

Combustión de biomasa: conceptos, tecnologías y aplicaciones en la agroindustria de la palma de aceite*

Biomass Combustion: Concepts, Technologies and Applications in the Oil Palm Agroindustry

CITACIÓN: Barrera, J. C., Ramírez-Contreras, N. E., & Garcia-Nunez, J. A. (2018). Combustión de biomasa: conceptos, tecnologías y aplicaciones en la agroindustria de la palma de aceite. *Palmas*, 39(4), 24-44.

PALABRAS CLAVE: combustión, biomasa, palma de aceite, lecho fluidizado, lecho fijo.

KEYWORDS: Combustion, biomass, palm oil, fluidized bed, fixed bed.

RECIBIDO: agosto de 2018.

APROBADO: septiembre de 2018.

* Artículo de investigación científica y tecnológica.

JUAN CAMILO BARRERA HERNÁNDEZ
Auxiliar de investigación. Programa de
Procesamiento, Cenipalma

NIDIA ELIZABETH RAMÍREZ CONTRERAS
Asistente de investigación. Programa de
Procesamiento, Cenipalma

JESÚS ALBERTO GARCÍA NÚÑEZ
Coordinador Programa de
Procesamiento, Cenipalma
jgarcia@cenipalma.org

Resumen

La combustión de la biomasa es un proceso esencial para la generación de la energía térmica demandada por las plantas de beneficio. Por lo tanto, tener claridad sobre los conceptos principales de este importante proceso es indispensable para gestionar un control eficiente en la operación de un sistema de combustión. Este artículo explica la definición de la combustión y la ruta de combustión de biomasa e identifica y describe las propiedades de la combustión: físicas, químicas, térmicas y minerales. Además, se exponen las generalidades de la combustión de lecho fijo, donde se presentan las configuraciones y tecnologías disponibles. Posteriormente, se realiza una revisión de la tecnología de lecho fluidizado, identificando tres referentes: lecho fluidizado circulatorio, lecho fluidizado burbujeante y lecho fluidizado presurizado. Se muestran las generalidades de

la combustión de combustible pulverizado, la cual es una tecnología habitualmente usada en co-combustión (*co-firing*). Se realiza un análisis comparativo entre las tecnologías estudiadas, resaltando las ventajas y desventajas de cada una de estas de acuerdo con sus principios de operación. Por último, se realiza una estimación de las oportunidades de mejora a través de la generación de excedentes de energía térmica, estableciendo eficiencias de combustión para diferentes flujos de fibra y cuesco.

Abstract

Biomass combustion is an essential process for generating thermal energy required for palm oil mills operation. Therefore, clarity on the main concepts related for such process is essential in order to manage an efficient control in the operation of a combustion system. This paper addresses combustion-related concepts and the pathway for biomass combustion. In addition, properties of the combustion process are identified and described (*i.e.* physical, chemical, thermal, and mineral). Generalities of fixed-bed combustion are explained, where configurations and available technologies are also presented. Subsequently, a review of fluidized bed technology is made, identifying three main referents: circulating fluidized bed, bubbling fluidized bed, and pressurized fluidized bed. Generalities of pulverized fuel combustion, a technology commonly used in co-firing, are presented as well. Moreover, a comparative analysis between the studied technologies is carried out for highlighting their advantages and disadvantages according to their operating principles. Finally, by establishing combustion efficiencies for different fiber and shell flows, we develop an estimation of the improvement opportunities through the generation of thermal energy surpluses.

Introducción

La biomasa se puede definir como energía solar acumulada en diferentes formas (Carbon Trust, 2008), es decir, materiales vegetales y animales, tales como maderas de bosques, cultivos, algas, materiales sobrantes de origen agroindustrial, procesos forestales y desechos animales y humanos (Carbon Trust, 2008; Hupa, Karlström, & Vainio, 2016; Pongrácz, 2011; Saidur *et al.*, 2011). Históricamente, la humanidad ha utilizado la biomasa como fuente de energía, pasando de la utilización de pequeñas cantidades de madera para la cocción de alimentos a la implementación de la biomasa en su conversión en energía térmica o eléctrica, e incluso en portadores energéticos como combustibles de alto poder calorífico (biocarbón, biogás o biocombustibles), usados principalmente en instalaciones industriales o residenciales (Wolf & Dong, 2013). Precisamente, el método de conversión más antiguo y común usado para el aprovechamiento de la energía fija en la biomasa es por medio del

proceso de combustión, el cual se define como una reacción química en la que se oxida un combustible y se libera una gran cantidad de energía (Cengel & Boles, 2011).

Por décadas, la combustión de la biomasa ha sido la ruta de obtención de la energía requerida por el proceso de extracción de aceite de palma. Actualmente, la generación del vapor utilizado se da por la combustión de la misma biomasa generada durante el proceso de extracción de aceite. Adicional a esto, la energía obtenida de la combustión no solo se limita a la generación de energía térmica, sino que en algunos casos es usada en procesos de cogeneración para la producción de energía eléctrica (Ponce-Arrieta, Silva-Lora, Yañez, & Castillo, 2009).

La utilización del vapor es indispensable en el proceso de extracción de aceite de palma. Por lo tanto, la generación de este recurso es un punto crítico en las plantas de beneficio. De acuerdo con mediciones recientemente realizadas por Cenipalma, las calderas

son los consumidores de mayor demanda de energía eléctrica, ya que pueden llegar a utilizar hasta el 25 % de la energía eléctrica del proceso (Barrera, Ramírez-Contreras, García-Núñez, & Guevara, 2016). Adicionalmente, el 50 % del agua utilizada es destinada a la generación del vapor (Cenipalma, 2014).

El creciente interés por el uso racional y eficiente de la energía, así como la exploración de energías alternativas que contribuyan a reducir el impacto ambiental de los procesos industriales, hacen que la biomasa obtenga un atractivo superior. Además, se crea la necesidad de hacer un uso eficiente de este producto con la intención de utilizar solo lo necesario para el proceso y emplear los excedentes como parte de un modelo de negocio alternativo para la agroindustria de la palma de aceite. Este artículo se enfoca en identificar y analizar conceptos utilizados habitualmente en la generación de vapor a través del proceso de combustión; aunque cabe decir que no se hará un énfasis en el diseño y operación de calderas.

En la primera parte del documento se explica el fenómeno de la combustión de la biomasa, seguido de las propiedades que caracterizan la combustión. En la segunda parte se revisan las diferentes tecnologías de combustión de biomasa (lecho fijo, lecho fluidizado y *co-firing*). Finalmente, se realiza una revisión de las tecnologías usadas actualmente en las plantas de beneficio para generar la energía térmica demandada por el proceso de extracción de aceite. Además, se incluye una estimación de la cantidad de biomasa disponible para diferentes rangos de eficiencia de combustión en la caldera.

Combustión de biomasa

La combustión de la biomasa involucra varios aspectos que pueden afectar directamente su eficiencia y utilidad, la cual de las propiedades de la biomasa y el tipo de aplicación de la combustión, como en el caso de generación de vapor saturado o sobrecalentado, ya que la tecnología a utilizar interferirá directamente en la eficiencia del proceso.

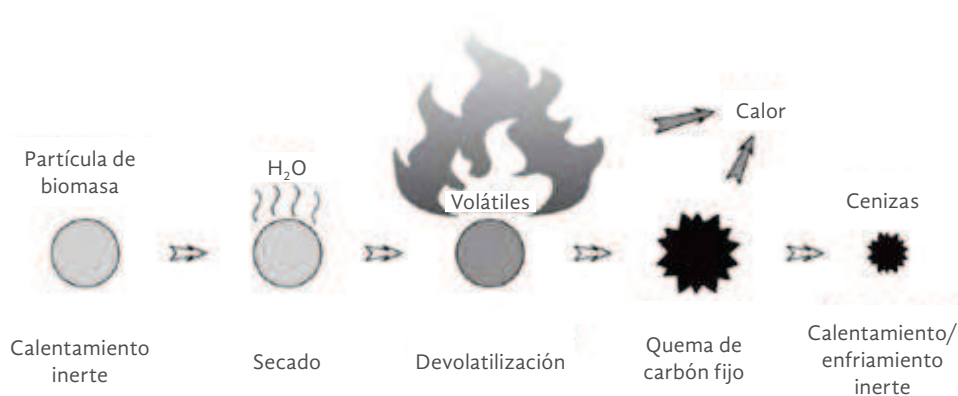
La biomasa, al tratarse de un combustible sólido, posee la misma ruta de combustión que el carbón, por lo que se distinguen las etapas de secado, devolatilización, gasificación, combustión y la oxidación de la fase gaseosa (Nussbaumer, 2003). El tiempo entre los cambios de cada reacción dependerá del tamaño del combustible y sus propiedades, así como de la temperatura y de las condiciones de combustión (Lassi, 2013).

En la Figura 1 el secado corresponde a la etapa en que el contenido de humedad es evaporado. La volatilización es el proceso en el cual se libera una gran variedad de productos gaseosos a través de la descomposición del combustible (Basu, 2006). Los gases volátiles desprendidos son hidrocarburos que son quemados posteriormente. Tras la devolatilización, el carbón fijado en la biomasa es quemado, liberando así el calor hasta quedar reducido en ceniza, la cual está compuesta principalmente por los minerales presentes en la biomasa.

La combustión de biomasa incorpora una serie de reacciones químicas en las que el carbón es oxidado a dióxido de carbono y el hidrógeno es oxidado a agua (Demirbas, 2005). La quema de la biomasa requiere de

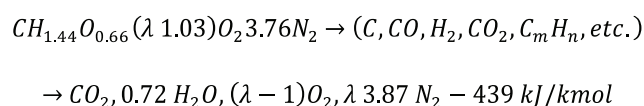
Figura 1. Ruta de combustión de una partícula de biomasa.

Fuente: adaptado de Mandø (2013).



un agente oxidante; con mayor frecuencia es usado el oxígeno contenido en el aire debido a su abundancia y su costo nulo. El principal parámetro que se busca controlar en la combustión es el exceso de aire (λ), el cual describe la tasa de aire en exceso requerida por la cantidad estequiométrica, expresada en términos de aire estequiométrico como el exceso de aire porcentual o aire teórico porcentual (Cengel & Boles, 2011).

La combustión de la biomasa puede ser expresada por una ecuación estequiométrica aproximada, la cual simula los productos derivados de la combustión. Existen métodos analíticos que estiman la cantidad de productos liberados cuando la combustión es incompleta (Jenkins, Baxter, Miles, & Miles, 1998). La siguiente reacción es típica de la biomasa, teniendo en cuenta solamente los contenidos iniciales de los elementos carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), constituyentes primarios de la biomasa. Los componentes del combustible, como sodio (Na), potasio (K), cloro (Cl), etc., no son considerados (Nussbaumer, 2003):



donde $CH_{1.44}O_{0.66}$ describe la composición promedio de la biomasa usada típicamente para combustión, por ejemplo, madera, paja o similares. Las emisiones causadas por una combustión incompleta son el principal resultado de las siguientes operaciones:

- La mezcla inadecuada del aire de combustión y combustible en la cámara de combustión provocada por las secciones locales ricas en combustión.
- Falta suficiente de oxígeno.
- Temperaturas de combustión muy bajas.
- Tiempos de residencia muy cortos.

De acuerdo con la Tabla 1, las propiedades de la combustión de la biomasa pueden ser compiladas y agrupadas en cuatro grupos: físicas, químicas, térmicas y minerales (Demirbas, 2004). La Tabla 1 presenta algunas de las propiedades de combustión típicas para la biomasa de palma de aceite, mientras que la Tabla 2 muestra los rangos promedio para las propiedades de combustión de la biomasa de palma de aceite.

Tabla 1. Propiedades de la combustión de biomasa.

Físicas	Químicas	Térmicas	Minerales
<ul style="list-style-type: none"> • Densidad de bulbo • Densidad energética 	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis último • Análisis próximo • Análisis de productos de pirólisis • Poder calorífico • Contenido de humedad 	<ul style="list-style-type: none"> • Calor específico • Conductividad térmica • Emisividad • Temperatura • Grado de degradación térmica 	<ul style="list-style-type: none"> • Cenizas • Compuestos inorgánicos

Fuente: adaptado de Demirbas (2004).

Tabla 2. Propiedades de combustión para biomasa de palma de aceite.

Biomasa	Contenido de humedad (% b.s. ¹)	Contenido de cenizas (% b.s.)	Contenido de materia volátil (% b.s.)	Poder calorífico superior (MJ kg ⁻¹)
Tusa	67.00 ± 1.41	4.60 ± 0.50	87.04 ± 0.42	18.88 ± 0.74
Fibra	37.09 ± 2.06	6.10 ± 0.94	84.91 ± 0.62	19.06 ± 0.32
Cuesco	12.00 ± 1.08	3.00 ± 1.27	83.45 ± 0.68	20.09 ± 0.43

¹ En base seca.

Fuente: adaptado de Loh (2016).

Propiedades físicas

La variable física de mayor importancia de la biomasa es su densidad energética, la cual expresa la cantidad de energía contenida en una unidad de volumen. Esta se calcula a partir de la multiplicación de la densidad de bulbo (medida de masa de muchas partículas de una material, dividida sobre el volumen que ocupan) y el poder calorífico de la biomasa (Carbon Trust, 2008). La densidad energética influye en la planeación y el control de los volúmenes de almacenamiento y del control en el suministro del combustible hacia la caldera (Khan, De-Jong, Jansens, & Spliethoff, 2009).

Propiedades químicas

Las propiedades químicas se centran en el estudio de la caracterización del combustible y los subproductos de la combustión. A continuación se describen los parámetros esenciales para determinar la calidad de la biomasa.

Análisis último

El análisis último de un combustible es el registro del porcentaje en peso de los elementos que lo componen. Básicamente, es un desglose de los componentes elementales del combustible. Elementos como C, H, O, N y S son proporcionados en este análisis.

Análisis próximo

El análisis próximo de una biomasa determina los porcentajes de material volátil, carbón fijo y cenizas. La materia volátil corresponde a la porción de combustible que es gasificada por acción pirolítica y es responsable por las flamas de la combustión. El carbón fijo es la porción del combustible no pirolizado, el cual es quemado en forma sólida (Bushnell, 1989).

Productos de pirólisis

Los productos de pirólisis dependerán de la naturaleza y las condiciones de proceso de la biomasa; estos productos pueden ser adecuados para varias aplicaciones en un proceso netamente pirolítico. Por medio de téc-

nicas como la cromatografía de gases o la espectrometría de gases se han identificado cientos de compuestos orgánicos en los productos de pirólisis (Kanaujia *et al.*, 2014), los cuales han venido siendo investigados como generadores potenciales de combustibles y otros productos de mayor valor agregado (García-Pérez *et al.*, 2008; Hoekstra *et al.*, 2011).

Poder calorífico

El poder calorífico es la cantidad de energía liberada por un combustible durante una combustión completa. Dependiendo de la humedad del combustible, el poder calorífico recibe el nombre de poder calorífico superior (PCS o HHV, por sus siglas en inglés) cuando el agua producto de la combustión está en estado líquido (Carbon Trust, 2008).

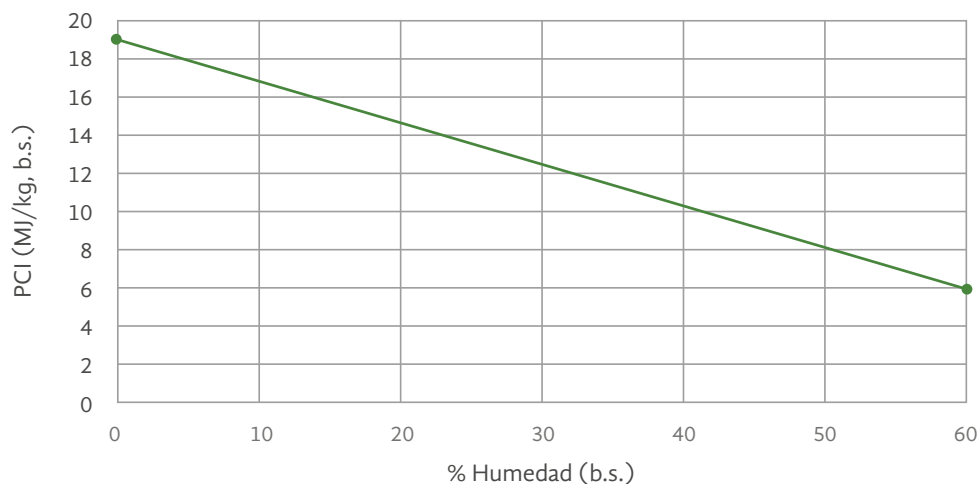
Cuando el agua está en estado gaseoso, el poder calorífico se denomina poder calorífico inferior (PCI o LHV, por su denominación en inglés, *Lower Heating Value*). Los poderes caloríficos para la biomasa usualmente varían entre los 18 y los 22 MJ/Kg en base seca (Van-Loo, 2008). Como se mencionaba anteriormente, el contenido de humedad en la biomasa es una unidad crítica en la combustión, dado que está relacionado directamente con la cantidad de energía que el combustible puede entregar al final de la combustión. La Figura 2 presenta una tendencia en la disminución del PCI para un combustible con diferentes humedades. En términos prácticos, para la liberación de una misma cantidad de energía con una humedad del 10 %, se requeriría más del doble de la biomasa a una humedad del 50 %.

Contenido de humedad

La humedad contenida en la biomasa varía dependiendo del tipo de biomasa, pretratamiento y almacenamiento. En algunos casos, la biomasa es secada con la finalidad de aumentar la eficiencia de la combustión. El incremento de la humedad reduce la máxima temperatura de combustión posible e incrementa la necesidad del tiempo de residencia en la cámara de combustión, lo que deriva en la reducción del espacio para la prevención de las emisiones resultantes de una combustión incompleta (Saidur *et al.*, 2011).

Figura 2. Poder calorífico inferior en función del porcentaje en humedad (b.s.) para un combustible con una composición de 50 % carbono, 6 % hidrógeno y 44 % oxígeno.

Fuente: adaptado de Van-Loo (2008).



Propiedades térmicas

Las propiedades térmicas de la combustión son los parámetros estudiados para aprovechar el calor liberado por la combustión. Los siguientes son los factores claves para diseñar un equipo:

Calor específico

El calor específico es la energía necesaria para elevar en un grado la temperatura por unidad de una masa de biomasa. Esta propiedad es importante para cuantificar la energía requerida para alcanzar el punto de ignición de la biomasa (Cengel & Boles, 2011), en sistema internacional se expresa en unidades de $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$.

Conductividad térmica

Se define como la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario de un material (biomasa) por unidad de área, por unidad de diferencia de temperatura.

Emisividad

La emisividad es una propiedad térmica que representa la razón entre la radiación emitida por una superficie a una temperatura dada y la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura (Cengel, 2007).

Degradación térmica

La degradación térmica o devolatilización es el término dado al punto en el que el material sólido del combustible se convierte en gases volátiles, cenizas y alquitranes.

Propiedades minerales

Las propiedades minerales hacen alusión al contenido de cenizas y materiales inorgánicos de la biomasa. El contenido de ceniza de las diferentes biomásas varía en un amplio rango desde 0,5 % b. s. hasta 12 % b. s. (Van-Loo, 2008).

Cenizas

En la composición de ceniza hay principalmente SiO_2 y CaO , y, en menor proporción, Mg , Al , K y P . Durante la combustión las cenizas sufren varios cambios químicos y físicos, resultado de los procesos de segregación, evaporación, precipitación, nucleación y coalescencia. La ceniza resultante tiene un amplio espectro de tamaños, formas y composiciones. Estas características dependen de muchos factores, principalmente, de la morfología y composición química del combustible (Demirbas, 2002). Un alto contenido de cenizas promueve efectos corrosivos en las calderas, por lo tanto, el contenido de cenizas en la biomasa se utiliza como parámetro de diseño de la cámara de combustión. Estudios demuestran que el contenido de cloro

tiene un efecto catalítico que conduce a la disociación del acero en tuberías de intercambiadores de calor, incluso cuando las temperaturas de los tubos son bajas (100-150 °C) (Nunes, Matias, & Catalão, 2016).

La cantidad de ceniza incluida en una biomasa altera el poder calorífico de esta; asimismo, puede causar problemas por escoriación¹ (Saidur *et al.*, 2011). Algunas biomasa agroindustriales pueden tener trazas con altos contenidos de ceniza, así como cloruros y compuestos con potasio (sales), los cuales pueden causar altos niveles de corrosión (Wolf & Dong, 2013).

Compuestos inorgánicos

Como resultado del proceso de combustión de biomasa diferentes tipos de contaminantes pueden ser liberados. Dentro de estos, vale la pena mencionar los contaminantes inquemados como el monóxido de carbono (CO), los compuestos orgánicos volátiles (VOC), los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), los compuestos orgánicos condensables (COC), el hollín, el carbón, el hidrógeno, los alquitranes contaminantes como el NO_x y las partículas inorgánicas formadas a partir de los componentes del combustible como N, K, Cl, Ca, Na, Mg, P y S (Nussbaumer, 2010).

1 Fenómeno en el que se forman capas de material particulado sobre superficies, fomentando así la corrosión y bajas eficiencias en la conducción de calor.

Tecnologías de combustión

En la sección anterior se describieron algunos conceptos y características de la combustión de biomasa. A continuación, se hace una revisión de las tecnologías de combustión existentes para la quema de combustibles sólidos y biomasa.

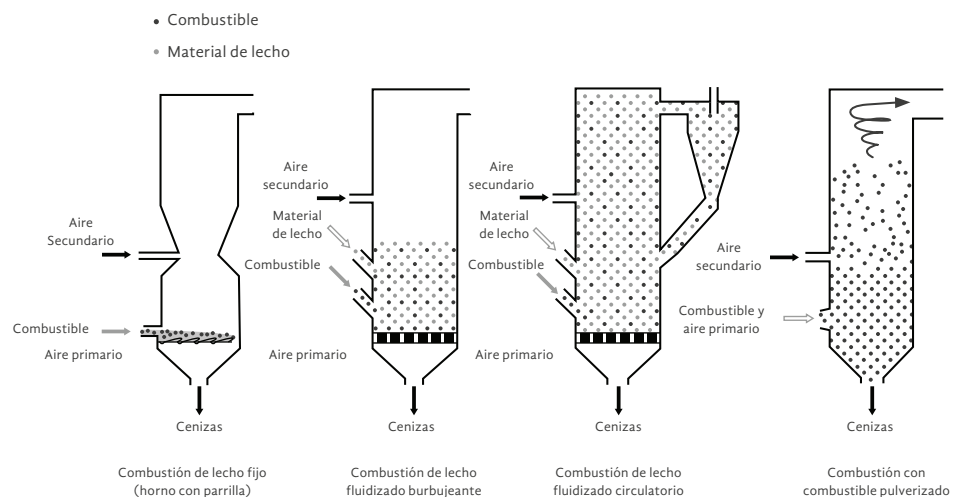
De acuerdo con Wolf & Dong (2013) se pueden distinguir tres tipos de tecnologías para la combustión de biomasa: de lecho fijo, de lecho fluidizado (que puede ser de lecho circulatorio o burbujeante) y de combustible pulverizado. La Figura 3 muestra la configuración básica de cada una de las tecnologías presentadas, mientras que la Tabla 3 presenta sus características específicas.

Combustión de lecho fijo

La combustión de lecho fijo incluye hornos con parrillas y alimentadores (*stokers*). La biomasa se sitúa en una parrilla y se mueve lentamente a través de la caldera. El aire requerido se suministra a través de hoyos dispuestos a lo largo de la parrilla. Los gases combustibles expedidos por la biomasa son quemados después de la adición de un aire secundario, usualmente en una zona de combustión separada de la cama de combustible (Figura 4). Esta tecnología se adapta a cualquier tipo de biomasa, pero se limita a una capacidad máxima de 150 MW_{th}/50MW_e (Van-Loo, 2008).

Figura 3. Tecnologías principales de combustión.

Fuente: adaptada de Van-Loo (2008).



Existen varias tecnologías disponibles para hornos de parrillas: parrillas fijas (Figura 4), movedizas, viajeras, rotatorias y vibratorias. Todas estas tienen ventajas y desventajas, dependiendo de las propiedades del combustible; por lo tanto, la selección y planeación debe ser cuidadosa. Los hornos de parrillas son apropiados para biomazas con altos contenidos de humedad, con tamaños variados de partículas y alto contenido de cenizas. Es fundamental en la concepción en estos equipos un buen diseño y un buen control de la parrilla para garantizar una distribución homogénea del combustible y las brasas sobre su superficie.

Igualmente, es importante garantizar un suministro equitativo del aire primario sobre la parrilla, ya que un suministro heterogéneo de aire puede producir escoriación, alta acumulación de cenizas e incrementar el exceso de oxígeno necesario para una completa combustión, lo que ocasiona pérdidas de calor en la caldera. Además, el transporte del combustible sobre la parrilla debe ser lo más fluido y homogéneo posible en aras de mantener las brasas estables y evitar la formación de "huecos" y liberación de cenizas y partículas de inquemados.

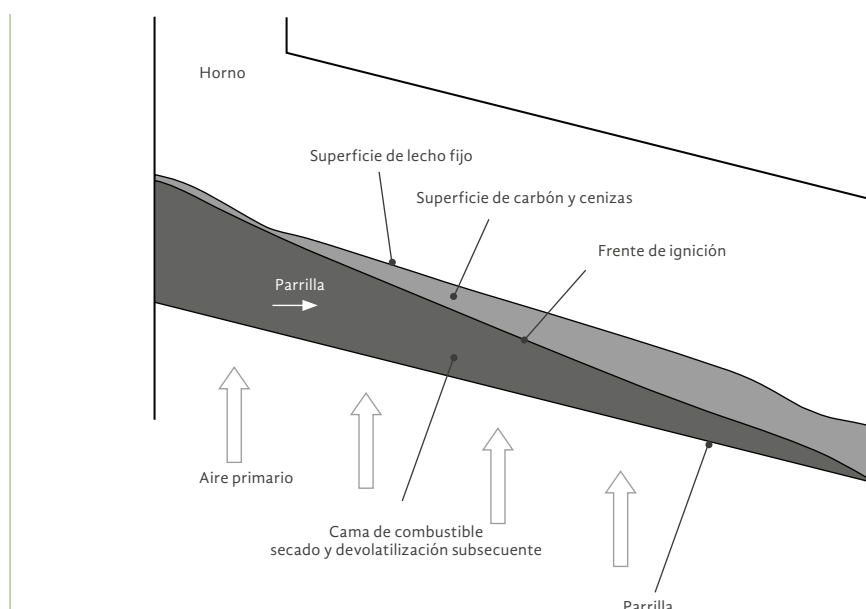
Tabla 3. Tecnologías comunes de combustión.

Tipo de instalación	Output (MWe)	Tipo de combustible	Contenido de humedad (wt%)	Contenido de cenizas (wt%, base seca)	Tamaño de partícula (mm)
Parrillas movedizas	0,15-150	Todo tipo de biomasa	5-60	< 50	< 150
Lecho fluidizado burbujeante	5-120	Lodos, cortezas, bagazo, pélets	5-60	< 10	< 100
Lecho fluidizado circulante	15-120	Cortezas, bagazo, pélets	5-60	< 10	< 100
Quemador de madera pulverizada	5-80	Maderas, pélets	<20	< 1	< 5
Co-combustión pulverizada	100-1.000	Madera, aserrín, pélets	<20	< 1	< 2-4

Fuente: Caillat & Vakkilainen (2013).

Figura 4. Proceso de combustión en parrillas fijas.

Fuente: adaptada de Van-Loo (2008).



La tecnología necesaria para lograr estos propósitos incluye la implementación de parrillas movilizadas, un sistema de control para la altura de las llamas y control de frecuencia para los ventiladores de aire primario en las diferentes secciones de la parrilla. El suministro de aire primario debe ser dividido en secciones con la intención de permitir el ajuste de los requerimientos específicos para las zonas de secado, gasificación y quemado del combustible. Controlar el suministro de aire separadamente permitirá una operación ligera en las parrillas, y así se logra reducir parcialmente la carga y control del aire primario en un 25 % (Van-Loo, 2008).

Un aspecto importante del horno de parrillas es que las etapas de combustión deben ser obtenidas por la separación de las cámaras de combustión primaria y secundaria, con el objetivo de evitar que se mezclen las corrientes de aire secundario y separar las zonas de gasificación y oxidación.

Cuanto mejor sea la calidad de la mezcla entre los gases de combustión y el aire de combustión secundario menor será la cantidad de oxígeno necesario para lograr una combustión completa, logrando así una mayor eficiencia. De acuerdo con la dirección del flujo del combustible y los gases de combustión, existen tres sistemas de operación para calderas de combustión con parrillas (Figura 5):

1. Flujo en contracorriente (las flamas se encuentran en posición opuesta a la del combustible).

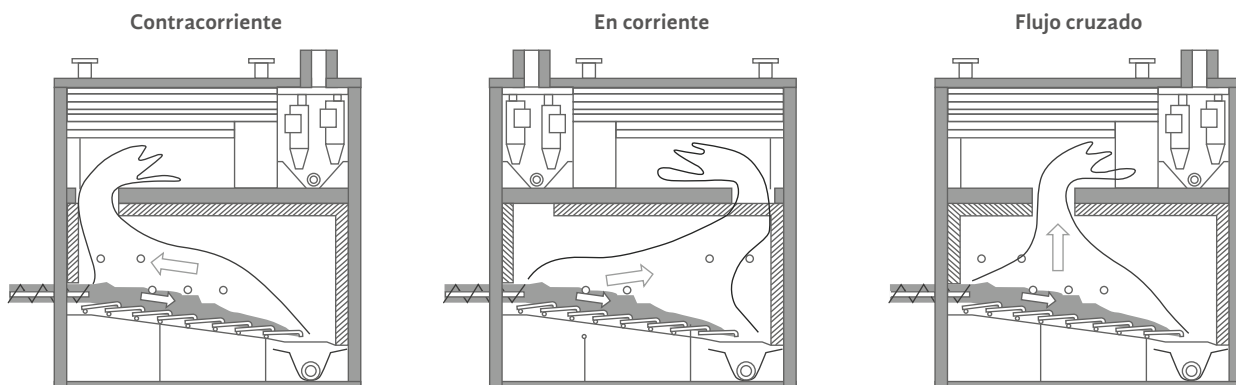
2. Flujo en corriente (las flamas están en la misma dirección que el combustible).
3. Flujo cruzado (la remoción de los gases de combustión en el medio del horno).

El flujo en contra corriente es el más adecuado para combustibles con bajo poder calorífico (LHV). Esto se debe a que la biomasa pasa directamente a través de los gases de combustión, lo que permite el secado y la evaporación del agua. El flujo en corriente se aplica para combustibles secos o en sistemas en los cuales se usa el aire primario recalentado. Este sistema incrementa el tiempo de residencia de los gases liberados por el lecho de combustible, permitiendo reducir la emisión de NO_x , debido al mejoramiento en el contacto de los gases de combustión con la cama de material carbonizado en la parte posterior de las parrillas (Van-Loo, 2008).

Los sistemas con flujo cruzado son combinaciones de sistemas en corriente y contracorriente utilizados especialmente en plantas de combustión con cámaras verticales de combustión secundarias. Con el fin de lograr una combustión adecuada, se aplica la recirculación de los gases de combustión y cámaras de combustión con agua de enfriamiento. El enfriamiento por agua tiene la ventaja de reducir los volúmenes de gases de combustión, lo que impide el apelmazamiento de las cenizas en las paredes del horno y regularmente extiende el tiempo de vida de los ladrillos de aislamiento.

Figura 5. Clasificación de las parrillas de combustión.

Fuente: adaptado de Van-Loo (2008).



Los combustibles de biomasa húmedas requieren de cámaras de combustión con aislamiento de ladrillos que operen como acumuladores de calor y almacenedores tanto de contenido de humedad como

de fluctuaciones de temperatura para asegurar una combustión completa. La Tabla 4 describe las configuraciones habitualmente usadas para calderas de lecho fijo.

Tabla 4. Tecnologías de lecho fijo.

Tecnología lecho fijo	Descripción	Ventajas	Desventajas
Parrillas viajeras	Corresponden a los sistemas que incorporan barras paralelas que forman una banda sinfín que se mueve a través de la cámara de combustión.	<ul style="list-style-type: none"> • Condiciones homogéneas • Baja emisión de hollín 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor cantidad de aire primario • Requieren mecanismos de alimentación
Parrillas móviles inclinadas	Estos sistemas tienen una parrilla inclinada que consta de barras fijas y móviles, en las cuales se alternan movimientos horizontales hacia adelante y hacia atrás de las secciones móviles, transportando el combustible a lo largo de la parrilla.	<ul style="list-style-type: none"> • Permiten graduar velocidades para ajustarse a etapas de combustión • Permiten usar una gran variedad de biomasa 	<ul style="list-style-type: none"> • Presentan complicaciones en el ajuste de velocidades, lo que genera una alta presencia de inquemados • Se recomiendan para biomasa seca o con bajo nivel de fusión de cenizas
Parrillas móviles horizontales	Este sistema tiene una cama de combustible completamente horizontal; esto se logra disponiendo de las parrillas de forma diagonal.	<ul style="list-style-type: none"> • Evitan movimientos incontrolados por efecto de la gravedad • Distribuyen de manera homogénea el combustible, lo que evita los puntos calientes • Reducen la altura promedio de una caldera 	<ul style="list-style-type: none"> • Requieren precargar de biomasa al inicio de la operación; esto evita que haya un espacio libre entre las barras
Parrillas vibratorias	Este sistema consiste en una pared de tubos con aletas inclinadas colocados sobre resortes.	<ul style="list-style-type: none"> • Se inhibe la formación de escorias en la parrilla • Ideales para biomasa con altas concentraciones de cenizas 	<ul style="list-style-type: none"> • Altas emisiones de cenizas causadas por la vibración • Altas emisiones de CO por los disturbios, lo que fomenta la combustión incompleta
Parrilla rotatoria subalimentada	Se utilizan unas parrillas cónicas que rotan en direcciones opuestas en las cuales se suministra el aire primario por la parte inferior. Como resultado, el combustible quemado y el combustible húmedo son bien mezclados.	<ul style="list-style-type: none"> • Ideal para biomasa muy húmeda (65 % w.t.) • Capacidad entre 3 y 17 MW_t; en caso de contar con cogeneración, puede estar entre 1-4,5 MW 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere un tamaño de partícula promedio por debajo de los 50 mm
Calderas con subalimentador	La alimentación se da en la parte inferior por medio de tornillos sinfín o bandas transportadoras.	<ul style="list-style-type: none"> • Seguras y de operación económica • Operación flexible y fácil remoción de cenizas • Ideales para biomasa con bajo contenido de ceniza • Requieren un nivel bajo de control 	<ul style="list-style-type: none"> • Requieren un tamaño de partícula promedio por debajo de los 50 mm • Apelmazamientos de ceniza pueden causar problemas en la alimentación

Combustión de lecho fluidizado

La combustión por lecho fluidizado (FBC, en inglés) es uno de los métodos más eficientes para quemar directamente la biomasa. Además, es una de las tecnologías más versátiles en el manejo de rangos de características de biomasa y contenidos de humedad (Basu, 2006).

La FBC es una tecnología emergente que es altamente viable. Entre las ventajas significativas que tiene sobre un sistema de convencional de combustión se destaca un diseño más compacto, la flexibilidad en el uso de combustible, la alta eficiencia en la combustión y la reducción de contaminantes, como sulfuros SO_x y NO_x (Saidur *et al.*, 2011).

El funcionamiento básico de un sistema FBC consiste en una cama (o lecho) de un mineral inerte como la arena o la caliza, en la cual el aire se sopla desde la parte inferior. El aire se bombea a través de la cama con un volumen y presión suficiente para formar una cama del material inerte de manera que se asemeja mucho a un fluido (Rainio *et al.*, 2009).

En un lecho fluidizado, el empuje gravitacional de las partículas fluidizadas es sostenido por la fuerza de arrastre del gas que se distribuye de forma ascendente. Este efecto mantiene las partículas semisuspendidas. De acuerdo con Basu (2006), un lecho fluidizado muestra características similares a la de un fluido, donde:

1. La presión estática a cualquier altura es aproximadamente igual al peso ejercido por el lecho sólido por unidad de área sobre ese nivel.
2. Un objeto más denso que la densidad de la cama se hundirá.
3. Los sólidos del lecho pueden ser drenados como un líquido a través de orificios dispuestos en el fondo o a los lados del recipiente contenedor.
4. El lecho mantiene un nivel horizontal, independientemente del nivel de inclinación de la cama, asumiendo la forma del recipiente contenedor.
5. Las partículas se mezclan muy bien, de manera que se mantiene una temperatura casi uniforme en todo el cuerpo cuando se calienta.

La fluidización depende enteramente del tamaño de la partícula de la cama y de la velocidad del aire. La velocidad media del sólido tiende a incrementarse más lentamente que la del aire. La diferencia entre estas velocidades se le conoce como la velocidad de deslizamiento. En aplicaciones de FBC es deseable tener el máximo deslizamiento posible, de manera que haya una buena transferencia de calor y un íntimo contacto entre los sólidos y el gas; mantener estas condiciones permitirá quemar el combustible rápidamente y mantener una temperatura uniforme (UNEP-DTIE Energy Branch, 2003).

La Figura 6 muestra el comportamiento del material de cama de acuerdo a la manera en que fluye el gas a través del lecho a diferentes velocidades y distintas caídas de presión en función de la velocidad del gas. A medida que la velocidad se incrementa, la cama comienza a fluidizarse. La velocidad en la que ocurre esta transición se llama *velocidad mínima de fluidización*. Cuando se alcanza la velocidad mínima de fluidización, la fuerza de arrastre de las partículas en el lecho fluidizado es igual a la suma de las fuerzas que actúan sobre las partículas. Esta velocidad depende de factores tales como el diámetro de la partícula, la densidad de la partícula y el gas, la forma de la partícula, la viscosidad del aire y la fracción vacía de lecho (Vakkilainen, 2017).

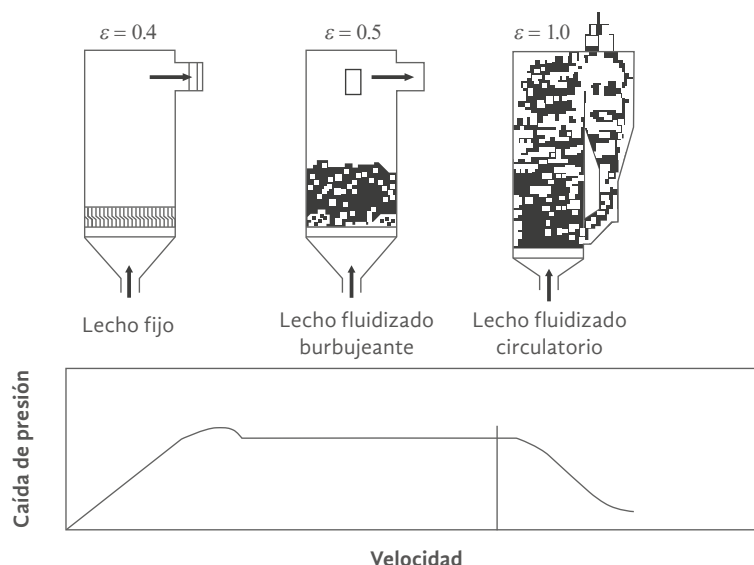
En principio, se pueden distinguir tres tipos de lecho fluidizado dependiendo del régimen de fluidización: el lecho fluidizado burbujeante atmosférico (AFBC), el lecho fluidizado circulatorio (CFBC) y el lecho fluidizado presurizado (PFBC).

Lecho fluidizado burbujeante

De acuerdo con la Asociación Nacional de Protección contra el Fuego de los Estados Unidos (National Fire Protection Association), un lecho fluidizado burbujeante (BFB, en inglés) es un lecho fluidizado en el cual la velocidad de fluidización es menor que la velocidad terminal de las partículas individuales del lecho en donde parte de los gases fluidizantes pasan a través del lecho como burbujas (Park & Box, 2001) y se alcanzan temperaturas entre 800 y 900 °C, donde la temperatura de cama permanece homogénea. Además, se requiere un bajo exceso de aire, lo que minimiza los gases de combustión (Faaij, 2004).

Figura 6. Tipos de fluidización de acuerdo con su régimen: lecho fluidizado burbujeante atmosférico (AFBC), lecho fluidizado circulatorio (CFBC) y lecho fluidizado presurizado (PFBC).

Fuente: adaptado de Vakkilainen (2017).



Para biomasa el sistema BFB opera con velocidades de fluidización entre 1 y 2 m/s con partículas de arena de tamaño 0,5 a 1,5 mm (Widell, 2013). La densidad del material de la cama debe ser alta (aproximadamente 1.000 kg/m^3) y la altura promedio debe estar normalmente entre 0,5-1,5 m. En lechos fluidizados burbujeantes, las velocidades del aire fluidizante proveen de la mezcla suficiente de material de cama y combustible, pero no son suficientemente altos para levantar mucho material de cama (Grass & Jenkins, 1994).

La combustión por BFB resulta ser una ventaja en la quema de biomasa debido a que no es necesario agregar caliza al sistema para retener compuestos sulfurados a diferencia del carbón. Por otra parte, su alimentación posee la ventaja de ocurrir en el nivel de la superficie del lecho burbujeante, donde, en caso de que cayera al fondo del lecho, esta se elevaría rápidamente durante la devolatilización, lo que libera así la mayoría de gases volátiles fuera del lecho (Leckner, 2013). La mayor ventaja del BFB es la flexibilidad en lo que concierne en tamaños y humedad contenida en las biomásas. También permite realizar diferentes mezclas e incluso realizar co-combustión con otros combustibles (Van-Loo, 2008). La Tabla 5 presenta los parámetros típicos de operación de BFB (Vakkilainen, 2017).

Lecho fluidizado presurizado

La combustión por lecho fluidizado presurizado (PFBC, por sus siglas en inglés) opera como un FBC a presio-

nes elevadas. Su aplicación se basa en la utilización de los gases de combustión que salen a alta temperatura y presión, conduciéndolos a una turbina de gas para obtener energía mecánica. Se ha desarrollado como una tecnología de alta eficiencia para la generación de energía a través de carbón, logrando potencias comerciales de hasta 360 MW_e y haciendo uso de ciclos combinados (Shimizu, 2013).

En una caldera PFBC la presión de operación está entre 1,0-1,5 MPa. La temperatura de los gases de combustión está en un rango de 814 a $870 \text{ }^\circ\text{C}$, siendo usada en las turbinas (Sarkar, 2015). Por su parte, la eficiencia global de un sistema PFBC es mayor entre 5 y 8 % con respecto de un sistema convencional de cogeneración (UNEP-DTIE Energy Branch, 2003).

Lecho fluidizado circulatorio

En una caldera de lecho fluidizado circulatorio (CFB, por sus siglas en inglés) la velocidad de fluidización se incrementa pasando del régimen de burbujeo al de transporte (Basu, 2006). En un CFB el material de cama es arrastrado junto con la corriente gaseosa. Posteriormente, es separado y se reintroduce en la cámara de combustión (Grass & Jenkins, 1994).

La CFBC utiliza el principio del lecho fluidizado en el cual el combustible triturado (en el rango de 6-12 mm) y el material de lecho se inyectan al horno. Las partículas son suspendidas por el aire (60-70 % del aire total). Las velocidades de fluidización en estos

sistemas están dentro del rango de 3,7-9 m/s (Saidur *et al.*, 2011). En el CFB el aire primario (cantidad estequiométrica) se inyecta a través de las parrillas, y el

aire secundario, por los lados a una cierta altura sobre el piso del horno. La Tabla 6 presenta los parámetros de operación de la tecnología CFB (Vakkilainen, 2017).

Tabla 5. Parámetros típicos de operación para BFB.

Volumen de carga de calor	MW/m ³	0,1-0,3
Carga de calor de sección cruzada	MW/m ²	0,7-5
Caída de presión total	kPa	10-15
Tamaño de partículas de material de cama	mm	0,1-0,5
Tamaño de partícula de ceniza liviana	μm	< 100
Tamaño de partícula de ceniza pesada	mm	0,6-10
Velocidad de fluidización	m/s	3-10
Temperatura de aire primario	°C	20-400
Temperatura de aire secundario	°C	20-400
Temperatura de cama	°C	850-900
Temperatura después del ciclón	°C	850-900
Exceso de aire	%	1,1-1,3
Densidad de la cama	Kg/m ³	10-100
Tasa de recirculación	-	10-100
Carga mínima	%	25-30

Tabla 6. Parámetros típicos de operación para CFB.

Volumen de carga de calor	MW/m ³	0,1-0,5
Carga de calor de sección cruzada	MW/m ²	0,7-3
Caída de presión total	kPa	6-12
Velocidad de fluidización	m/s	1-3
Altura de la cama	m	0,4-0,8
Tamaño de material de cama	mm	0,5-1,5
Temperatura de aire primario	°C	20-400
Temperatura de aire secundario	°C	20-400
Temperatura de cama	°C	-700-1.000
Temperatura después del ciclón	°C	-700-1.000
Exceso de aire	%	1,1-1,4
Densidad de la cama	Kg/m ³	1.000-1.500
Carga mínima	%	25-30

El combustible es alimentado en la parte baja del horno, donde se quema para generar el calor. De acuerdo con Nowak & Mirek (2013), dentro de las ventajas del CFBC están:

- La posibilidad de quemar diversos rangos en propiedades de combustibles.
- La posibilidad de quemar múltiples combustibles.
- Las condiciones estables de operación.
- No se necesita preparación de combustible.
- No se requiere de una supervisión, salvo en los periodos de arranque.
- Impacto ambiental bajo respecto a tecnología antigua.
- Altos coeficientes de transferencia de calor entre la cama y la superficie (100-400 W/m²K).

Combustión de combustible pulverizado

La combustión por combustible pulverizado, o por suspensión, utiliza un combustible pulverizado que es transportado neumáticamente y soplado en la caldera junto con el aire primario (Mandø, 2013). Los sistemas de combustible pulverizados fueron diseñados originalmente para la combustión de carbón. Sin embargo, ha sido adaptada para realizar co-combustión, proceso en la que la biomasa se quema junto con combustibles fósiles (Yokoyama & Matsumura, 2008). En el ámbito mundial, la combustión pulverizada es la tecnología más utilizada en para realizar co-combustión, pues cerca del 48 % de las calderas utilizan esta tecnología (Yin, 2013).

La calidad de la biomasa para esta tecnología debe permanecer constante. Se requiere un tamaño de partícula de máximo 20 mm y mantener un contenido de humedad inferior a 20 % (Van-Loo, 2008). Por otra parte, la velocidad de quemado de la biomasa pulverizada es considerablemente más alta que con el carbón. La biomasa pulverizada puede ser quemada en una llama igual que para combustibles no renovables y con la misma potencia (Demirbas, 2004).

Resumen de tecnologías de combustión

En resumen, las calderas de parrillas son equipos robustos que tienen la capacidad de quemar varios tipos de combustible. Sin embargo, esta tecnología se caracteriza por su baja eficiencia y altas emisiones. El lecho fluidizado es la tecnología más versátil para la quema de diversas biomasa; también se destaca por sus bajas emisiones. La combustión por combustible pulverizado es la tecnología con mayores exigencias en cuanto a la calidad del combustible. La Tabla 7 presenta un resumen detallado de las ventajas y desventajas de las tecnologías mencionadas.

Aplicaciones para la agroindustria de la palma de aceite

Los sistemas de combustión habitualmente utilizados en las plantas de beneficio comprenden sistemas de lecho fijo que son aprovechados en calderas acuotubulares, pirotubulares o mixtas. En cuanto al manejo de cenizas, estas presentaron varios inconvenientes en un principio debido a los contenidos alcalinos de la biomasa, lo que genera una escoriación en las parrillas y reduce la eficiencia de los sistemas (Cala-Gaitán & Bernal-Castillo, 2008; Wambeck, 1999). Las calderas modernas utilizan parrillas viajeras para facilitar la distribución del cuesco y la fibra dispuestos en el hogar. Sin embargo, las plantas de beneficio más antiguas poseen lechos fijos en los cuales la evacuación de ceniza debe realizarse manualmente, incurriendo en ineficiencias por combustible inquemado, pérdidas en la conservación de energía y elevación de los contenidos de ceniza liviana en los gases de combustión.

Actualmente, se reportan eficiencias en calderas de biomasa de palma de aceite de entre 60 y 75 % (Husain, Zainal, & Abdullah, 2002; Abdullah & Sulaiman, 2013; Sommart & Pipatmanomai, 2011). Además, en el desarrollo de nuevas tecnologías para aumentar la eficiencia en la combustión, existe una tendencia a mejorar el control de la humedad de la biomasa.

Altas eficiencias en caldera permiten disponer de una mayor cantidad de biomasa que puede ser utilizada en negocios alternos a la producción de aceite. Los

Tabla 7. Resumen de ventajas y desventajas de las tecnologías de combustión

Ventajas	Desventajas
Combustión por parrillas (rango típico: <100MW_{fuel})	
<ul style="list-style-type: none"> • Robusto y fiable • Baja inversión y costo de operación • Baja erosión y carga de polvo • Puede manejar diversos tipos de combustibles 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja eficiencia • Altas emisiones • Capacidad limitada de operación multicomcombustible • Adaptabilidad limitada a cambios en calidad de combustible
Combustión de lecho fluidizado burbujeante (rango típico: 20-300 MW_{fuel})	
<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidad para varias biomazas combustibles con variados tamaños de partículas y contenido de humedad. • Eficiencia en combustión • Baja emisión de NO_x y SO₂ • Sin partes mecánicas en movimiento en la región caliente 	<ul style="list-style-type: none"> • Riesgo de aglomeración en cama con combustibles altamente alcalinos • Capacidad de operación limitada a una carga parcial • Erosión
Combustión por lecho fluidizado circulatorio (rango típico: 50-800 MW)	
<ul style="list-style-type: none"> • Mejor flexibilidad (0-100 % biomasa o carbón) • Alta eficiencia de combustión • Baja emisión de NO_x y SO₂ • Captura efectiva de azufre por la caliza • Mitigación de corrosión por ciclo cerrado • Sin partes mecánicas en movimiento en el lecho 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto consumo de energía eléctrica • Alta inversión y costos de operación • Riesgo de aglomeración en ciclo • Capacidad de operación limitada a una carga parcial • Erosión
Combustible pulverizado (100-2,000 MW)	
<ul style="list-style-type: none"> • Alta eficiencia • Grandes tamaños de unidades disponibles • Buena capacidad de carga • Variedad de tecnología para co-combustión 	<ul style="list-style-type: none"> • Altas emisiones de NO_x y SO₂ • Requerimientos de combustible estrictos • Flexibilidad de combustible

Fuente: adaptado de Hurskainen y Vainikka (2015).

sistemas de combustión actualmente consumen cerca del 70 % de la biomasa generada (fibra y cuesco) por el proceso de extracción de aceite, mientras que la tusa es usada solo en casos excepcionales de combustión (Ramírez-Contreras, Arevalo, & Garcia-Nunez, 2015). La demanda térmica del proceso se encuentra por el orden de 1.343 MJ por tonelada de racimo de fruto fresco (Monroy, 2007), lo cual señala que con estos valores y una eficiencia del 60 % escasamente se logra satisfacer la demanda.

La Tabla 8 presenta un análisis de sensibilidad suponiendo eficiencias en caldera, permitiendo tener una referencia sobre la cantidad de biomasa requerida para satisfacer la demanda térmica en función de la eficiencia del sistema de combustión. Para usar las tablas

se deben ubicar las proporciones de fibra en las filas y las de cuesco en las columnas. Las tablas presentan los valores teóricos de excedentes de energía generados a partir de la combustión de la biomasa una vez es suministrada la demanda térmica del proceso. La energía es calculada a partir del promedio de poderes caloríficos reportados (Gómez, Klose, Rincón, & Wiest, 2004; Garcia-Nunez & Yañez A., 2010; Loh, 2016; Saidur *et al.*, 2011; Tortosa-Masiá, Buhre, Gupta, & Wall, 2007; Yunus, Omar, Abidin, & Biak, 2012).

Las regiones sombreadas en verde indican los excedentes de energía, mientras que los valores negativos refieren a insuficiencia de vapor. A manera de ejemplo, situando la tabla con eficiencia de combustión del 50 %, usando toda la fibra y el cuesco generado

por el proceso, escasamente se lograría suplir toda la demanda, lo que da como excedente únicamente un 103 MJ por cada unidad procesada. En un escenario ideal, con eficiencia de combustión del 80 %, se podría suplir toda la demanda usando solo el 60 % de la fibra generada y dejando aparte el cuesco para otro tipo de aplicación. De la Tabla 8 se puede concluir que no es posible suministrar todo el requerimiento térmico a partir del cuesco, por la baja cantidad de biomasa disponible.

Se han realizado estudios para quemar los racimos de fruto vacíos a través de combustiones de lecho flui-

dizado usando arena de alúmina, caliza y dolomita, alcanzando preliminarmente eficiencias de 99 % con excesos de aire de 40 % usando arena de alúmina, o de 60 % usando caliza y dolomita empleando caliza y dolomita (Ninduangdee & Kuprianov, 2016).

Otros estudios han determinado que utilizando tecnología FBC en un recipiente cónico para la quema de cuesco y tusa se pueden alcanzar eficiencias de entre 99,4 y 99,7 %, manteniendo un exceso de aire de entre 40 y 50 % y un tamaño de partículas inferior a 5 mm (Ninduangdee & Kuprianov, 2014; Ninduangdee & Kuprianov, 2015).

Tabla 8. Sensibilidad de excedentes de energía a diversas eficiencias de caldera (MJ/t RFF)

		Fibra										
		Efi. 50 %	100 %	90 %	80 %	70 %	60 %	50 %	40 %	30 %	20 %	10 %
Cuesco	100 %	103	10	-83	-175	-268	-360	-453	-546	-638	-731	
	90 %	48	-45	-138	-230	-323	-416	-508	-601	-694	-786	
	80 %	-8	-100	-193	-286	-378	-471	-564	-656	-749	-841	
	70 %	-63	-156	-248	-341	-434	-526	-619	-711	-804	-897	
	60 %	-118	-211	-304	-396	-489	-581	-674	-767	-859	-952	
	50 %	-174	-266	-359	-451	-544	-637	-729	-822	-915	-1.007	
	40 %	-229	-321	-414	-507	-599	-692	-785	-877	-970	-1.062	
	30 %	-284	-377	-469	-562	-655	-747	-840	-932	-1.025	-1.118	
	20 %	-339	-432	-525	-617	-710	-802	-895	-988	-1.080	-1.173	
	10 %	-395	-487	-580	-672	-765	-858	-950	-1.043	-1.136	-1.228	

		Fibra										
		Efi. 55 %	100 %	90 %	80 %	70 %	60 %	50 %	40 %	30 %	20 %	10 %
Cuesco	100 %	251	149	47	-55	-157	-259	-361	-463	-564	-666	
	90 %	190	88	-14	-116	-218	-320	-421	-523	-625	-727	
	80 %	129	27	-75	-177	-278	-380	-482	-584	-686	-788	
	70 %	68	-34	-135	-237	-339	-441	-543	-645	-747	-849	
	60 %	8	-94	-196	-298	-400	-502	-604	-706	-808	-909	
	50 %	-53	-155	-257	-359	-461	-563	-665	-766	-868	-970	
	40 %	-114	-216	-318	-420	-522	-623	-725	-827	-929	-1.031	
	30 %	-175	-277	-379	-480	-582	-684	-786	-888	-990	-1.092	
	20 %	-236	-337	-439	-541	-643	-745	-847	-949	-1.051	-1.153	
	10 %	-296	-398	-500	-602	-704	-806	-908	-1.010	-1.111	-1.213	

		Fibra										
		Efi. 60 %	100 %	90 %	80 %	70 %	60 %	50 %	40 %	30 %	20 %	10 %
Cuesco	100 %	399	287	176	65	-46	-157	-268	-380	-491	-602	
	90 %	332	221	110	-1	-112	-224	-335	-446	-557	-668	
	80 %	266	155	44	-68	-179	-290	-401	-512	-623	-734	
	70 %	200	88	-23	-134	-245	-356	-467	-578	-690	-801	
	60 %	133	22	-89	-200	-311	-422	-534	-645	-756	-867	
	50 %	67	-44	-155	-266	-378	-489	-600	-711	-822	-933	
	40 %	1	-110	-222	-333	-444	-555	-666	-777	-889	-1.000	
	30 %	-66	-177	-288	-399	-510	-621	-733	-844	-955	-1.066	
	20 %	-132	-243	-354	-465	-577	-688	-799	-910	-1.021	-1.132	
	10 %	-198	-309	-421	-532	-643	-754	-865	-976	-1.087	-1.199	

		Fibra										
		Efi. 70 %	100 %	90 %	80 %	70 %	60 %	50 %	40 %	30 %	20 %	10 %
Cuesco	100 %	694	565	435	305	176	46	-84	-213	-343	-473	
	90 %	617	487	358	228	98	-31	-161	-291	-421	-550	
	80 %	540	410	280	151	21	-109	-239	-368	-498	-628	
	70 %	462	333	203	73	-57	-186	-316	-446	-575	-705	
	60 %	385	255	126	-4	-134	-264	-393	-523	-653	-782	
	50 %	308	178	48	-82	-211	-341	-471	-600	-730	-860	
	40 %	230	100	-29	-159	-289	-418	-548	-678	-807	-937	
	30 %	153	23	-107	-236	-366	-496	-625	-755	-885	-1.014	
	20 %	75	-54	-184	-314	-443	-573	-703	-832	-962	-1.092	
	10 %	-2	-132	-261	-391	-521	-650	-780	-910	-1.039	-1.169	

		Fibra										
		Efi. 80 %	100 %	90 %	80 %	70 %	60 %	50 %	40 %	30 %	20 %	10 %
Cuesco	100 %	990	842	694	545	397	249	101	-47	-196	-344	
	90 %	902	753	605	457	309	161	12	-136	-284	-432	
	80 %	813	665	517	369	220	72	-76	-224	-372	-521	
	70 %	725	577	428	280	132	-16	-164	-313	-461	-609	
	60 %	636	488	340	192	44	-105	-253	-401	-549	-697	
	50 %	548	400	252	103	-45	-193	-341	-489	-638	-786	
	40 %	460	311	163	15	-133	-281	-430	-578	-726	-874	
	30 %	371	223	75	-73	-222	-370	-518	-666	-814	-963	
	20 %	283	135	-14	-162	-310	-458	-606	-755	-903	-1.051	
	10 %	194	46	-102	-250	-398	-547	-695	-843	-991	-1.139	

		Fibra										
		Efi. 90 %	100 %	90 %	80 %	70 %	60 %	50 %	40 %	30 %	20 %	10 %
Cuesco	100 %	1.286	1.119	952	786	619	452	285	119	-48	-215	
	90 %	1.186	1.020	853	686	519	353	186	19	-148	-314	
	80 %	1.087	920	753	587	420	253	87	-80	-247	-414	
	70 %	987	821	654	487	321	154	-13	-180	-346	-513	
	60 %	888	721	555	388	221	54	-112	-279	-446	-613	
	50 %	789	622	455	288	122	-45	-212	-379	-545	-712	
	40 %	689	522	356	189	22	-145	-311	-478	-645	-811	
	30 %	590	423	256	89	-77	-244	-411	-577	-744	-911	
	20 %	490	323	157	-10	-177	-343	-510	-677	-844	-1.010	
	10 %	391	224	57	-109	-276	-443	-610	-776	-943	-1.110	

Conclusiones

La combustión es un proceso termoquímico vital para la generación de la energía térmica usada en plantas de beneficio del sector palmero. Los sistemas de combustión de biomasa en la agroindustria de configuración convencional no han sufrido grandes transformaciones en los últimos años; por lo tanto, existe un gran potencial de mejora en términos de eficiencia de combustión.

VARIABLES como la humedad, el contenido de cenizas y el poder calorífico de la biomasa determinan la eficiencia final de la combustión. Dado que la humedad está directamente relacionada con el poder calorífico, mantener un control adecuado de esta variable garantizará mayor entrega de energía en la combustión de la biomasa. Con respecto al contenido de cenizas, se debe tener en cuenta que los sistemas de combustión deben estar diseñados para permitir la correcta evacuación de cenizas, debido a que la acumulación de cenizas fomenta la formación de fenómenos como escoriación y erosión, lo que afecta directamente la eficiencia y la vida útil de las calderas.

La tecnología de combustión de lecho fijo, la más utilizada de la agroindustria de la palma de aceite, ofrece rangos de operación de hasta 100 MW térmicos, equivalentes a 130 t/h. La condición de robustez de la combustión de lecho fijo la convierte en una tecnología que permite aceptar diferentes granulometrías de combustible, lo que evita tener que acondicionar la biomasa (cuesco y fibra) antes de ingresar a la cámara de combustión. Sin embargo, a pesar de tener costos de operación y mantenimiento inferiores a tecnologías como la de lecho fluidizado, la de lecho fijo posee eficiencias inferiores al 60 % y genera altas emisiones, lo

que lleva a utilizar sistemas de remoción de material particulado e incrementa el costo de inversión y operación de la caldera.

Se estudiaron dos tipos de tecnologías de combustión por lecho fluidizado (FBC): la combustión por lecho fluidizado circulatorio (CFB) y burbujeante (BFB). La principal diferencia se basa en la presurización del sistema y recirculación de los gases en la tecnología CFB, lo que permite alcanzar eficiencias superiores al 90 %; sin embargo, requiere de gastos energéticos adicionales en la operación de ciclones, así como el estricto plan de mantenimiento debido al riesgo de aglomeración de cenizas. Tanto para la tecnología CFB como para la BFB se obtienen bajas emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente porque la tecnología reduce la partícula de biomasa a cenizas de forma más homogénea.

La tecnología de combustible pulverizado es ideal para la combustión simultánea de biomasa y carbón, dada la madurez de la tecnología y que es la usada ampliamente por centrales eléctricas que operan con carbón. La generación de energía eléctrica a partir del uso de carbón mineral es un proceso que emite una alta emisiones de NO_x y SO₂. En un escenario de quema de mezclas carbón y biomasa de palma de aceite podría funcionar como estrategia para reducir la generación de gases de efecto invernadero. No obstante, esta tecnología tiene como restricción el acondicionamiento del combustible, lo que implicaría que en un escenario de aprovechamiento de biomasa esta debería ser secado hasta tener humedades inferiores a 20 % y tamaños de partículas inferiores a 20 mm.

□

Referencias

- Abdullah, N., & Sulaiman, F. (2013). The Oil Palm Wastes in Malaysia. En *Biomass Now. Sustainable Growth and Use* (Vol. 3, pp. 97-103). doi:10.1016/j.jclepro.2012.04.004
- Barrera, J., Ramírez-Contreras, García-Núñez, J. A., & Guevara, F. (2016). Diagnóstico del desempeño en consumo de energía eléctrica en plantas de beneficio en Colombia. *Palmas*, 37(4), 47-62.

- Basu, P. (2006). *Combustion and Gasification in Fluidized Beds*. Boca Ratón: CRC Press. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- Bushnell, D. J. (1989). *Biomass fuel characterization: Testing and evaluating the combustion characteristics of selected biomass fuels*. Department of Mechanical Engineering, Oregon State University.
- Caillat, S., & Vakkilainen, E. (2013). Large-scale biomass combustion plants: an overview. En *Biomass Combustion Science, Technology and Engineering* (pp. 189-224). Woodhead Publishing Limited. doi:10.1533/9780857097439.3.189
- Cala-Gaitán, G., & Bernal-Castillo, G. (2008). *Procesos modernos de extracción de aceite de palma*. Bogotá: Fedepalma.
- Carbon Trust. (2008). Biomass heating. En *A Practical Guide for a Potential Users* (pp. 19-21). London: Carbon Trust.
- Cengel, Y. A. (2007). *Transferencia de calor y masa*. Ciudad de México: McGraw Hill Interamericana.
- Cengel, Y., & Boles, M. E. (2011). *Termodinámica*. Ciudad de México: McGraw Hill Interamericana.
- Cenipalma (2014). *Informe de labores 2014*. Bogotá: Fedepalma.
- Demirbas, A. (2002). Relationships Between Heating Value and Lignin, Moisture, Ash and Extractive Contents of Biomass Fuels. *Energy, Exploration & Exploitation*, 20(1), 105-111. doi: 10.1260/014459802760170420
- Demirbas, A. (2004). Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(2), 219-230. doi:10.1016/j.peccs.2003.10.004
- Demirbas, A. (2005). Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in Energy and Combustion Science*, 31(2), 171-192. doi:10.1016/j.peccs.2005.02.002
- Faaij, A. P. (2004). Biomass Combustion. In *Encyclopedia of Energy* (Vol. I, pp. 175-191). doi:10.1016/B0-12-176480-X/00355-7
- García-Núñez, J., & Yañez, A. E. E. (2010). Generación y uso de biomasa en plantas de beneficio de palma de aceite en Colombia. *Palmas*, 31(2), 41-48.
- García-Pérez, M., Wang, S., Shen, J., Rhodes, M., & Lee, W. J. (2008). Effects of temperature on the formation of lignin-derived oligomers during the fast pyrolysis of mallee woody biomass. *Energy & Fuels*, 22(3), 2.022-2.032.
- Gómez, A., Klose, W., Rincón, S. & Wiest, W. (2004). Transformación termoquímica de la biomasa residual del proceso de extracción del aceite de palma: tecnologías y perspectivas. *Palmas*, 25(II), 388-397.

- Grass, S. W., & Jenkins, B. M. (1994). Biomass fueled fluidized bed combustion: atmospheric emissions, emission control devices and environmental regulations. *Biomass and Bioenergy*, 6(4), 243-260. doi:10.1016/0961-9534(94)90064-7
- Hoekstra, E., Westerhof, R. J. M., Brilman, W., Swaaij, W. P. M. Van, Kersten, S. R. A., Hogendoorn, K. J. A., & Windt, M. (2011). Heterogeneous and Homogeneous Reactions of Pyrolysis Vapors from Pine Wood. *AIChE journal*, 58(9), 2.830-2.842 doi:10.1002/aic.12799
- Hupa, M., Karlström, O., & Vainio, E. (2016). Biomass Combustion Technology Development. It is all about Chemical Details. *Proceedings of the Combustion Institute*, 36(1), 113-134. doi:10.1016/j.proci.2016.06.152
- Hurskainen, M., & Vainikka, P. (2015). Technology options for large-scale solid-fuel combustion. En *Fuel Flexible Energy Generation* (pp. 177-199). Woodhead Publishing.
- Husain, Z., Zainal, Z. A., & Abdullah, M. Z. (2002). Analysis of biomass-residue-based cogeneration system in palm oil mills. *Biomass and Bioenergy*, 24(2), 117-124. doi:10.1016/S0961-9534(02)00101-0
- Jenkins, B., Baxter, L., Miles, T., & Miles, T. (1998). Combustion properties of biomass. *Fuel processing technology*, 54(1-3), 17-46. doi:10.1016/S0378-3820(97)00059-3
- Kanaujia, P. K., Sharma, Y. K., Garg, M. O., Tripathi, D., & Singh, R. (2014). Review of analytical strategies in the production and upgrading of bio-oils derived from lignocellulosic biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 105, 55-74. doi:10.1016/j.jaap.2013.10.004
- Khan, A. A., De-Jong, W., Jansens, P. J., & Spliethoff, H. (2009). Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. *Fuel processing technology*, 90(1), 21-50. doi:10.1016/j.fuproc.2008.07.012
- Lassi, U. L. H. (2013). *Biomass to energy and chemicals*. Oulu: University of Oulu.
- Leckner, B. (2013). Atmospheric (non-circulating) fluidized bed (FB) combustion. En *Fluidized bed Technologies for near-zero Emission Combustion and Gasification* (pp. 641-668). Woodhead Publishing. doi:10.1533/9780857098801.3.641
- Loh, S. K. (2016). The potential of the Malaysian oil palm biomass as a renewable energy source. *Energy Conversion and Management*, 141, 285-298. doi:10.1016/j.enconman.2016.08.081
- Mandø, M. (2013). *Direct combustion of biomass*. *Biomass Combustion Science, Technology and Engineering*. Woodhead Publishing Limited. doi:10.1533/9780857097439.2.61
- Monroy, E. F. C. (2007). Integración energética en el proceso de extracción de aceite de palma. *Palmas*, 28(especial), 93-104.
- Ramírez-Contreras, N., Arevalo A., & Garcia-Nunez, J. (2015). Inventario de la biomasa disponible en plantas de beneficio para su aprovechamiento y caracterización fisicoquímica de la tusa en Colombia. *Palmas*, 36(4), 41-54.

- Ninduangdee, P., & Kuprianov, V. I. (2014). Combustion of palm kernel shell in a fluidized bed: Optimization of biomass particle size and operating conditions. *Energy Conversion and Management*, 85, 800-808. doi:10.1016/j.enconman.2014.01.054
- Ninduangdee, P., & Kuprianov, V. I. (2015). Combustion of an oil palm residue with elevated potassium content in a fluidized-bed combustor using alternative bed materials for preventing bed agglomeration. *Bioresource Technology*, 182, 272-281. doi:10.1016/j.biortech.2015.01.128
- Ninduangdee, P., & Kuprianov, V. I. (2016). A study on combustion of oil palm empty fruit bunch in a fluidized bed using alternative bed materials: Performance, emissions, and time-domain changes in the bed condition. *Applied Energy*, 176, 34-48. doi:10.1016/j.apenergy.2016.05.063
- Nowak, W., & Mirek, P. (2013). Circulating fluidized bed combustion (CFBC). En *Fluidized bed technologies for near-zero emission combustion and gasification* (pp. 701-764). Woodhead Publishing. doi:10.1533/9780857098801.3.701
- Nunes, L. J. R., Matias, J. C. O., & Catalão, J. P. S. (2016). Biomass combustion systems: A review on the physical and chemical properties of the ashes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 235-242. doi: 10.1016/j.rser.2015.08.053
- Nussbaumer, T. (2003). Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction. *Energy and Fuels*, 17(6), 1.510-1.521. doi: 10.1021/ef030031q
- Nussbaumer, T. (2010). *Overview on technologies for biomass combustion and emission levels of particulate matter*. Zürich.
- Park, B., & Box, P. O. (2001). NFPA 85 Boiler and Combustion Systems Hazards Code, 2001 Edition. Quincy, MA, USA: National Fire Protection Association.
- Ponce-Arrieta, F., Silva-Lora, E., Yañez, E., & Castillo, E. (2009). Potencial de cogeneración de energía eléctrica en la agroindustria colombiana de aceite de palma : tres estudios de casos Introducción. *Palmas*, 29(4), 59-72.
- Pongrácz, E. [Ed.] (2011). *Biomass and Waste To Energy Technologies : Environmental Impact Assessment* (Vol. 3). Oulu: University of Oulu.
- Rainio, A., Sharma, V., Bolhàr-Nordenkampf, M., Brunner, C., Lind, J., & Crosher, J. (2009). Fluidized Bed Technologies for Biomass Combustion. *ASME 2009 Power Conference*, (May), 97-105. doi:10.1115/POWER2009-81052
- Saidur, R., Abdelaziz, E. A., Demirbas, A., Hossain, M. S., & Mekhilef, S. (2011). A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2.262-2.289. doi:10.1016/j.rser.2011.02.015
- Sarkar, D. K. (2015). Fluidized-Bed Combustion Boilers. En *Thermal Power Plant*. doi: 10.1016/B978-0-12-801575-9.00001-9 r

- Shimizu, T. (2013). Pressurized fluidized bed combustion (PFBC). En *Fluidized Bed Technologies for Near-Zero Emission Combustion and Gasification* (pp. 669-700). Elsevier. doi:10.1533/9780857098801.3.669
- Sommart, K., & Pipatmanomai, S. (2011). Assessment and improvement of energy utilization in crude palm oil mill. *2011 International conference on chemistry and chemical process IPCBEE* (Vol. 10, pp. 161-166).
- Tortosa-Masiá, A. A., Buhre, B. J. P., Gupta, R. P., & Wall, T. F. (2007). Characterising ash of biomass and waste. *Fuel Processing Technology*, 88(11-12), 1.071-1.081. <http://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.06.011>
- UNEP-DTIE Energy Branch. (2003). Fluidized Bed Combustion Boiler Technology For Cogeneration. *Energy*, 1-68.
- Vakkilainen, E. K. (2017). Fluidized Bed Boilers for Biomass. *Steam Generation from Biomass*, 211-236. doi:10.1016/B978-0-12-804389-9.00010-1
- Van-Loo, S. (2008). *The Handbook of Biomass Combustion and Cofiring*. Routledge.
- Wambeck, N. (1999). *Sinopsis del proceso de la palma de aceite*. Kuala Lumpur.
- Widell, H. (2013). Industrial-scale biomass combustion plants: engineering issues and operation. En *Biomass Combustion Science, Technology and Engineering* (pp. 225-277). Woodhead Publishing. doi:10.1533/9780857097439.3.225
- Wolf, J. P., & Dong. (2013). Biomass combustion for power generation: an introduction. En *Biomass combustion science, technology and engineering* (pp. 3-8). Woodhead Publishing. doi:10.1533/9780857097439.1.3
- Yin, C. (2013). Biomass co-firing. En *Biomass Combustion Science, Technology and Engineering* (pp. 84-105). doi:10.1533/9780857097439.2.84
- Yokoyama, S., & Matsumura, Y. (2008). *The Asian Biomass Handbook. A Guide for Biomass Production and Utilization Support*. Tokyo: The Japan Institute of Energy.
- Yunus, R., Omar, R., Abidin, Z. Z., & Biak, D. R. A. (2012). Oil Palm as Bioenergy Feedstock. *Palm Oil: Production, Processing, Characterization, and Uses, 2010*, 653-692. doi:10.1016/B978-0-9818936-9-3.50025-3