

# Hacia el aprovechamiento energético de los raquis de palma en calderas de biomasa\*

Towards the Energy Utilization of Palm Empty Fruit Bunch in Biomass Boilers

<https://doi.org/10.56866/01212923.13806>

**CITACIÓN:** Bayona-Roa, C., García-Navarro, J. G., Gacha, J. & Ricaurte, H. (2023). Hacia el aprovechamiento energético de los raquis de palma en calderas de biomasa. *Palmas*, 44(1), 51-64.

**PALABRAS CLAVE:** Calderas de biomasa, Combustión, Raquis de palma, Corrosión.

**KEY WORDS:** Boiler, Combustion, Palm Oil Empty Fruit Bunch, Corrosion

**RECIBIDO:** junio de 2022.

**APROBADO:** enero de 2023.

\* Artículo de investigación e innovación científica y tecnológica.

**BAYONA-ROA, CAMILO**

Centro de Ingeniería Avanzada,  
Investigación y Desarrollo (CIAID),  
Bogotá, Colombia.

Autor para correspondencia:  
cbayona@ciaid.co

**GARCÍA-NAVARRO, JUAN GUILLERMO**

Centro de Ingeniería Avanzada,  
Investigación y Desarrollo (CIAID),  
Bogotá, Colombia.

**GACHA, JEISSON**

VR Ingeniería, Bogotá, Colombia.

**RICAUARTE, HÉCTOR**

VR Ingeniería, Bogotá, Colombia

## Resumen

Quemar raquis de palma (también llamado tusa) en las calderas de biomasa trae consigo la superación de distintos problemas tecnológicos asociados a ese biocombustible. En particular, el alto contenido de potasio, fósforo y cloro son elementos potencialmente perjudiciales por la corrosión que generan en las superficies de transferencia de calor. En este artículo se discute cómo superar las problemáticas tecnológicas para que las calderas generadoras de vapor y

electricidad en plantas de beneficio de aceite de palma puedan operar quemando raquis que anteriormente no se usaba en la generación de energía en la industria. Estas consideraciones, aunque técnicas, se orientan a mejorar la sostenibilidad y la competitividad de la agroindustria de la palma de aceite.

## Abstract

Burning palm oil empty fruit bunches in biomass boilers involves overcoming several technological problems. In particular, the high content of potassium, phosphorus and chlorine are potentially harmful elements due to the corrosion they generate on heat transfer surfaces. This article discusses how to overcome the technological problems so that steam and electricity in palm oil processing plants can be produced from burning stems that were previously not used in energy generation in the industry. These considerations, although technical, are aimed to improve the sustainability and competitiveness of the palm oil agro-industry.

## Introducción

Entre las plantaciones más atractivas en la región para la generación de energía a partir de la biomasa se encuentra la palma de aceite, que es el segundo cultivo más importante en términos de extensión en Colombia. Durante 2021, el país contó con una producción de aceite de palma crudo (APC) de 1.747.377 t (Fedepalma, 2022). Un incremento proporcional ocurrió en la producción de residuos generados en el proceso de extracción y beneficio del aceite, entre ellos, las tusas o raquis (20 %), la fibra del fruto (13 %), el cuesco o cáscara de las almendras (7 %), así como las cenizas producidas por las calderas de biomasa que operan en las plantas de beneficio (García-Núñez *et al.*, 2006). Estos residuos representan entre el 70-74 % de la biomasa de la palma procesada (Pérez y Lopez, 2019). Aparte del aprovechamiento energético de la fibra y cuesco como combustibles en las calderas para producción de vapor y electricidad, los raquis se consideran residuos y, en contadas ocasiones, un elemento para mejorar el suelo en las plantaciones o como materia prima para la producción de fertilizantes. Sin embargo, el uso convencional que se le ha dado como acondicionador del suelo no es muy atractivo debido al alto costo de su transporte (García-Núñez *et al.*, 2006).

En aras de mejorar el aprovechamiento de los subproductos del proceso de la palma de aceite, la industria ha buscado utilizar los raquis como materia prima de otros procesos. Desde el siglo pasado se ha planteado la posibilidad de usarlos para otras aplica-

ciones como la producción de biocombustibles y la de pulpa de papel de celulosa, entre otros (Van Dam, 2016). Distintos procedimientos y tecnologías de conversión termoquímica se han intentado y explicado en mucha literatura para lograr su aprovechamiento energético, algunas de estas son la pirólisis, el desmenuzado químico y la conversión hidrotérmica. Sin embargo, pocas alternativas son tan factibles económicamente como la combustión en calderas de biomasa para la operación de las plantas de beneficio (Chiew y Shimada, 2013; Serrano, 1995). De esa manera se incrementaría en 29 % la energía aprovechada por la industria de la palma de aceite, como se demuestra en la Tabla 1. En esta, se presentan las toneladas y el potencial energético anualizado para los tres tipos de combustibles (raquis, fibra y cuesco de palma). Adicionalmente, se ha explicado (Serrano, 1995) la posibilidad de obtener una rentabilidad mayor de la palma de aceite si el raquis reemplazara la fibra como combustible principal de las calderas, y la fibra se aprovechara solamente en la producción de concentrados para la alimentación de bovinos y porcinos. De esta manera es posible usar al máximo, inclusive completamente, los residuos generados en la cadena de producción del aceite de palma. Esto permitiría una producción más limpia y favorable con el medio ambiente, siendo biomasa renovable y carbono neutral debido a su corto tiempo de regeneración, es decir, que incorpora con relativa rapidez en las plantaciones el dióxido de carbono producido en la combustión. A nivel general esto se traduce en el desarrollo sustentable y energéticamente eficiente.

**Tabla 1.** Incremento energético, incluyendo el raquis de palma de aceite en la combustión de calderas (basado en Van Dam, (2016)).

	Toneladas anuales de residuos	Potencial energético (GJ)
Raquis	646.529	11.799.163
Fibra de palma	716.425	14.113.564
Cuesco de palma	463.055	15.044.916
<b>Total energía sin raquis</b>		29.158.480
<b>Total energía con raquis</b>		40.957.643
<b>Porcentaje de incremento energético quemando el raquis en las calderas de biomasa</b>		<b>28,81 %</b>

Cálculos basados en la producción colombiana de 2021, según (Fedepalma, 2022).

Para aprovechar energéticamente los raquis de la palma de aceite, se deben superar algunas limitaciones tecnológicas que se presentan en las calderas de biomasa. En comparación con los combustibles fósiles, el raquis posee un contenido energético importante relacionado con su composición de oxígeno e hidrógeno. Sin embargo, cuenta también con altos contenidos de metales alcalinos como el potasio (K) y el sodio (Na), y no metálicos como el fósforo (P), además de cloro (Cl), que son problemáticos en contacto con los elementos mecánicos de calderas y otros equipos térmicos (Pérez y López, 2019). Particularmente, esa composición química tiende a formar depósitos de ceniza dentro de la caldera y así, causa una disminución en la transferencia de calor, pero especialmente corrosión, erosión y abrasión de los componentes metálicos. La gran cantidad de minerales alcalinos presentes en el raquis disminuye el punto de fusión de las cenizas y aumenta su potencial corrosivo en componentes de la caldera fundamentales para la transferencia y el aprovechamiento de la energía del combustible.

Solucionar este problema tecnológico es trascendental para el sector de la palma de aceite en Colombia, pero también para países tropicales (García-Núñez *et al.*, 2006), pues su agroindustria tiene como denominador común una baja inversión en proyectos de investigación y desarrollo, lo cual repercute en la poca apropiación de soluciones particulares; a excepción de Tailandia y Malasia (Madhiyanon

*et al.*, 2012; Ngamsidhipongsa *et al.*, 2021; Srasri *et al.*, 2022), donde se ha presentado el desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento energético de raquis de palma, enmarcados, por ejemplo, dentro de The Malaysian Palm Oil Board (MPOB) (Loh, 2017; Taishan Group, 2017).

Trabajos similares para la combustión de madera o residuos urbanos se han abordado en países desarrollados. Los documentos publicados en Galindo-García *et al.* (2012) y Nielsen *et al.* (2000) demuestran la posibilidad de superar problemáticas similares. En Colombia se han realizado algunos estudios para evaluar el desempeño de calderas que funcionan con biomasa, como es el caso de Carvajal Díaz (2018) o de Albarracín-Becerra *et al.* (2019) en los que se diseña un sistema de cocombustión entre biomasa (palma de aceite) y biogás en una caldera. Sin embargo, hay una literatura limitada en el campo del rediseño de calderas de biomasa en el país, en la que se destacan el diseño del sistema de distribución de aire para la combustión de bagazo de caña de azúcar en una caldera (Villamil Franco y Cuartas Ramos, 2017) o el diseño experimental de un prototipo de caldera (Betancourt Prisco y Ospina Berrío, 2010). Aún no se han publicado estudios técnicos con argumentación cuantitativa (Bayona, 2011) sobre la evaluación de la forma del hogar de combustión, ni de las condiciones de operación de la combustión (Hernández *et al.*, 2018). La baja implementación de este tipo de proyectos se debe en gran parte a la réplica

de las técnicas de diseño y fabricación tradicionales y al desconocimiento por parte de los inversionistas de los beneficios técnicos, ambientales, económicos y fiscales en cuanto al diseño y fabricación de equipos térmicos propios para la agroindustria local.

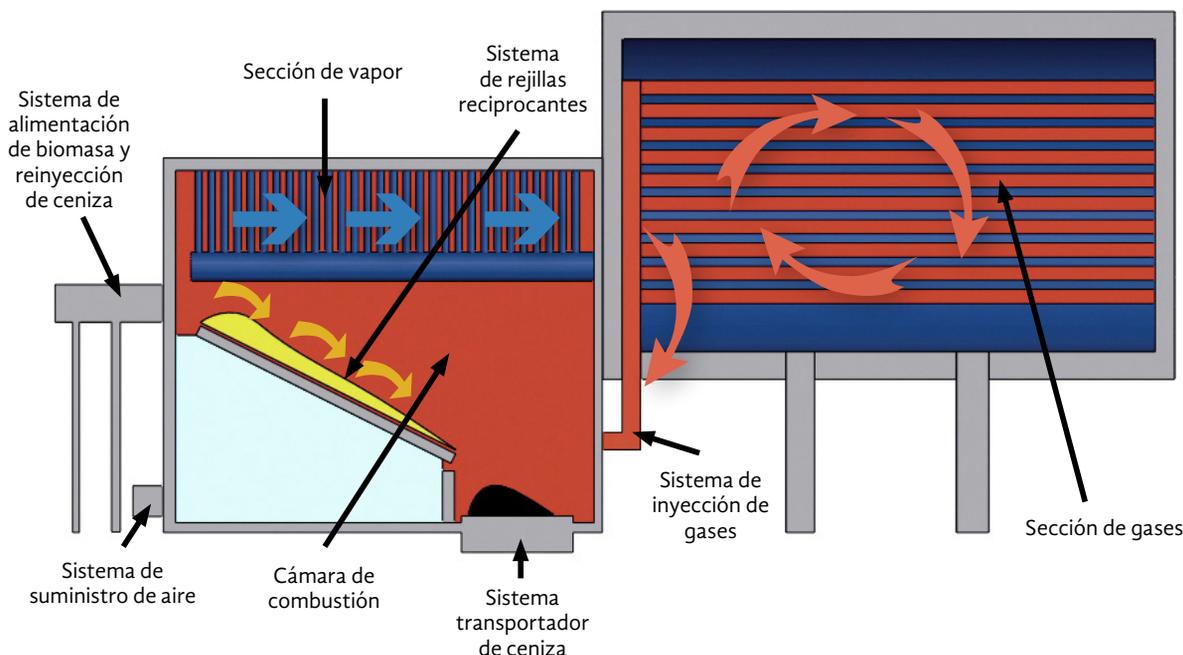
Este artículo analiza la factibilidad de diseñar y fabricar una caldera de biomasa que pueda operar aprovechando los raquis de palma de aceite como combustible. Es así como, resulta atractivo mejorar la comprensión de las consecuencias de la combustión del raquis de palma, pues si se gestiona correctamente, su uso energético puede llegar a ser tecnológicamente viable en un futuro cercano. Este estudio analiza sistemática y detalladamente el estado del arte de la combustión del raquis y sus efectos en las calderas. Los análisis abarcan desde su composición química hasta los mecanismos físico-químicos dentro del hogar de combustión causantes de los problemas tecnológicos. Como resultado de este entendimiento, se plantean soluciones para mejorar la eficiencia térmica y evitar posibles fallas estructurales causadas por la corrosión. Específicamente, se proponen diseños novedosos de calderas de biomasa

que permitan quemar los raquis actualmente desaprovechados energéticamente por la agroindustria de la palma de aceite.

## Entendimiento de los problemas tecnológicos asociados a la combustión de los raquis de la palma de aceite

Las calderas de biomasa usadas en las plantas de beneficio de aceite de palma están típicamente compuestas por un sistema de alimentación de biomasa, un sistema de suministro de aire, el hogar de combustión, un lecho fijo que soporta el combustible dentro del hogar de combustión, así como distintas secciones de intercambio de calor (sobrecalentadores, evaporadores, economizadores y precalentadores de aire). Un diseño tradicional se presenta en la Figura 1. El objetivo general de una caldera es aprovechar la mayor cantidad de energía térmica generada durante la combustión y transferirla hacia otro fluido de trabajo en el evaporador y sobrecalentador, que usualmente es vapor de agua.

Figura 1. Esquema de una caldera de biomasa



Un componente crucial en la combustión de biomasa es el lecho sobre el cual se distribuye el combustible dentro del hogar, el cual se compone tradicionalmente de una parrilla transportadora. A medida que ocurre la combustión de la biomasa, las cenizas y los residuos son transportados por la parrilla hasta el final de la cámara de combustión, y luego caen en el sinfín de cenizas que son retiradas de la cámara de combustión. El aire de combustión se divide en dos partes: aire primario y secundario.

El aire primario (de combustión) se distribuye por debajo de las rejillas a través de los tubos, cada uno de los cuales desvía el aire hacia una zona particular de la cámara de combustión. Este aire propicia la volatilización de algunos componentes químicos del combustible, así como el secado de la biomasa con altos contenidos de humedad, del mismo modo sirve para refrigerar la parrilla. Los compuestos no volátiles permanecen en el carbón del combustible y pueden derretirse dependiendo de la composición química de los gases, así como de su temperatura. La mayoría de las partículas de ceniza permanecen en la parrilla, solo una fracción menor se arrastra por los gases de la combustión. En cuanto al aire secundario, este se suministra a través de boquillas situadas en la parte superior de la parrilla. Este completa la combustión de los volátiles y adecúa la temperatura de los gases de escape para su flujo a través de los intercambiadores de calor, mitigando humos, hollín y la generación de inquemados como el monóxido de carbono (Miles *et al.*, 1996).

Por falta de información técnica en la agroindustria de palma de aceite, han ocurrido experiencias en las cuales se han adecuado las calderas de fibra y cuesco de palma de aceite para su operación con raquis, lo cual ha producido fallas catastróficas en las calderas, especialmente la destrucción prematura de los sobrecalentadores, incluso cuando mezclaban solo un 20-30 % en peso de raquis de palma con la mezcla de combustible de fibra de palma y cáscara de palma (Madhiyanon *et al.*, 2012). Esto se explica por combustiones que no tienen en cuenta las características químicas del combustible en el diseño de los componentes de las calderas. Comúnmente, se han presentado los siguientes inconvenientes a nivel operacional cuando se ha quemado el raquis de palma en calderas de biomasa:

1. Un primer problema está relacionado con el manejo y transporte del raquis hacia la caldera. Esto es relevante por su forma característica, pues el

racimo direccionado se engancha fácilmente entre sí, obstruyendo su tránsito hacia la caldera; además, esta misma forma propicia una combustión parcial de la biomasa. Operaciones adicionales de transporte, acondicionamiento y homogenización de los raquis son necesarias para alimentar el hogar de combustión con esta biomasa. Del mismo modo, el uso de parrillas recíprocas escalonadas ha sido una solución efectiva para reducir estos problemas (Lakshmanan, 2021).

2. Un segundo problema tiene que ver con los altos contenidos de humedad de los raquis de palma (mayores a 50 %). Parte de la energía liberada en la combustión se debe destinar a la evaporación de esta humedad inicial (mucho más alta que en la fibra y cuesco) y no al calentamiento del fluido de trabajo en los intercambiadores de calor. Además, se generan humos en la combustión que se mitigan con un exceso de aire muy alto para los actuales estándares de eficiencia.
3. Un tercer problema es el empobrecimiento de la combustión debido a la aglomeración de la ceniza sobre el combustible en las parrillas. Las capas apelmazadas de ceniza impiden los procesos de volatilización y combustión al aislar los hidrocarburos del aire de combustión. Las malas características de la combustión conducen a un rendimiento desigual y a paradas no programadas de la caldera en caso de no contar con limpieza automática del hogar (Srasri *et al.*, 2022). Otro efecto nocivo de esta problemática es la inestabilidad de la llama de combustión. Esto afecta la distribución de los gases y la integridad de la parrilla al generar depósitos de escoria únicamente en los lugares de alta temperatura.
4. Un cuarto problema se relaciona con el arrastre de ceniza por los gases de combustión. Esta, tiene bajos puntos de fusión, lo cual permite su arrastre inicial en forma de aerosoles, pero también su solidificación y depósito en lugares apartados del hogar. Esta deposición es más probable en lugares donde las partículas flotantes impactan una superficie de baja temperatura, como en los intercambiadores de calor o sus placas piro-tubulares, primero erosionando mediante un proceso abrasivo y posteriormente adhiriéndose a ellas. La formación de capas de ceniza en las paredes de intercambio de calor aumenta la temperatura de los gases circundantes, reduciendo la eficiencia del

proceso de transferencia energética y propiciando temas corrosivos de altas temperaturas.

5. El quinto y más importante problema es el de la corrosión acelerada de las superficies metálicas en contacto con los depósitos de ceniza arrastrada en forma de aerosol. Estos lugares son usualmente placas pirotubulares y uniones entre los tubos de los intercambiadores de calor donde la temperatura es elevada al no transferirse el calor hacia el exterior o hacia otro fluido. Esta corrosión depende fundamentalmente de la composición química de los raquis, los cuales causan depósitos de ceniza fundida con altos contenidos de metales alcalinos y alcalinotérreos. También depende del tipo de material usado en la construcción de los componentes de la caldera, típicamente aceros aleados.
6. Un sexto problema es el desprendimiento de los depósitos de ceniza en las superficies, las cuales pueden inestabilizar la operación de la caldera. Las paredes del hogar son especialmente propensas a acumular depósitos de ceniza inmanejables que se desprenden y caen, acumulándose sobre el suelo en lugares inapropiados para su remoción.

Finalmente, la ceniza recolectada dentro de la cámara de combustión o en las trampas de ceniza debe disponerse apropiadamente para su posterior ciclo mineral en el ambiente, reponiendo el potasio y fósforo usados por las palmas en las plantaciones. Esto, aunque no es un problema tecnológico en sí mismo,

si debe planificarse de modo técnico y ambientalmente seguro.

## Caracterización termoquímica del raquis de palma

El raquis es el residuo más problemático en las plantas de beneficio debido, entre otros, a su geometría y propiedades químicas distintas a las de la fibra y los cuescos, por eso, su caracterización es esencial para el entendimiento profundo de los fenómenos de combustión y corrosión descritos anteriormente. Algunos referentes internacionales y nacionales han publicado la composición química de los raquis de palma dada su aplicabilidad como biomasa para diferentes usos (como suplemento edáfico en la fertilización o biomasa de combustión para procesos de poscosecha y procesamiento). En las Tablas 2a, 2b, 2c y 3 se presentan distintos resultados del análisis de su composición química, incluyendo los estudios originales del presente trabajo, elaborados a partir de raquis de palmas extraídos de plantaciones de la altillanura colombiana.

En los resultados presentados en la Tabla 2c, se observa que los raquis de la palma de aceite contienen 47,7 % de celulosa, 10,8 % de lignina, 21,1 % de hemicelulosas, y 20,4 % de otros componentes solubles. Tienen un gran contenido de humedad, que en algunos casos llega hasta 55 %, así como de metales alcalinos como el potasio (K) y el fósforo (P) que for-

**Tabla 2a.** Análisis último.

Elementos	(Olisa y Kotingo, 2014)	(García-Núñez et al., 2006)	(Ninduangdee et al., 2015)	(Madhiyanon et al., 2012)	(Ramírez et al., 2011)	(Kaniapan et al., 2021)	Propios
C	43,8	40,88 ± 2,47	48,2	40,7	42,8	42,8	48,03
H	6,2	-	6,49	5,4	6,4	6,2	6,47
O	42,65	-	31,74	47,0	35,8	50,44	39,65
N	0,44	0,87 ± 0,09	0,47	0,3	0,8	0,47	0,77
S	0,09	0,09 ± 001	0,1	1,1	0,1	0,09	0,084
K	-	2,23 ± 0,20	-	-	-	-	-
P	-	0,057± 0,023	-	-	-	-	-
Na	-	0,010 ±0,02	-	-	-	-	-

Todas las magnitudes están en % de masa en base seca.

**Tabla 2b.** Análisis próximo.

Componentes	(Olisa y Kotingo, 2014)	(García-Núñez <i>et al.</i> , 2006)	(Ninduangdee <i>et al.</i> , 2015)	(Madhiyanon <i>et al.</i> , 2012)	(Rosli <i>et al.</i> , 2017)	(Ramírez <i>et al.</i> , 2011)	(Kaniapan <i>et al.</i> , 2021)	Propios
<b>Humedad</b>	8,34	12,3	8,2	38,4	9,51 ± 1,46	6,1	7,3	48,49
<b>Volátiles</b>	79,82	-	74,2	66,1	-	69,5	82,4	77,4
<b>Carbón fijo</b>	13,31	-	12,8	28,4	-	17,9	7,51	17,61
<b>Ceniza</b>	6,87	7,87	4,8	5,5	0,10 ± 0,01	6,5	4,9	4,99

Todas las magnitudes están en % de masa en base seca.

**Tabla 2c.** Compuestos orgánicos y propiedades energéticas.

Componentes	(Olisa y Kotingo, 2014)	(García-Núñez <i>et al.</i> , 2006)	(Ninduangdee <i>et al.</i> , 2015)	(Rosli <i>et al.</i> , 2017)	(Ramírez <i>et al.</i> , 2011)	(Kaniapan <i>et al.</i> , 2021)	Propios
<b>Lignina*</b>	-	10,8	-	27,7 ± 0,68	12,0	12,5	-
<b>Celulosa*</b>	-	47,7	-	-	66,0	34,4	-
<b>Extractos*</b>	-	20,4	-	12,9 ± 2,25	-	-	-
<b>Hemicelulosa*</b>	-	21,1	-	-	-	26,7	-
<b>Poder calorífico inferior (MJ/kg)</b>	19,25	-	18,4	-	-	-	16,27
<b>Poder calorífico superior (MJ/kg)</b>	-	-	-	-	17,9	16,9	17,66

\*Las magnitudes están en % de masa en base seca.

man compuestos con bajas temperaturas de fusión y pueden condensarse como cloruros. El metal alcalino que más preocupa es el potasio, pues la mayor parte de este se libera en la fase gaseosa durante la combustión y está presente principalmente como cloruro de potasio (KCl) e hidróxido de potasio (KOH) (Ngamsidhiphongs *et al.*, 2021). También se observa el alto poder calorífico de los raquis de palma, con un valor promedio de 18 MJ/kg, actualmente desaprovechado para la generación de vapor en las calderas.

Un indicador muy importante para dimensionar la capacidad corrosiva de los gases de la combustión del raquis es su relación molar entre cloro (Cl) y azufre (S). Debido a que son compuestos básicos y ácidos respectivamente, estos se neutralizan entre sí. Una proporción mayor de cloro que de azufre activa procesos corrosivos debido a la ausencia de sulfuros.

La Tabla 3 muestra los componentes de la ceniza del raquis. Se observa el predominio del superóxido de potasio (K<sub>2</sub>O), así como de cloro (Cl). En menor proporción la ceniza se compone de óxidos de calcio (CaO), silicio (SiO<sub>2</sub>) y fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Esto se explica por los ciclos de los minerales y sus correspondientes flujos entre el sustrato y las plantas. Los metales pesados se acumulan en el raquis, siendo un tejido más cercano al tronco de la palma que a su fruto. El contenido de cloro (Cl) es mayor a 2 % y tiene una importancia crucial en la disminución de la temperatura de fusión de la ceniza. Este, está relacionado en forma inversamente proporcional a la temperatura de fusión de la ceniza, por lo tanto, un alto contenido de cloro afectará inmediatamente la adhesión de la ceniza, focalizando su actividad química. Además, es un elemento catalizador que disocia los componen-

tes químicos del acero de aleación, inclusive a bajas temperaturas, liberando el hierro (Fe) para la formación de óxidos.

**Tabla 3.** Caracterización de las cenizas del raquis.

Componentes	(Madhiyanon <i>et al.</i> , 2012)	Propios
SiO <sub>2</sub>	12,12	40,87
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,26	4,77
TiO <sub>2</sub>	-	0,21
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	2,84
CaO	9,65	8,02
MgO	1,90	3,92
Na <sub>2</sub> O	0,09	1,09
K <sub>2</sub> O	55,48	38,00
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3,58	3,44
SO <sub>3</sub>	1,66	1,96
Cl	6,84	2,86
CO <sub>2</sub>	-	1,42

Todas las magnitudes están en % de masa en base seca.

En la práctica, la temperatura de fusión de las cenizas determina cuán alta puede ser la temperatura de la combustión. En el estudio llevado a cabo por (Horák *et al.*, 2019), se seleccionaron distintas biomásas y se determinó la influencia de la composición de las cenizas en su actividad corrosiva debida a su fluencia en forma de aerosoles. Los resultados indican que las temperaturas de fusión son más bajas para el raquis de palma que para otras biomásas debido a su baja concentración de silicio o calcio, pero especialmente a su alta concentración de metales alcalinos.

La Tabla 4 presenta los resultados del análisis último de la fibra de palma de aceite. Se aprecia aquí la marcada diferencia de concentración de metales alcalinos como el potasio en los raquis en comparación con la fibra. Esto evidencia la fenomenología particular de la combustión del raquis respecto de otras biomásas extraídas de la palma de aceite. Explica también los problemas típicos de operación de las calderas de biomasa cuando se sustituye parcialmente la fibra de palma con raquis como combustible.

**Tabla 4.** Análisis último de la fibra de palma de aceite.

Elementos	(García-Núñez <i>et al.</i> , 2006)	(Kaniapan <i>et al.</i> , 2021)
C	43,4 ± 2,3	43,17
H	-	06,09
O	-	49,75
N	1,21 ± 0,08	0,9
S	0,18 ± 0,02	0,09
K	0,52 ± 0,04	-
P	0,059 ± 0,007	-
Na	0,0033 ± 0,002	-

Todas las magnitudes están en % de masa en base seca.

## Entendimiento de los fenómenos nocivos al interior de las calderas asociados a la combustión del raquis de palma

El fenómeno de corrosión dentro de las calderas operando con raquis de palma puede ocurrir en las distintas etapas de la misma, ya sea en los elementos de la cámara de combustión como las parrillas, las zonas de flujo de los gases de combustión como intercambiadores o en los elementos estructurales de la caldera. En cada una de ellas puede ocurrir un proceso de corrosión distinto.

Un común activador de la corrosión asociada con los raquis son las intensas transformaciones químicas de la ceniza que ocurren a altas temperaturas. En especial la vaporización del sodio, azufre y cloro durante la combustión, los cuales surten reacciones químicas cuando se encuentran en fase gaseosa y producen cloruros o sulfatos. Estos productos se condensan a bajas temperaturas de los gases de escape, generando nucleación y precipitación sobre las superficies de la caldera, especialmente sobre las que se encuentran aguas abajo y son responsables del aprovechamiento y transferencia energética. Por ejemplo, cuando los gases de escape entran en contacto con superficies a temperaturas menores a 105 °C se condensan tanto los productos de la reacción como el agua del vapor producido en la combustión (también evaporada de la alta humedad inicial de la biomasa).

1. El vapor de agua condensado proveniente de los gases reacciona con el azufre presente en los gases de la combustión. Dicha reacción produce, entre otros compuestos químicos, ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), energético agente corrosivo por su carácter ácido. La deposición de ácido sulfúrico genera una alta corrosión y adelgazamiento del material en uniones soldadas en aceros de baja aleación empleados en tuberías de conducción de vapor.
2. El cloro condensado proveniente de los gases es otro elemento químico del raquis que provoca un aumento de la sulfuración en contacto con productos condensados. El HCl gaseoso corroe también las superficies al formar cloruros y producir oxidación activa, especialmente en zonas en condiciones reductoras (deficientes en oxígeno) debido a la combustión y al impacto directo de la llama (Nielsen *et al.*, 2000). Por lo mismo, este tipo de corrosión se presenta más frecuentemente en los elementos estructurales dentro de la cámara de combustión.

Una segunda situación es la corrosión alcalina debida a la presencia del fósforo y el potasio. Estos metales reaccionan fácilmente a temperaturas altas formando sales inorgánicas tales como cloruros, óxidos y sulfatos (Horák *et al.*, 2019). Bajas temperaturas de fusión por la presencia de estas sales significan un mayor arrastre por los gases en forma de aerosoles y su consecuente depósito en superficies metálicas de bajas temperaturas. Los problemas de corrosión más graves en los sistemas de combustión de biomasa ocurren gracias a la formación de dichos depósitos que ocurre comúnmente en los tubos del sobrecalentador. También debido a la ocurrencia de reacciones químicas secundarias durante su arrastre por los gases de la combustión.

3. El rápido crecimiento de los depósitos finales de cenizas en los componentes de intercambio de calor retrasa significativamente la transferencia de calor: aumenta las temperaturas en el lado de los gases y disminuye las temperaturas del fluido de trabajo. Esto repercute negativamente en la activación de reacciones químicas en los gases de combustión, como los descritos anteriormente.
4. Temperaturas de metales que exceden los 500 °C activan procesos oxidante-reductores (redox, en los cuales hay transferencia de electrones) que se dan entre el metal y los óxidos/sales (cloruros) de metales alcalinos, particularmente, debido a las

altas concentraciones de  $K_2O$  y  $KCl$  en los depósitos de ceniza del raquis. Estos procesos altamente corrosivos ocurren a temperaturas bajo el punto de fusión del  $KCl$ , focalizándose especialmente en las superficies de los sobrecalentadores.

5. La corrosión puede verse reforzada por el  $SO_2$ , que puede provocar la sulfatación de los cloruros alcalinos dentro del depósito, liberando  $HCl$  o  $Cl_2$  cerca de la superficie del metal (Horák *et al.*, 2019). En caso de que la temperatura de la superficie del metal sea lo suficientemente alta como para que se formen fases fundidas en el depósito (de los compuestos químicos que componen los gases de combustión), la corrosión puede aumentar aún más (Horák *et al.*, 2019).
6. Las partículas de cenizas volantes transportadas a alta velocidad en forma de aerosoles impactan contra las paredes del hogar de combustión generando la abrasión directa de las superficies. Este fenómeno se le denomina erosión y es semejante a la corrosión química descrita anteriormente.

Se llega a la conclusión de que la combustión de raquis de palma iniciará inevitablemente la fusión de las cenizas, su arrastre en forma de aerosoles, la posterior acumulación de los depósitos solidificados y la consiguiente activación de la corrosión en superficies que excedan los 500 °C. Además, se presentarán también procesos erosivos en los elementos que enfrentan los gases de combustión cargados con las cenizas.

## Propuestas tecnológicas para el diseño de calderas de biomasa que usen raquis de palma como combustible

Por las razones anteriormente expuestas, si se desea aprovechar los raquis de palma como combustible dentro de las calderas de biomasa es necesario, en parte, contar con el control detallado de las temperaturas y velocidades al interior de la caldera, así como de la distribución del raquis sobre la parrilla.

Dentro del hogar de combustión es muy importante tener en cuenta:

- Controlar la distribución y composición de los raquis de palma sobre las parrillas en la cámara de combustión, permitiendo así combustiones más homogéneas, la remoción de cenizas, la limitación de la fundición de las cenizas y el control

de la composición de los gases de la combustión. Una propuesta es la optimización del sistema de combustión mediante parrillas escalonadas y reciprocantes. Esto puede mejorar la eficiencia de la combustión de la biomasa y reducir las emisiones de contaminantes atmosféricos. La parrilla escalonada está diseñada para transportar los raquis desde el punto de alimentación hasta el punto de descarga de cenizas mediante movimientos reciprocantes de las barras, que están dispuestas en filas intercaladas fijas y móviles. Se debe intentar que la alimentación distribuya el combustible fresco de manera uniforme y a un ritmo constante sobre la totalidad de las barras de la parrilla. No se deben adoptar métodos de limpieza (manual o automáticos) de ceniza sobre la parrilla: un diseño óptimo debe mantener bajo el nivel de deposición de las cenizas en lugares distintos a los depósitos de ceniza.

- Precalentar el aire primario para disminuir el contenido de humedad de los raquis a valores menores a 40 %. Esto es necesario para evitar problemas en la combustión y permitir la aplicación del control automatizado de la combustión actualmente en funcionamiento en calderas de biomasa, especialmente en las instaladas en plantas de beneficio de aceite de palma. Sin embargo, precalentar el aire también puede producir un efecto indeseado sobre los gases de la combustión: su aumento de temperatura sobre la parrilla, una mayor flotabilidad de los gases, la generación de turbulencia y el aumento de la transferencia de calor hacia las paredes del hogar. Una propuesta es la de propiciar cuatro zonas de diferentes procesos dentro de la cámara de combustión. Una primera zona de secado con aire precalentado únicamente inyectado en esta primera franja, y una segunda franja que incluya la zona de desvolatilización, la zona de combustión y la zona de quema de carbón fijo. El aire se inyecta a temperatura ambiente en esta segunda franja para evitar las altas temperaturas y propiciar gradientes térmicos que influyan en la flotabilidad y turbulencia de los gases.
- Disminuir el exceso de aire en la combustión a valores en el rango de 25 % a 40 %, lo que permite el diseño de equipos más eficientes y similares a los actualmente instalados en las plantas de beneficio de palma. Para esto se debe suministrar el aire primario a las cuatro zonas de combustión desde debajo de la parrilla para el acondiciona-

miento de los raquis en el lecho del combustible, mientras que el aire secundario se debe suministrar a una altura suficiente sobre la parrilla que propicie la combustión de los volátiles y la separación de las zonas de combustión. Este diseño es clave para mejorar la eficiencia en la transferencia de calor por convección hacia las paredes del hogar. Fenómeno que resulta irrevocablemente en el control de la temperatura de los gases.

- En cuanto al diseño de la caldera, el volumen de la cámara de combustión, los sistemas de combustión y los ductos de escape deben estar diseñados para permitir la correcta evacuación de cenizas, así como limitar a 900 °C la temperatura de los gases de combustión a la salida de la caldera. Una opción para lograr este propósito es tener un gran volumen del hogar aumentando su altura. Esto propicia un área mayor de intercambio de calor de los gases de la combustión, que disminuye su temperatura.

En los intercambiadores de calor es indispensable:

- Controlar las temperaturas tanto del lado de los gases como del lado del vapor para evitar las corrosiones ácidas y alcalinas. Esta última debe controlarse para disminuir el ritmo de corrosión por los depósitos de ceniza. Es importante saber que el rango de 500 °C a 550 °C en el vapor es especialmente susceptible a corrosión.
- Controlar las velocidades de los gases de combustión para evitar la corrosión/erosión debido al flujo de cenizas alcalinas y su impacto en las paredes de la caldera. La geometría de los ductos por donde fluyen los gases debe tener en cuenta los puntos donde la ceniza tenderá a impactar y posteriormente depositarse. Por ejemplo, esto se presenta generalmente en las placas pirotubulares de los intercambiadores de calor. Para ello, una herramienta científica y tecnológica fundamental en el diseño de estas geometrías es la dinámica de fluidos computacional. Dicha herramienta logra el entendimiento completo de los campos de flujo de los gases, lo que optimiza el flujo que impacta sobre las superficies, elimina vórtices locales en el campo de flujo y evita puntos de acumulación.
- Usar materiales aleados que soporten la corrosión activa del cloro, por ejemplo, aleaciones de acero con altos porcentajes de cromo o níquel, como lo recomienda la norma ASME dedicada a calderas y recipientes de presión, sección I (ASME, 2002).

Otra opción es recubrir la superficie de dichos elementos con níquel, cobalto o cromo. Este último tipo de recubrimiento permite obtener una protección adicional cuando el oxígeno actúa sobre el cromo en el proceso de combustión, lo que genera una película de óxido de cromo que protege la integridad estructural ante sustancias alcalinas.

Otras estrategias pueden ser:

- La inclusión de aditivos que modifiquen la química de las cenizas y los gases de combustión, especialmente de aquellos que controlen la fusión de las cenizas en el hogar, reduciendo la proporción de partículas o aerosoles de cenizas en el flujo de gases de combustión. Un aditivo puede ser el azufre, debido a que en proporciones molares con el cloro menores a dos tiene un efecto neutralizador que aumenta la temperatura de fusión de la ceniza. Además, con la adición de sulfatos se forman sulfuros de hierro dentro del óxido de los elementos metálicos, lo que reduce la activación del proceso de corrosión por la casi ausencia de cloruros de hierro. También se puede adicionar caolín o sulfato de amonio para cambiar las propiedades de las cenizas y, eventualmente, los mecanismos de formación de las mismas (Madhiyanon *et al.*, 2012).
- La inclusión de elementos fusibles expuestos a los gases de la combustión de la biomasa para focalizar en estos el crecimiento de los depósitos de ceniza. Estos elementos sufrirían una corrosión acelerada *in situ*, midiendo los resultados de adelgazamiento del material y reemplazándolos preventivamente.
- Incluir películas fluidas sobre los tubos de intercambio de calor. Esto puede favorecer la transferencia de calor, así como controlar la fuerza de corte de las partículas sobre las paredes y su adherencia a las mismas. Los recubrimientos de alambre o polvo muestran buenas propiedades para proteger los tubos de acero de los intercambiadores, contra la erosión producida por el impacto de las cenizas en los gases de combustión.

A partir de las estrategias anteriormente descritas, se propone un diseño de caldera que implemente las recomendaciones enunciadas. Dicho diseño considera un adecuado volumen del hogar de combustión, su división en distintas zonas de adecuación del raquis sobre parrillas escalonadas y reciprocantes, cuya temperatura media estimada sobre el lecho de

combustible sea menor a 770 °C, así como la correcta distribución del aire de combustión primario precalentado y secundario a temperatura ambiente.

Se propone con este diseño que las temperaturas medias durante el secado, la desvolatilización y la combustión, y las zonas de combustión del carbón, sean menores a 400 °C, 500 °C, 700 °C y 1.000 °C, respectivamente. Con una inyección de aire secundario a una altura suficiente sobre la parrilla, se entiende que los gases se queman completamente y se generan efectos turbulentos sobre los mismos. Aguas abajo del punto de inyección secundario se presentan temperaturas que disminuyen considerablemente antes de su evacuación debido a la altura del hogar y al mayor intercambio de calor convectivo con las paredes del mismo. El diseño también considera una planeación de ductos que limite las recirculaciones del gas, mejore su flujo a través de los intercambiadores de calor, y que además incluya en la configuración de los sobrecalentadores algunas de las estrategias descritas anteriormente en este apartado.

## Conclusiones

Uno de los obstáculos más importantes para el uso energético del raquis de palma es la inadecuada configuración de las tecnologías empleadas para el aprovechamiento de su combustión. Los componentes más abundantes en la biomasa de raquis de palma son potasio y fósforo, pero también cuenta con altas concentraciones de cloro, silicio y calcio. Estos forman cenizas con bajos puntos de fusión, que son arrastradas por los gases de la combustión causando graves incrustaciones, escoriación, abrasión y corrosión. El objetivo de este trabajo ha sido el de propiciar el estudio y, consecuentemente, el control de las problemáticas asociadas con su combustión en calderas de biomasa.

La eficiencia e integridad de la caldera dependerá completamente del diseño particular en función de las características del raquis. Esto es, el diseño en función de la naturaleza del raquis de palma como combustible y sus impactos en los componentes de la caldera. Algunas consideraciones prácticas sobre el diseño de los componentes de dicha caldera tienen que ver con:

- El correcto diseño del sistema de alimentación del combustible, la parrilla soporte del combustible, el volumen del hogar de combustión.

- El manejo y control de los gases de la combustión en su paso por los intercambiadores de calor.
- Otras estrategias exploratorias de control químico o mecánico del combustible o de los gases de combustión se plantean como posibilidades complementarias.

Este artículo sugiere la necesidad de hacer trabajos conjuntos industria-academia, así como generar capacidades permanentes de investigación, desarrollo e innovación. Relación que inequívocamente resulta en la elaboración de productos industriales novedosos basados en investigación aplicada. Por ejemplo, se demuestra aquí el proceso de estudio técnico que resulta en nuevos prototipos y secretos industriales del diseño y la fabricación de calderas. Aspectos claves de las calderas que han sido gestados a partir del proyecto conjunto de investigación de VR Ingeniería y el Centro de Ingeniería Avanzada, Investigación y Desarrollo. Toda génesis de nuevas líneas de aprovechamiento energético, disminución de costos y generación de retorno tienen como base el entendimiento a profundidad del conocimiento técnico-científico involucrado en ellas.

Como fase subsiguiente del presente artículo es importante:

- Realizar un análisis de viabilidad técnico-financiera de las propuestas tecnológicas descritas en el presente artículo.
- Especialmente mediante el contraste con la utilización del raquis en la industria como complemento edáfico para la fertilización de la palma de aceite, como se hace con alguna frecuencia hoy en día.

De esos análisis se derivaría un mayor entendimiento del sentido técnico/económico, el alcance de la inversión y en dado caso, el desarrollo/prueba del prototipo de la caldera aquí enunciada.

## Agradecimientos

Camilo Bayona-Roa y Juan Guillermo García-Navarro agradecen el apoyo técnico científico brindado por el Centro de Ingeniería Avanzada, Investigación y Desarrollo (CIAID). Especialmente a Diego Castellanos y Sebastián Gómez por el apoyo prestado en la ilustración y documentación para la redacción de este artículo.

## Bibliografía

- Albarracín Becerra, F. H. & Méndez Rangel, J. P. (2019). *Diseño y evaluación de un sistema co-firing biomasa—Biogás en una planta extractora de aceite de palma*. Universidad Autónoma de Bucaramanga.
- ASME. (2002). *ASME Boiler and Pressure Vessel Code: An International Code*. American Society of Mechanical Engineers New York.
- Bayona Roa, C. A. (2011). *Modelamiento matemático de un secador solar de plantas aromáticas*. Universidad Nacional de Colombia.
- Betancourt Prisco, J. C. & Ospina Berrío, J. E. (2010). *Diseño y construcción de un prototipo de caldera que usa como combustible cáscara de *Jatropha Curca**. Universidad EAFIT.
- Carvajal Díaz, P. D. (2018). *Estudio de desempeño de un sistema de co-combustión biomasa—biogás en una caldera de parrilla utilizando la herramienta Thermoflex*. Universidad Autónoma de Bucaramanga.

- Chiew, Y. L. & Shimada, S. (2013). Current State and Environmental Impact Assessment for Utilizing Oil Palm Empty Fruit Bunches for Fuel, Fiber and Fertilizer—A Case Study of Malaysia. *Biomass and bioenergy*, 51, 109-124.
- Fedepalma. (2022). *Informe de Gestión Fedepalma 2021* (p. 108). Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite, Fedepalma.
- Galindo-García, I. F., Vázquez-Barragán, A. K. & Rossano-Román, M. (2012). *CFD Simulations as a Tool for Flow and Thermal Analysis in Boilers of Power Plants*. 6.
- García-Núñez, J. A., García-Pérez, M. & Das, K. C. (2006). Determination of Kinetic Parameters of Thermal Degradation of Palm Oil Mill by Products Using Thermogravimetric Analysis and Differential Scanning Calorimetry. *2006 Portland, Oregon, July 9-12, 2006*. doi: <https://doi.org/10.13031/2013.21519>
- Hernández, J. C. B., Contreras, N. E. R. & Núñez, J. A. G. (2018). Combustión de biomasa: conceptos, tecnologías y aplicaciones en la agroindustria de la palma de aceite. *Revista Palmas*, 39(4), 24-44.
- Horák, J., Kuboňová, L., Dej, M., Laciok, V., Tomšejová, Š., Hopan, F., Krpec, K. & Koloničný, J. (2019). Effects of the type of Biomass and Ashing Temperature on the Properties of Solid Fuel Ashes. *Polish Journal of Chemical Technology*, 21(2).
- Kaniapan, S., Hassan, S., Ya, H., Patma Nesan, K. & Azeem, M. (2021). The Utilization of Palm Oil and Oil Palm Residues and the Related Challenges as a Sustainable Alternative in Biofuel, Bioenergy, and Transportation Sector: A Review. *Sustainability*, 13(6), 3110.
- Lakshmanan, S. (2021). Lessons Learnt from Biomass-fueled Power Plant. *Journal of Oil Palm, Environment and Health (JOPEH)*, 12.
- Loh, S. (2017). The Potential of the Malaysian Oil Palm Biomass as a Renewable Energy Source. *Energy Conversion and Management*, 141, 285-298.
- Madhiyanon, T., Sathitruangsak, P., Sungworagarn, S., Pipatmanomai, S. & Tia, S. (2012). A Pilot-scale Investigation of Ash and Deposition Formation During Oil-Palm Empty-Fruit-Bunch (EFB) Combustion. *Fuel processing technology*, 96, 250-264.
- Miles, T. R., Miles Jr., T. R., Baxter, L. L., Bryers, R. W., Jenkins, B. M. & Oden, L. L. (1996). Boiler Deposits from Firing Biomass Fuels. *Biomass and Bioenergy*, 10(2-3), 125-138.
- Ngamsidhipongsa, N., Ghoniem, A. F. & Arpornwichanop, A. (2021). Detailed Kinetic Mechanism of Devolatilization Stage and CFD Modeling of Downdraft Gasifiers Using Pelletized Palm Oil Empty Fruit Bunches. *Renewable Energy*, 179, 2267-2276.
- Nielsen, H. P., Frandsen, F. J., Dam-Johansen, K. & Baxter, L. L. (2000). The Implications of Chlorine-associated Corrosion on the Operation of Biomass-fired Boilers. *Progress in Energy and Combustion Science*, 26(3), 283-298.
- Ninduangdee, P., Kuprianov, V. I., Cha, E. Y., Kaewrath, R., Youngyuen, P. & Atthawethworawuth, W. (2015). Thermogravimetric Studies of Oil Palm Empty Fruit Bunch and Palm Kernel Shell: TG/DTG Analysis and Modeling. *Energy Procedia*, 79, 453-458.

- Olisa, Y. P. & Kotingo, K. W. (2014). Utilization of Palm Empty Fruit Bunch (PEFB) as Solid Fuel for Steam Boiler. *European Journal of Engineering and Technology*, 2(2).
- Pérez, C. I. T. & López, L. A. Q. (2019). Análisis de residuos sólidos de palma africana, como alternativa de aprovechamiento de energías renovables en el departamento del Cesar. *Ingenierías USBMed*, 10(1), 8-18.
- Ramírez, C., Nidia, E., Garzón, E. M., Silva, R., Ángela, S., Yáñez, A. & Edgar, E. (2011). *Caracterización y manejo de subproductos del beneficio del fruto de palma de aceite*.
- Rosli, N. S., Harun, S., Jahim, J. M. & Othaman, R. (2017). Chemical and Physical Characterization of Oil Palm Empty Fruit Bunch. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 21(1), 188-196.
- Serrano, M. (1995). Utilización de los racimos vacíos de la palma de aceite. *Revista Palmas*, 16(especial), 114-120.
- Srasri, S., Bhudsarakam, N., Limsutthiphong, P., Ratanapitag, T. & Julsereewong, A. (2022). Design of Step Grate Firing by Utilizing Palm Empty-Fruit-Bunch Fuel for Industrial Steam Boiler Construction. *Energy Reports*, 8, 275-282.
- Taishan Group (2017). Empty Fruit Bunch Boiler. Recuperado de <http://www.coalbiomassboiler.com/empty-fruit-bunch-boiler/>
- Van Dam, J. (2016). Subproductos de la palma de aceite como materias primas de biomasa. *Revista Palmas*, 37, 149-156.
- Villamil Franco, L. & Cuartas Ramos, I. (2017). *Diseño del sistema de distribución de aire para la combustión de bagazo de caña de azúcar en una caldera acuotubular mediante simulación CFD*. Universidad del Valle.



## Los recursos del Fondo de Fomento Palmero

tienen como propósito proveer bienes públicos de interés sectorial que contribuyen a aumentar la productividad, rentabilidad y sostenibilidad de la agroindustria de la palma de aceite.