		27,6	0
Subproductos agrícolas	Masa		(véase el cuadro 9)	
Subproductos de origen animal	Masa	-	13,6	
Subproductos agroindustriales	Masa	-		
Bagazo	Masa	-	8,4	40
Desechos de origen municipal	Masa	-	19,7	-

* Al contabilizar el licor negro como combustible de madera, puede suponerse que con una tonelada de pasta de celulosa química se obtiene una cantidad de licor equivalente a 2,27 m³ de combustible de madera, en valor energético.

Fuente: FAO, 1997 [10].