

**EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN
QUEMADOR DE TIRO FORZADO**

**EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN
QUEMADOR DE TIRO FORZADO**

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y AMBIENTALES

Trabajo de Fin de Carrera Titulado:

**“EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN
QUEMADOR DE TIRO FORZADO”**

Realizado por:

OLGER GUILLERMO PÉREZ VALENCIA

Director del proyecto:

Ing. Edilberto Antonio Llanes Cedeño, PhD.

Como requisito para la obtención del título de:

**MAGÍSTER EN ECOEFICIENCIA INDUSTRIAL CON MENCIÓN EN EFICIENCIA
ENERGÉTICA**

Quito, Marzo 2020

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, OLGER GUILLERMO PÉREZ VALENCIA, con cédula de identidad # 100319775-1, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.



FIRMA
100319775-1

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

DECLARATORIA

El presente trabajo de investigación titulado:

“EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO”

Realizado por:

OLGER GUILLERMO PÉREZ VALENCIA

como Requisito para la Obtención del Título de: **MAGÍSTER EN ECOEFICIENCIA INDUSTRIAL CON MENCIÓN EN EFICIENCIA ENERGÉTICA**

ha sido dirigido por el profesor

Ing. Edilberto Antonio Llanes Cedeño, PhD.

quien considera que constituye un trabajo original de su autor



FIRMA

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

LOS PROFESORES INFORMANTES

Los Profesores Informantes:

JAVIER MARTINEZ GOMEZ

JEFFERSON RUBIO AGUIAR

Después de revisar el trabajo presentado,

lo han calificado como apto para su defensa oral

ante el tribunal examinador



FIRMA



FIRMA

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

DEDICATORIA

Este trabajo quiero dedicar a mi hijo Ismael Pérez como muestra de que la constancia y la confianza en uno mismo serán nuestras herramientas para cumplir muchos objetivos propuestos. Todo mi esfuerzo y trabajo es por ti y para ti hijo mío, mi gigante chiquito.

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

AGRADECIMIENTO

Este trabajo y nueva etapa culminada agradezco a mi familia que siempre han confiado en mi capacidad, y en especial a mi compañera de vida y esposa Elianita por su apoyo incondicional que tanta falta me hizo. Además, a la Universidad Internacional SEK por la oportunidad de adquirir nuevos conocimientos y desarrollarme profesionalmente. Gracias a todos.

**EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN
QUEMADOR DE TIRO FORZADO**

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

CONTENIDO

DECLARACIÓN JURAMENTADA.....	ii
DECLARATORIA	iii
LOS PROFESORES INFORMANTES.....	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
CONTENIDO	viii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
Resumen.....	xi
Abstract	xii
Introducción.....	1
Estado del Arte.....	4
Combustión de biomasa.....	4
Principios de combustión.....	4
Combustible	5
Características térmicas de la biomasa	6
Cuesco (PKS).....	7
Temperatura adiabática de llama	8
Poder calorífico Inferior.....	10

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

Poder calorífico Superior	12
Relación aire combustible.....	12
Humedad en el aire de combustión.....	14
Entalpías de formación y combustión.....	16
Análisis de combustión en base a la primera ley	16
Eficiencia de la combustión.....	17
Materiales y Métodos.....	19
Descripción del sistema	22
Diseño de Experimentos	24
Método	24
Materiales.....	25
Resultados.....	26
Discusión.....	32
Conclusiones.....	35
Bibliografía	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características biomasa (PKS).....	8
Tabla 2. Condiciones climatológicas de investigación.....	14
Tabla 3. Designación de variables experimentales	24
Tabla 4. Equipos y materiales	25
Tabla 5. Análisis de varianza	26
Tabla 6. Resumen de resultados obtenidos	33

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estructura de consumo por sectores	3
Figura 2: Temperatura de llama teórica en función de la humedad contenida y exceso de aire de combustión	9
Figura 3: Diagrama de proceso de medición	20
Figura 4: Diagrama de proceso de generación de resultados.....	21
Figura 5: Quemador de tiro forzado de 70 kW	23
Figura 6: Diagrama de Pareto Estandarizada para Eficiencia.....	26
Figura 7: Eficiencia de Combustión	27
Figura 8: Superficie de respuesta estimada.....	28
Figura 9: Eficiencia de Combustión vs Temperatura de Combustión	29
Figura 10: Temperatura de combustión vs eficiencia de combustión.....	29
Figura 11: Potencia térmica vs Temperatura de combustión.....	30
Figura 12: Eficiencia de Combustión vs Temperatura de combustión medida	30
Figura 13: Eficiencia de combustión vs exceso de aire	31
Figura 14: Potencia térmica efectiva vs Exceso de aire.....	32
Figura 15: Temperatura de combustión vs tiempo	32
Figura 16: Eficiencia de combustión vs tiempo.....	33

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

Resumen

El presente estudio evalúa el aprovechamiento de cuesco de palma africana (PKS) como una alternativa de generación de energía térmica para uso comercial e industrial frente a combustibles fósiles. Mediante la identificación óptima de la relación de aire/combustible del cuesco de palma africana a partir de la medición de la temperatura de llama adiabática en un quemador de tiro forzado se analiza el punto de mayor eficiencia de combustión y generación de energía térmica. En la metodología de eficiencia de combustión de biomasa sólida (PKS), el flujo másico del cuesco de palma africana y el flujo de aire de combustión han sido evaluados como variables independientes y la eficiencia de combustión como variable dependiente para la producción de energía térmica. Por otro lado, los valores de humedad relativa, temperatura ambiente, humedad absoluta del cuesco se mantuvieron constantes durante toda la fase de experimentación. Se implementa un diseño experimental de superficie para evaluar la óptima relación de aire combustible (A/C) para el cálculo de la eficiencia de combustión mediante la medición de la temperatura de llama adiabática. En la fase experimental de combustión de cuesco (PKS) en un quemador de tiro forzado de 70 kW de potencia térmica, se obtiene una eficiencia máxima de combustión del 84 % al tener presencia estable de llama de combustión máxima de 1244 K con el menor porcentaje de exceso de aire del 33,18 % y con el máximo flujo de 15 kg/h de PKS permitido por el quemador y 115 kg/h de aire o al 100% la capacidad del ventilador centrifugo. Por lo que se considera la óptima relación de aire-combustible de 7,7 kg de aire/kg PKS.

Palabras clave: Combustión, residuos agroindustriales, cuesco, energía térmica, potencial energético.

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

Abstract.

The present study evaluates the use of African palm kernel (PKS) as an alternative for generating thermal energy for commercial and industrial use against fossil fuels. By means of the optimal identification of the air / fuel ratio of the African palm grove from the measurement of the adiabatic flame temperature in a forced draft burner, the point of greatest combustion efficiency and thermal energy generation is analyzed. In the solid biomass combustion efficiency (PKS) methodology, the mass flow of African palm kernel and the combustion air flow have been evaluated as independent variables and combustion efficiency as a dependent variable for thermal energy production. On the other hand, the values of relative humidity, ambient temperature, absolute humidity of the cuesco remained constant throughout the experimentation phase. An experimental surface design is implemented to evaluate the optimum fuel air ratio (A / C) for the calculation of combustion efficiency by measuring the adiabatic flame temperature. In the experimental phase of combustion of cuesco (PKS) in a forced draft burner of 70 kW of thermal power, a maximum combustion efficiency of 84% is obtained by having stable presence of maximum combustion flame of 1244 K with the lowest percentage of excess air of 33.18% and with the maximum flow of 15 kg / h of PKS allowed by the burner and 115 kg / h of air or at 100% the capacity of the centrifugal fan. Therefore, the optimum fuel-air ratio of 7.7 kg of air / kg PKS is considered.

Key words: *Combustion, agroindustrial waste, thermal energy, energy potential.*

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

Introducción.

En la actualidad, la búsqueda e implementación de nuevas fuentes de energía ha tomado gran importancia debido a problemas relacionados con el cambio climático y el agotamiento de combustibles fósiles; el uso de residuos agroindustriales ha tenido gran acogida por ser una posible fuente renovable de energía. (Salaet & Roca, 2015)

En Ecuador “la producción de palma ha tenido un crecimiento del 8 % en promedio anual, en el periodo 2010- 2016” (Ministerio de Comercio Exterior, 2017), esto genera también un aumento en los residuos generados a partir del proceso de producción de dichos aceites.

La industria extractora de aceite de palma africana apenas utiliza una fracción de la biomasa residual que genera (fibras) en calderas de bajo rendimiento para producir energía térmica siendo que existe un importante excedente para el que actualmente no existe uso definido (Salomón, 2014)

Por otro lado Mitschke (2016):

La cantidad de residuos de palma africana que se generan en el Ecuador puede ser dividida entre: raquis, fibra, cuesco y residuos de campo, siendo que en su totalidad alcanzan las 7.336.959 toneladas por año. Dentro de estos residuos, el cuesco de palma africana cobra especial relevancia debido a la cantidad disponible (125.000 t/año) su poder calórico inferior (18.49 MJ/kg) (Uemura et al., 2011) y características físicas que asemejan un pellet producido de forma natural.

En Ecuador, “desde el año 2000 al 2012, la producción nacional de palma africana aumentó en 114%, debido a la creciente demanda internacional de este producto y al incremento en los precios internacionales” (MAGAP, 2013).

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

Considerando este particular, Ecuador ha tomado parte en las experiencias acerca del aprovechamiento energético de residuos agrícolas con distintos proyectos, tales como generación de aire caliente por combustión de residuos de palma africana (cuesco) para generar 400 m³/h de aire caliente mediante el consumo de 35 kg/h de residuos de palma (Calderón, Andrade, Lizarzaburu, & Masache, 2017).

Además, en Ecuador existen algunas plantas que producen energía y vapor mediante el aprovechamiento de biomasa, las más importantes son “Ecoelectric (36,5 MW, utiliza bagazo y otros residuos agrícolas), San Carlos (35 MW) y Ecudos (29,8 MW)” (Gomelsky, 2013) que aprovechan sus propios residuos generados.

Mediante un estudio denominado: Estudio sobre la quema de cáscara de almendra de palma de aceite en un combustor cónico de lecho fluidizado utilizando alúmina como material de lecho, el cual para los rangos de condiciones de operación, “la eficiencia de combustión del FBC cónico fue básicamente alta, alrededor del 99%, mientras que las principales emisiones gaseosas (CO y NO) del combustor se encontraban en niveles que cumplían con los límites nacionales de emisión” (Pichet Ninduangdee, 2013), esta característica representa una alternativa significativa para su estudio y experimentación de su eficiencia de combustión.

La biomasa mundial ocupa el cuarto lugar como recurso energético, ya que “proporciona aproximadamente el 14% de las necesidades energéticas del mundo” (Demirbas, 2004). El proceso de combustión de biomasa implica una serie de aspectos físicos / químicos de alta complejidad. La naturaleza del proceso de combustión depende tanto de las propiedades del combustible como de la aplicación de la combustión (Koppejan, 2008). La combustión de biomasa es un fenómeno complejo que involucra la transferencia simultánea de calor y masa acoplada con una reacción química y flujo de fluido. Su predicción para los propósitos de diseño y control requiere el conocimiento de las propiedades del combustible y la manera en

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

que estas propiedades influyen en el resultado del proceso de combustión (Jenkins, 1988).

El consumo energético en el Ecuador según el Balance Energético Nacional 2017, a 2017, el sector industrial ocupa como segundo lugar requeridor energético con el 14% después del sector transporte que ocupa el 50%, estos porcentajes se presenta en la Figura 1:

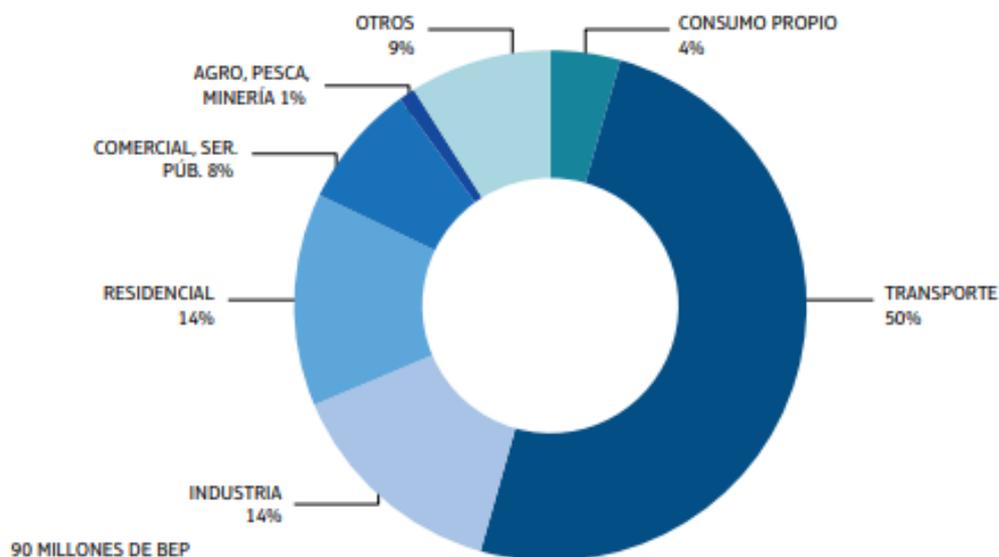


Figura 1: Estructura de consumo por sectores

Fuente: (Ministerio de energía y recursos naturales no renovables, 2018)

Los combustibles fósiles han predominado como la energía mayor consumida en el país, con una participación cercana al “78 % durante todo el periodo entre 2007 hasta el 2017. De éstos, el diésel y la gasolina tienen la mayor participación, los cuales aumentaron su demanda en 44 % y 77 % entre 2007 y 2017, respectivamente” (Ministerio de energía y recursos naturales no renovables, 2018).

El incremento progresivo de consumo de combustibles fósiles, en específico diésel en el sector industrial, promueve la investigación de nuevas fuentes de generación de energía térmica que sustituya los combustibles fósiles por el consumo de recursos renovables. Para ello, la tecnología con mayor robustez y que Ecuador tiene experiencia es la combustión por lo que el presente estudio tiene como objetivo general el identificar la relación de aire/combustible

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

del cuesco de Palma Africana mediante la medición de la temperatura de llama adiabática para obtener mayor eficiencia de combustión, para ello se trazan los siguientes objetivos específicos:

- Identificar la eficiencia real de combustión de cuesco de Palma Africana en un quemador de tiro forzado de biomasa.
- Medir y calcular las variables dependientes que influyen en la obtención del porcentaje de eficiencia de combustión.

Estado del Arte

Combustión de biomasa

La combustión es un proceso en el que el carbono y el hidrógeno contenidos en el combustible reaccionan con el oxígeno para formar CO₂ y agua y liberación de calor o energía térmica (Cerdá, 2009). Esta energía se libera al romper los enlaces de los compuestos orgánicos en el proceso de combustión, dando como productos finales dióxido de carbono y agua (Fernández, 2013).

Cabe mencionar que, para efectuar la combustión de un combustible, poner el combustible en contacto con el oxígeno no es suficiente para iniciar la combustión. El combustible requiere de su temperatura de ignición para iniciar la combustión (Yunes & Cengel, 2011)

Principios de combustión

Considerando que los combustibles orgánicos sólidos tienen una propiedad característica de no ser inflamables en condiciones ambientales además de su volatilidad que

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

se obtiene cuando la biomasa es calentada (hasta 400 a 500 °C).

La biomasa tiene típicamente un alto contenido de materia volátil (de hasta 80 por ciento), mientras que el carbón mineral tiene un contenido de materia volátil bajo (menos de 20 por ciento) o, en el caso del carbón de antracita, que es insignificante. (Toscano Morales, 2009)

Para producir energía térmica o combustión con la biomasa sólida, existen principios y una cadena de procesos de conversión termoquímica las cuales son (Earthscan, 2005):

1. Calentamiento
2. Secado: Evaporación del agua contenida
3. Pirólisis y reducción: Descomposición térmica del combustible en gases volátiles y carbón sólido.
4. Gasificación del combustible sin agua.
5. Gasificación del carbono sólido.
6. Oxidación de los gases combustibles.

La combustión completa de las biomásas depende del control de cuatro factores (Gómez, 2013):

- 1) El aire de oxidación debe ser suministrado en exceso (más que el estequiométrico).
- 2) El proceso entero de combustión requiere una temperatura suficientemente alta.
- 3) La mezcla de los gases del combustible y el aire generados en el proceso, requiere de un tiempo suficientemente largo de detención en la zona de reacción.
- 4) El control del proceso debe tener una buena mezcla de los gases del combustible y del aire suministrado.

Combustible

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

Los combustibles son sustancias de origen natural o artificial con un alto contenido en carbono e hidrógeno, a los que acompañan impurezas, entre la que podemos destacar el azufre.

Entre los combustibles naturales se puede encontrar la biomasa, biogases y los combustibles fósiles (carbón y petróleo) que son los más utilizados.

Características térmicas de la biomasa

Cada tipo de biomasa tiene propiedades específicas (Peter - Quaak, 1999) para su aprovechamiento en combustión, las principales son:

Características físicas: densidad aparente, densidad real y humedad.

Análisis elemental: porcentaje en masa de oxígeno, carbono, hidrógeno azufre y nitrógeno.

Análisis próximo: Determina los porcentajes de materia volátil, contenido de carbono fijo, poder calorífico y ceniza.

Composición: contenidos de lignina, celulosa, hemicelulosa, proteínas, azúcares, grasas y aceites.

Análisis próximo (%)

Contenido de humedad en la biomasa

% Ceniza

Material volátil

Análisis último (%)

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

Composición elemental (Carbono, nitrógeno e hidrógeno)

Poder Calorífico (PCS y PCI)

Densidad aparente (kg/m³)

La evaluación de cada componente anteriormente detallado muestra la idoneidad de utilizarlo como biocombustible sólido para generar la combustión.

Cuesco (PKS)

Para Forero Núñez, y otros (2010) el cuesco se refiere a la cáscara que recubre la almendra y a las fibras resultantes del proceso de prensado del fruto. Las cáscaras de la almendra o cuesco mediante un análisis experimental se obtuvo un poder calorífico inferior de 21,1 MJ/Kg y un poder calorífico superior de 22,2 MJ/kg, mientras que las fibras tienen un poder calorífico inferior de 17,1 MJ/ Kg y un poder calorífico superior de 18,4 MJ/kg que representan el 10% del peso del racimo (A. Gómez, 2004)

Por otro lado Buzón Ojeda (2010) comenta en su investigación que:

Con el fin de encontrar soluciones para sectores sociales de bajos ingresos, investigaciones recientes en el campo de la ingeniería civil, la arquitectura y la construcción, se ha buscado insumos no convencionales para reducir los costos de proyectos mediante la utilización de productos no convencionales, como es el caso de desecho de la palma de aceite “Cuesco”.

Se refiere a la cáscara que recubre la almendra y a las fibras resultantes del proceso de prensado del fruto. El uso de este residuo agroindustrial como combustible no solo contribuye con el tratamiento de residuos del proceso de obtención del aceite de palma, sino que ayuda a disminuir la emisión de gases de efecto invernadero provenientes de los combustibles fósiles.

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

De acuerdo al análisis realizado por el Instituto Nacional de Energías Renovables y Eficiencia Energética 2016, el cuesco tiene las características que se detallan en la Tabla 1:

Tabla 1

Características biomasa (PKS)

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Poder Calórico Superior, MJ/kg	19,52
Cenizas, %(p/p)	1,8
Carbono, %(p/p)	51,60*
Nitrógeno, %(p/p)	0,00*
Hidrógeno, %(p/p)	7,21*

*Resultados expresados en base seca

Temperatura adiabática de llama

La temperatura adiabática de la llama es la máxima temperatura que pueden alcanzar los productos de la combustión, ya que es la que se obtendría si todo el calor desarrollado por el proceso se utiliza íntegramente para calentar dichos productos.

Se comprende que su valor depende del exceso de aire, y crecerá al tender a cero dichos excesos. La temperatura puede elevarse si es alimentado con aire enriquecido de oxígeno o puede elevarse si se utiliza aire y combustible precalentados. Para calcularla se plantea el siguiente balance de energía de acuerdo a la ecuación 1. (Martínez, 2005):

$$H_i + hc + \frac{A}{C} \cdot ha = V \cdot C_{pm} \cdot T \quad (1)$$

Donde:

H_i , poder calorífico del combustible

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

h_c , entalpía del combustible que depende de su temperatura

h_a , entalpía del aire húmedo

A/C, relación aire-combustible

V, cantidad de productos de combustión

C_{pm}, calor específico medio de los productos de combustión

T, temperatura adiabática de llama

La Figura 2 muestra la temperatura de combustión adiabática en función del contenido de humedad y la proporción de aire en exceso para una composición de combustible de 50% en peso C, 6% en peso H y 44% en peso O (base seca (d.b.)) (Koppejan, 2008).

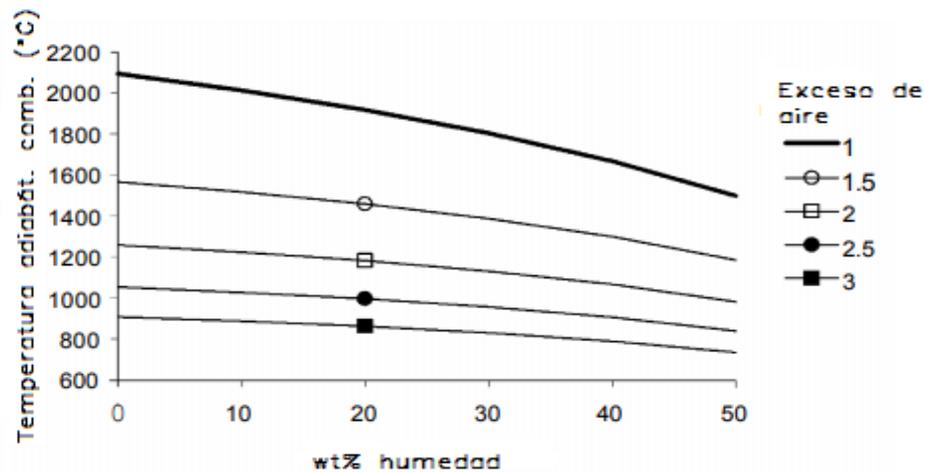


Figura 2: Temperatura de llama teórica en función de la humedad contenida y exceso de aire de combustión

Fuente: (Koppejan, 2008)

Las emisiones causadas por la combustión incompleta son principalmente el resultado de:

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

- Mezcla inadecuada de aire de combustión y combustible en la cámara de combustión, dando lugar a zonas de combustión locales ricas en combustible
- Una falta general de oxígeno disponible
- Temperaturas de combustión demasiado bajas
- Tiempos de residencia que son demasiado cortos
- Concentraciones de radicales demasiado bajas, en casos especiales, por ejemplo, en la etapa final del proceso de combustión (la fase de combustión de carbón) en una combustión discontinua.

Cuando el oxígeno está disponible en cantidades suficientes, la temperatura es la variable más importante debido a su influencia exponencial en las velocidades de reacción. Una optimización de estas variables en general contribuirá a reducir los niveles de emisión de todas las emisiones de la combustión incompleta. Por lo tanto, al optimizar cualquier proceso de combustión ajustando la mezcla de combustible y oxidante, temperatura y tiempo de residencia, las emisiones de combustión incompleta pueden ser minimizado (Koppejan, 2008).

Para el análisis del sistema térmico es de gran importancia la medición de la llama adiabática, pues es una aproximación de la temperatura a la que alcanzan los gases de combustión cuando estos aún no han transferido calor al entorno, es decir, es la máxima temperatura a la que podemos tener los gases y ésta transferirá calor a su entorno por medio de radiación. Cabe resaltar que la temperatura de llama adiabática depende del exceso de aire, la eficiencia de la combustión y la naturaleza del combustible (Ibarra, 2018).

Poder calorífico Inferior

El valor calorífico inferior (PCI) se define como el calor liberado durante la combustión

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

por unidad de masa de combustible, bajo las restricciones de que el agua formada durante la combustión se encuentra en una fase gaseosa y que el agua y los gases de combustión tengan la misma temperatura que el combustible antes de la combustión.

El PCI de los combustibles de biomasa generalmente varía entre 18 y 22 MJ / kg (d.b.) y puede calcularse razonablemente bien usando la siguiente fórmula empírica (Koppejan, 2008)

$$PCI = 0,3491X_C + 1,1783X_H + 0,1005X_S - 0,0151X_N - 0,1034X_O - 0,0211X_{ceniza} \left[\frac{MJ}{kg \text{ biomasa}} \right] \quad (2)$$

Donde:

X_i es el contenido de carbono (C), hidrógeno (H), azufre (S), nitrógeno (N), oxígeno (O) y ceniza en% en peso (d.b.).

Considerando los valores de la tabla 1 (análisis último de la biomasa %), se obtiene el PCI del PKS reemplazando la fórmula 2:

$$PCI = 19,32 \frac{MJ}{kg \text{ PKS}}$$

Como puede verse en la fórmula, el contenido de C, H y S contribuye positivamente al PCI, mientras que el contenido de N, O y ceniza contribuyen negativamente al PCI (Koppejan, 2008).

La composición de cenizas de biomasa está dominada por dióxido de silicio (SiO₂) y óxido de calcio (CaO), y en menor medida por óxidos de magnesio (Mg), aluminio (Al), potasio (K) y fósforo (P). La ceniza proveniente de plantas de largos períodos reproductivos como son los árboles tienen, por la dinámica de flujo de nutrientes con la tierra, una composición mineral muy diferente a las plantas que se cosechan varias veces al año, como los cereales. Estas últimas

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

contienen mayores cantidades de óxidos con bajo punto de fusión, particularmente K y P. Además, contienen substancialmente menores contenidos de metales pesados (Melissari, 2012).

Poder calorífico Superior

El PCS del cuesco de palma (PKS) fue calculado con base en la composición elemental y su contenido de humedad de acuerdo a la regla de Mendelejev, en donde se calcula la aportación calorífica de los componentes elementales carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre, de acuerdo a su proporción en por ciento de la biomasa base seca, expresándose el resultado en MJ/kg.

$$PCS \left[\frac{MJ}{kg} \right] = Hi = 0,34C + 1,03H - 0,11(O - S) - 0,025W \quad (3)$$

$$PCS = 20,44 \frac{MJ}{kg \text{ PKS}}$$

Relación aire combustible

En un proceso de combustión, la mezcla adecuada de combustible y aire, es un aspecto importante para medir la eficiencia de combustión, debe mantenerse a un nivel tan bajo como sea posible con el fin de ahorrar combustible. Sin embargo, a no ser que se utilice exceso de aire en la cámara de combustión, puede tener lugar una combustión incompleta, que también malgastará combustible, pudiendo haber riesgo de explosión por ignición retardada en el hogar del combustible no quemado.

Para asegurar una combustión completa, “debe suministrarse exceso de aire en cantidades que varían entre el 20 % y el 30 %, dependiendo del combustible utilizado” (Kohan, 2000).

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

Para la realización del balance estequiométrico, se parte de la cuantificación de cada componente en moles, de acuerdo a la siguiente igualdad:

$$N_C = \frac{m_C(kg)}{PM_C \left(\frac{kg}{kmol} \right)} (kmol) \quad (4)$$

$$N_{H_2} = \frac{m_{H_2}(kg)}{PM_{H_2} \left(\frac{kg}{kmol} \right)} (kmol)$$

$$N_{O_2} = \frac{m_{O_2}(kg)}{PM_{O_2} \left(\frac{kg}{kmol} \right)} (kmol)$$

El consumo estequiométrico de aire fue estimado de acuerdo a la ecuación:

$$N_C C + N_{H_2} H_2 + N_{O_2} O_2 + a_{th}(O_2 + 3,76N_2) = xCO_2 + yH_2O + wN_2 \quad (5)$$

$$C: N_C = x$$

$$H_2: N_{H_2} = y$$

$$O_2: N_{O_2} + a_{th} = x + 0,5y$$

$$N_2: 3,76a_{th} = w$$

$$3,74C + 3,14H_2 + 1,12O_2 + 4,19(O_2 + 3,76N_2) = 3,74CO_2 + 3,14H_2O + 15,75N_2$$

Finalmente, se obtiene la relación estequiométrica de aire/combustible para la combustión del cuesco (PKS) mediante la siguiente expresión:

$$\left(\frac{A}{C} \right)_{teórico} = \left(\frac{a_{th}(kmol) * m_{aire}(kg) * PM_{aire} \left(\frac{kg}{kmol} \right)}{m_{biomasa}(kg)} \right) \frac{kg \text{ aire}}{kg \text{ biomasa}} \quad (6)$$

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

$$\left(\frac{A}{C}\right)_{\text{teórico}} = 5,78 \frac{\text{kg aire}}{\text{kg biomasa}}$$

Humedad en el aire de combustión

“El aire de combustión o carburante ingresa al quemador con una entalpía inicial que depende de dos variables: la temperatura ambiente y la humedad absoluta, y se la calcula de acuerdo a la siguiente igualdad” (Miranda, 2000).

La cantidad de humedad absoluta depende de las condiciones geográficas del lugar de investigación y se obtiene mediante la ecuación 7:

$$W = 0,622 \frac{\varphi P_{ws}}{p - \varphi P_{ws}} \quad (7)$$

Donde:

W, humedad absoluta (kg vapor/kg aire)

φ , humedad relativa ambiente (%)

P_{ws} , presión de saturación a la temperatura ambiente (kPa)

p, presión atmosférica local (kPa)

En la tabla 2, se presentan las condiciones climatológicas consideradas para este estudio:

Tabla 2.

Condiciones climatológicas de investigación

Ubicación	Quito
Humedad relativa	60%

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

Temp. Ambiente	20	°C
Presión atmosférica	73	kPa
Presión @T amb	2,339	kPa
Peso molecular aire	4,76	kmol/kg
Moles aire seco	19,94	kmol

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a la ecuación 7, se obtiene una humedad absoluta contenida en el aire de combustión de **W = 0,015 kg w/ kg aire**.

Presión parcial de la humedad en el aire se representa mediante la siguiente igualdad:

$$P_{v,aire} = \phi P_{ws} \quad (8)$$

Posteriormente, se obtiene la cantidad de moles de humedad contenida en el aire mediante la siguiente igualdad (Yunes & Cengel, 2011):

$$N_{v,aire} = \left(\frac{P_{v,aire}}{p} \right) (a_{th} + N_{v,aire}) \quad (9)$$

Finalmente, se obtiene el balance estequiométrico para el cuesco (PKS) añadiendo la cantidad de humedad en ambos lados de la ecuación:

$$N_C C + N_{H_2} H_2 + N_{O_2} O_2 + a_{th} (O_2 + 3,76 N_2) + N_{v,aire} H_2O = x CO_2 + (y + N_{v,aire}) H_2O + w N_2 \quad (10)$$

$$3,74C + 3,14H_2 + 1,12O_2 + 4,19(O_2 + 3,76N_2) + 0,38H_2O = 3,74CO_2 + 3,52H_2O + 15,75N_2$$

Posteriormente se obtiene la relación de A/C ideal o teórico para la combustión de cuesco mediante la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{A}{C} \right)_{teórico} = \left(\frac{A}{C} \right)_{st} * \%Exceso \quad (11)$$

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

De acuerdo a (Salgado, 2017), en el proceso de combustión del cuesco, se consideró “el 20% de exceso de aire para garantizar una concentración de oxígeno (gases secos) en el efluente gaseoso de 10%”.

Entalpías de formación y combustión

Se conoce que la combustión de carbono es una reacción exotérmica en donde la energía química se libera en forma de calor. Para ello es importante conocer las siguientes definiciones:

Entalpía de reacción h_R : Se la obtiene mediante la diferencia entre la entalpía de los productos en un estado específico y la entalpía de los reactivos en el mismo estado.

Entalpía de combustión h_C : Cantidad de calor liberado durante un proceso de combustión.

$$h_R = h_C = H_{\text{productos}} - H_{\text{reactivos}} \quad (12)$$

La entalpía de combustión de un combustible variará a diferentes temperaturas y presiones.

Entalpía de formación h_f : Se conoce a la entalpía de una sustancia en un estado específico debido a su composición química. Se considera un valor de 0 de entalpía de formación de todos los elementos estables a 25 °C y 1 atm.

Análisis de combustión en base a la primera ley

Se establece el balance de energía para sistemas reactivos en donde implican cambios en su energía química para sistemas de flujo estacionarios por ello es importante conocer la

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

entalpía de un componente mediante la siguiente igualdad:

$$Entalpía = \bar{h}_f^o + (\bar{h} - \bar{h}^o) \left(\frac{kJ}{kmol} \right) \quad (13)$$

En la igualdad anterior, el término entre paréntesis toma en consideración la entalpía sensible relativa al estado de referencia estándar, que es la diferencia entre \bar{h} (la entalpía sensible en el estado especificado) y \bar{h}^o (la entalpía sensible en el estado de referencia estándar de 25 °C y 1 atm) (Yunes & Cengel, 2011)

La relación de balance de energía para un sistema de flujo estacionario químicamente reactivo se representa como:

$$\dot{E}_{entrada} = \dot{E}_{salida}$$

$$\dot{Q}_{entrada} + \dot{W}_{entrada} + \sum N_r (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o) r = \dot{Q}_{salida} + \dot{W}_{salida} + \sum N_p (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o) p \quad (14)$$

$$\dot{Q}_{salida} = \sum N_r (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o) r - \sum N_p (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o) p \quad (15)$$

Eficiencia de la combustión

La eficiencia de la combustión es una medida de cuán efectivamente se está llevando a cabo la combustión en un equipo, es equivalente al porcentaje de calor transferido en el equipo respecto del poder calorífico del combustible quemado. Se calcula restando a un 100% el porcentaje de pérdidas por gases de combustión a la salida del equipo, por lo tanto, la eficiencia de la combustión es mayor en la medida que se tenga una combustión completa y una menor temperatura en los gases de combustión en la chimenea y distintos combustibles tienen distinta eficiencia de combustión.

De acuerdo a Amell (s.f.) las consideraciones teóricas sobre la eficiencia de combustión

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

están definidas por la ecuación 15:

$$\eta_{combustión} = \frac{Q_{total} - Q_{perdido}}{Q_{total}} \quad (16)$$

Donde:

$\eta_{combustión}$, eficiencia total del proceso de combustión

Q_{total} , poder calorífico superior del combustible

$Q_{perdido}$, calor total que se pierde en el proceso

El calor perdido en un proceso de combustión corresponde básicamente a lo siguiente:

Vaporización del agua presente o humedad de los productos

Calentamiento de los humos

Combustión incompleta

Calentamiento del aire en exceso

La cantidad de energía que se genera durante el proceso de combustión está dada por la ecuación 12 (Takeno, 1979).

$$\int_{T_o}^{T_f} C_p dT = Q_{combustible} + Q_{aire} = H_f - H_o \quad (17)$$

Donde

T_f , temperatura final de los reactivos

T_o , temperatura inicial

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

$Q_{combustible}$, calor liberado por la conversión de energía química

Q_{aire} , calor contenido en el aire de combustión

H_f y H_o , entalpías en cada estado.

La eficiencia de un quemador está asociada a la energía química que es posible ser transformada en calentamiento de los productos de combustión, y es el 100% si toda la energía química almacenada en el combustible es convertida en calor disponible para el proceso.

Mediante la temperatura de los reactantes y su entalpía $H_{reactantes}$ y la temperatura de los productos de combustión inmediatamente a la salida del quemador y su energía contenida $H_{productos}$, se puede definir la eficiencia como (Serrano, 2005):

$$\eta_{comb.} = \frac{PCS - (H_{productos} - H_{reactantes})}{PCS} * 100\% \quad (18)$$

Donde

$\eta_{combustión}$, eficiencia de combustión (%)

PCS , poder calorífico superior del combustible (kJ/kg)

$H_{productos}$, entalpía de los productos (kJ/kg)

$H_{reactantes}$, entalpía reactante combustible y aire (kJ/kg)

Materiales y Métodos.

El estudio realiza una investigación explicativa del análisis a realizarse sobre la

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

eficiencia de combustión del cuesco en un quemador de tiro forzado, para ello se realiza un estudio explicativo de información e investigaciones concernientes a la combustión de biomasa y métodos de cálculos y de esa manera describir el comportamiento de la combustión del cuesco mediante la medición de la temperatura adiabática de llama.

El presente trabajo de investigación se realiza en la ciudad de Quito en la Universidad Internacional SEK a una (latitud: -0.20, longitud: -78.47), en donde se tiene una temperatura promedio de 20 °C en el área de realización de pruebas experimentales, una humedad relativa del 60% y una presión atmosférica de 73 kPa o 10,6 psia.

La metodología de medición y cálculo de la eficiencia de combustión del cuesco de palma Africana se presenta en las figuras 3 y 4 los diagramas de proceso de medición y generación de resultados:

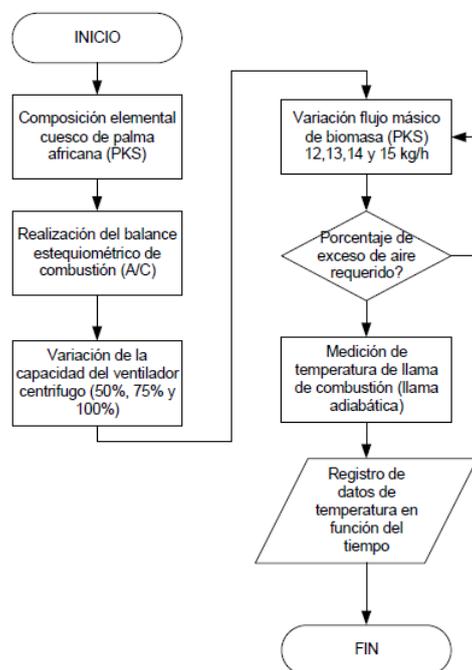


Figura 3: Diagrama de proceso de medición
Fuente: Elaboración Propia

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

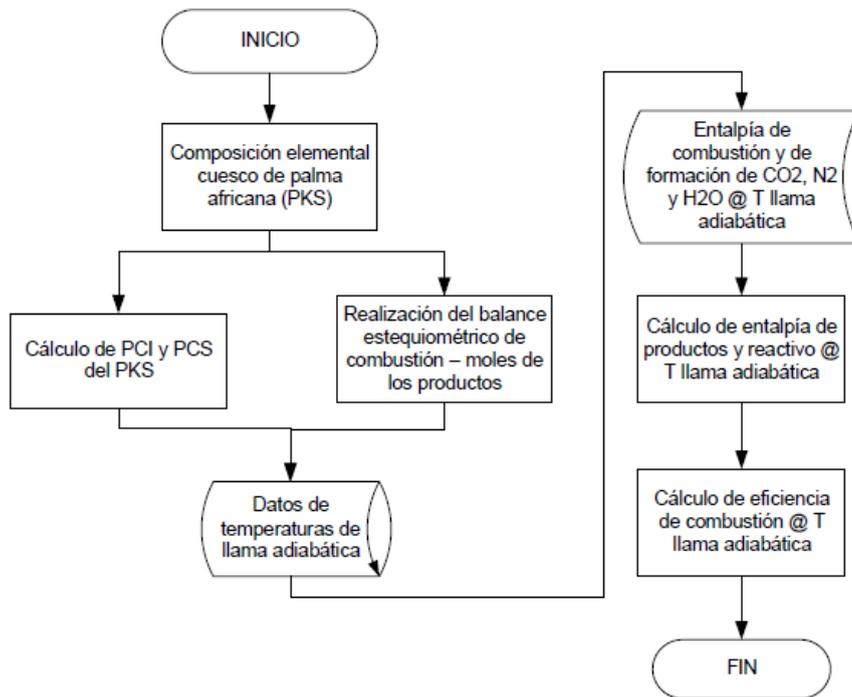


Figura 4: Diagrama de proceso de generación de resultados
Fuente: Elaboración Propia

El procedimiento de investigación parte desde la determinación de flujo másico de biomasa y aire de combustión para obtener excesos de aire desde el 15 %, hasta el 75 %. Y posteriormente tomar datos de temperatura de llama cada 5 min durante 1 hora y calcular la eficiencia de combustión del cuesco de palma africana.

El estudio de investigación considera un tiempo de estabilización del proceso de combustión a una carga del 100% del ventilador del quemador y mediante la variación del flujo másico obtener los distintos valores de exceso de aire, seguido se toma valores de temperatura de llama de combustión y se calcula la eficiencia en cada caso.

El estudio experimental se realiza en dos fases, primero se obtiene la caracterización del cuesco, contenido de humedad y composición elemental y finalmente se combustiona la biomasa en el quemador de tiro forzado.

El estudio de la medición de la eficiencia de la combustión se realizará mediante la

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

medida de la temperatura adiabática de llama y la temperatura ambiente, para obtener la eficiencia de combustión mediante la ecuación 13:

$$\eta_{comb.} = \frac{PCS - (H_{productos} - H_{reactantes})}{PCS} * 100\% \quad (19)$$

$$H_{productos} = \sum N_p (\bar{h}_f^\circ + \bar{h}_{T\text{ combustión}} - \bar{h}^\circ) p$$

$$H_{reactivos} = \sum N_r (\bar{h}_f^\circ + \bar{h}_{T\text{ combustión}} - \bar{h}^\circ) r$$

Se obtiene la entalpia de combustión a la temperatura de llama en cada variable de exceso de aire.

Posteriormente, se obtiene la potencia térmica efectiva en el quemador de tiro forzado considerando el flujo másico de PKS, flujo másico de aire de combustión y la eficiencia de combustión obtenida considerando esos parámetros de acuerdo a la siguiente igualdad:

$$Potencia_{efectiva} = m_{biomasa} * PCI * \eta_{comb.} (kW) \quad (20)$$

Descripción del sistema

Los ensayos de laboratorio serán realizados en un quemador de biomasa de tiro forzado que se presenta en la figura 3, diseñado y construido para la combustión de pellets. Las características de fábrica del quemador son:

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO



Figura 5: Quemador de tiro forzado de 70 kW
Fuente: Elaboración Propia

Dimensiones: Cuerpo (Alto x Ancho x Largo): 43,5cm x 29cm x 76,7cm, Boca (Diámetro (Ø): 170mm, Longitud de boca: 280mm, Potencia: Entre 40Kw y 90Kw, Resistencia de encendido: 170w, Potencia de ventilación: 83w, Potencia sinfín de arrastre: 25w, Potencia sinfín de alimentación: 25w, Voltaje: 230v, Consumos: 8 - 18 Kg/hora de pellets, Consumo eléctrico: 0,01 - 1,55 Amp. (Natural Fire, 2018)

El aire o carburante ingresa mediante un ventilador centrífugo acoplado un variador de frecuencia para la variación de aire que ingresará al quemador de biomasa, el combustible sólido (cuesco) será inyectado mediante un alimentador o tornillo sinfín con la característica de variación del tiempo de alimentación de biomasa al quemador, esta característica facilita la regulación de biomasa al quemador.

La configuración inicial de combustión en el quemador estará conformada por una relación de aire/combustible de 1:2, debido a que, al fin de lograr una combustión completa, se considera un λ 1.5-2.0 para pequeñas instalaciones, dependiendo por supuesto de la tecnología del sistema de combustión. (Gómez, 2013)

Las condiciones de frontera utilizadas para los cálculos fueron de entrada los flujos másicos de aire (carburante) y biomasa (cuesco) en kg/s, con sus respectivos valores de

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

temperatura (K), presión (atm) y humedad (%).

Diseño de Experimentos

La presente investigación aplicará el diseño estadístico de experimentos en donde permita evaluar tanto las variables más significativas en el sistema, así como su correlación con los demás parámetros. Es así que, el presente estudio toma referencia a la metodología de superficie de respuesta de tal manera que se pueda observar los efectos de asociación de todos los parámetros mediante un número menor de experimentos (Montgomery, 2017).

Método

La presente investigación consideró como variables independientes el flujo másico de biomasa en kg/h (PKS) y el porcentaje de exceso de aire y como variable dependiente la eficiencia de combustión de acuerdo a la tabla 3 considerando 4 niveles de cada variable:

Tabla 3.

Designación de variables experimentales

Variabes independientes	Niveles	Variable dependiente
Flujo másico de biomasa kg/h (PKS)	12, 13, 14 y 15	Eficiencia de combustión (%)
Exceso de aire (%)	17, 25, 33 y 43	

Fuente: Elaboración Propia

Los datos obtenidos fueron analizados utilizando el software estadístico comercial Statgraphics Centurion XVII. El análisis de varianza, los gráficos de efectos e interacciones, los coeficientes de determinación (R²) y el gráfico de superficie de respuesta fueron generados con el mismo software.

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

Materiales

Tabla 4.

Equipos y materiales

Componentes	Descripción
Bomba calorimétrica	Equipo empleado para la cuantificación del poder calorífico superior de la biomasa; cuesco natural y ceniza o combustible no combustionado.
Mufla	Equipo empleado para la cuantificación del porcentaje de contenido de ceniza contenido en la biomasa.
Estufa	Equipo empleado para la cuantificación de la humedad relativa contenida en la biomasa.
Analizador elemental	Equipo destinado para la cuantificación de la composición elemental de la biomasa a ser analizada (cuesco).
Balanza	Equipo para la cuantificación del peso y flujo másico a ser alimentado el quemador de biomasa.
Pirómetro	Medidor infrarrojo de temperatura de llama de combustión.
Quemador tiro forzado	Equipo de combustión de biomasa (cuesco)
Ventilador centrifugo	Equipo de inyección de aire de combustión al quemador de biomasa
Motoreductor de dosificación sinfin	Motoreductor acoplado a un tornillo sinfin
transportador sinfin	Transporte de cuesco desde la tolva de acumulación hasta el quemador

Fuente: Elaboración Propia

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

Resultados

Se presenta mediante el diagrama de Pareto la importancia de las variables independientes influyentes en la variación de la eficiencia de combustión de la biomasa (PKS):

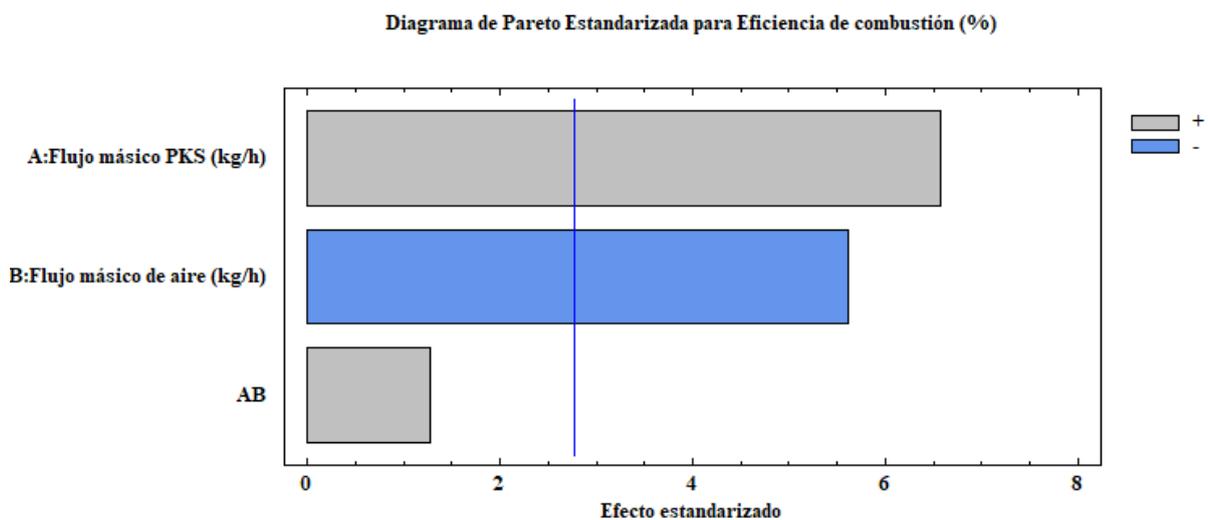


Figura 6: Diagrama de Pareto Estandarizada para Eficiencia

Fuente: Elaboración Propia

La gráfica anterior, considera el flujo másico de PKS y flujo de aire de combustión como variables significativas para la determinación de la eficiencia de combustión.

En el tabla 5 se presenta el análisis de varianza donde se identifica las variables que resultaron significativas que son el flujo másico y la combinación de aire/combustible.

Tabla 5.

Análisis de varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Flujo másico PKS (kg/h)	912,025	1	912,025	43,17	0,0028
B:Flujo másico de aire (kg/h)	666,125	1	666,125	31,53	0,0049
AB	34,225	1	34,225	1,62	0,2720
Error total	84,5	4	21,125		
Total (corr.)	1696,88	7			

Fuente: Elaboración Propia

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

De acuerdo a la tabla ANOVA, 2 efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son las variables que poseen diferencias significativas con un nivel de confianza del 95,0%.

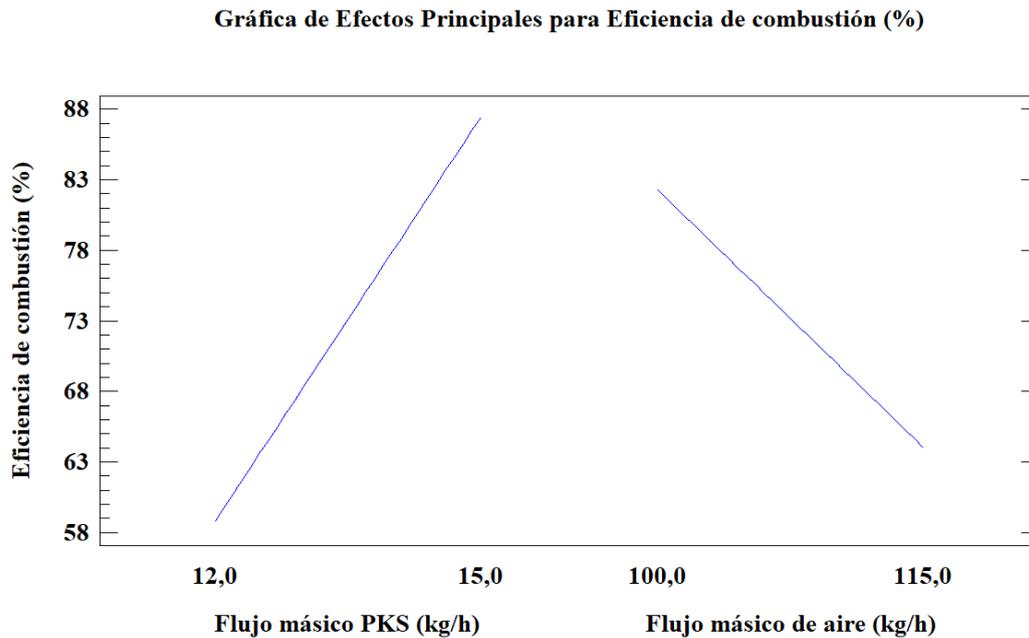


Figura 7: Eficiencia de Combustión
Fuente: Elaboración Propia

La figura 7 presenta la relación de la eficiencia de combustión en función del flujo másico de PKS y flujo másico de aire de combustión en se tiene que a mayor flujo másico de PKS y la menor cantidad de exceso de aire aumenta la eficiencia de combustión.

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

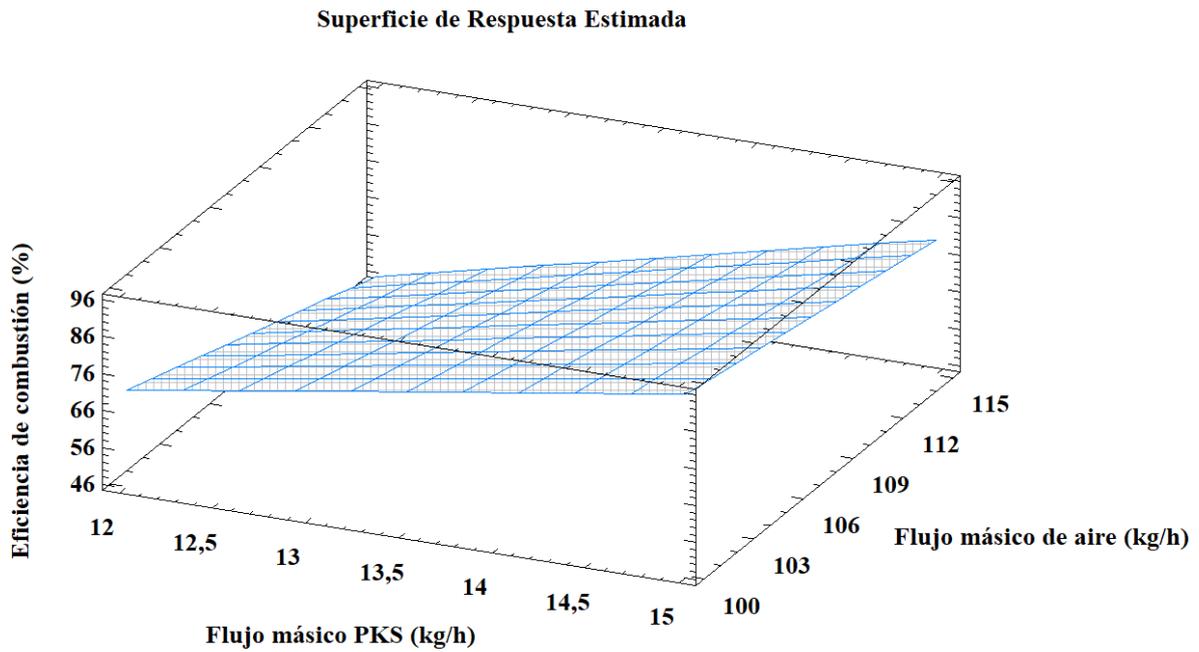


Figura 8: Superficie de respuesta estimada
Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a la figura 8, muestra la superficie de respuesta estimada en donde da a notar que la mayor eficiencia de combustión se tiene con el mayor flujo másico de PKS y el máximo flujo másico de aire entregado por el ventilador centrífugo. De la misma manera, se puede notar que la eficiencia de combustión se reduce a medida que se reduce el flujo másico de PKS y mayor cantidad de flujo de aire de combustión.

De esta manera, se presenta en la figura 9, la variación de la eficiencia de combustión vs la temperatura de combustión y el porcentaje de exceso de aire:

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

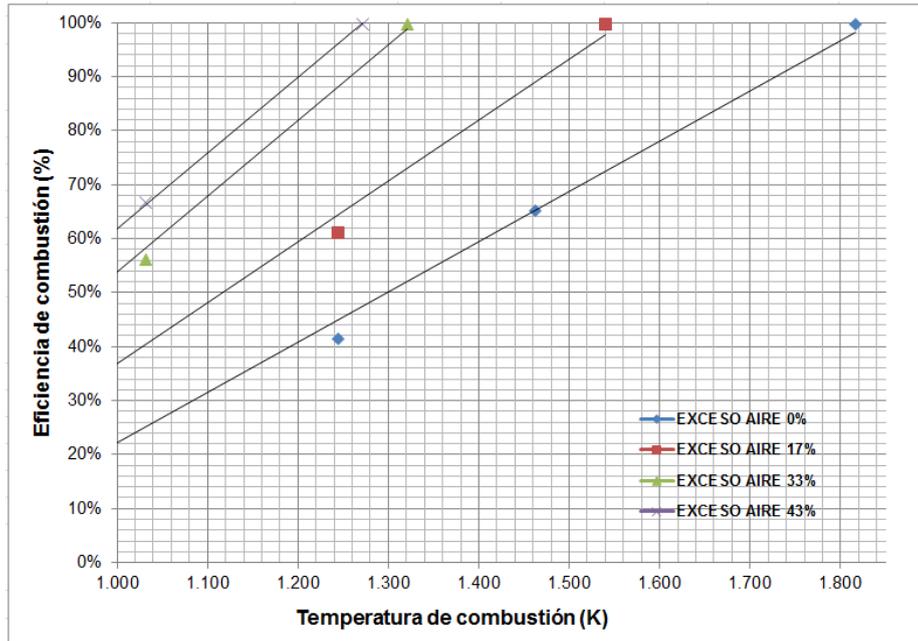


Figura 9: Eficiencia de Combustión vs Temperatura de Combustión
Fuente: Elaboración Propia

En la figura 9, se puede notar que la eficiencia de combustión tiende a bajar a medida que se reduce la temperatura de combustión, además se tiene menor temperatura de combustión a medida que se aumenta el porcentaje de exceso de aire de combustión.

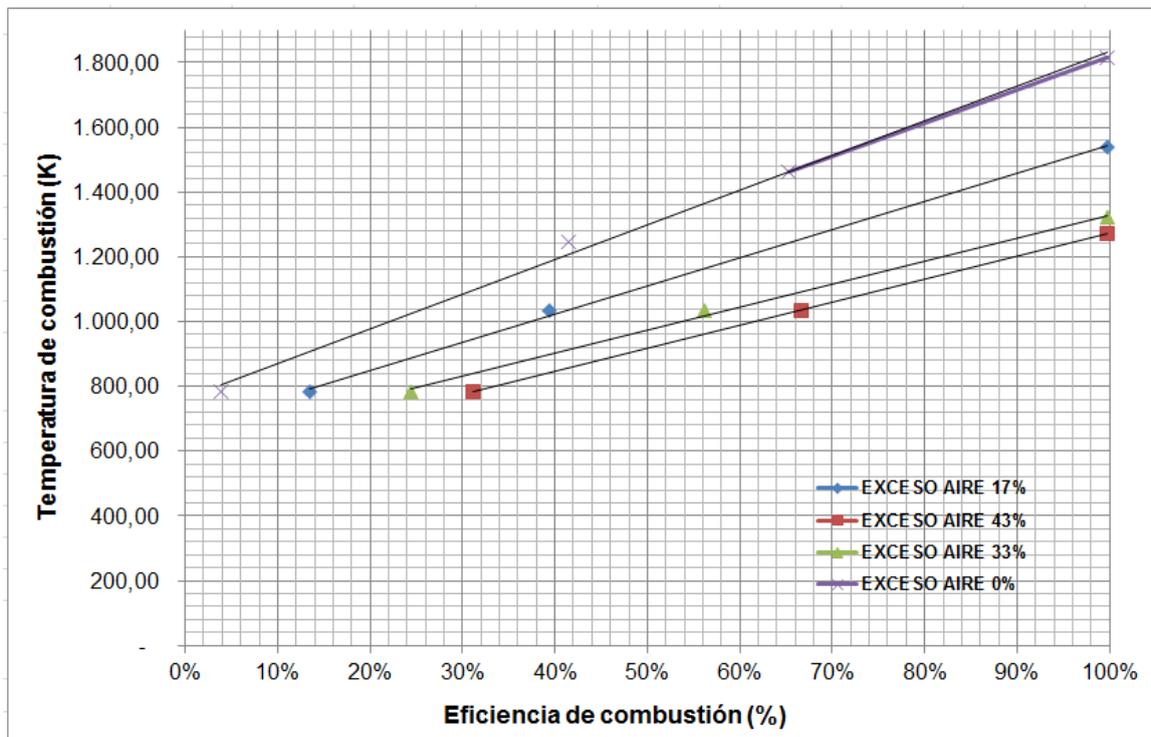


Figura 10: Temperatura de combustión vs eficiencia de combustión
Fuente: Elaboración Propia

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

En la figura 10, se puede notar la variación de la temperatura de combustión a medida que se varía el porcentaje de exceso de aire.

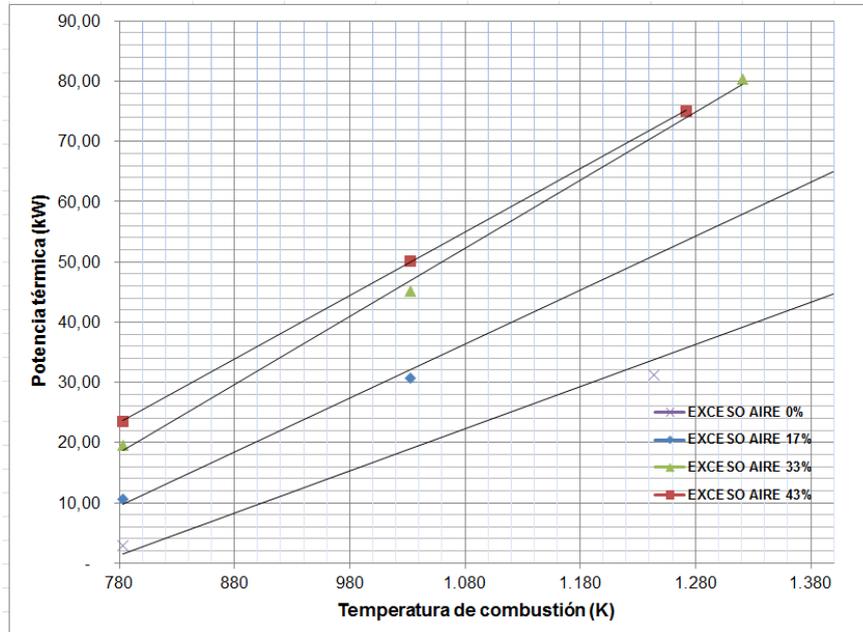


Figura 11: Potencia térmica vs Temperatura de combustión
Fuente: Elaboración Propia

En la figura 11, se puede identificar la variación de la potencia térmica entregada por el quemador de acuerdo a la variación de la temperatura de combustión y porcentaje de exceso de aire. Se tiene mayor potencia con un 33% de exceso de aire de combustión.

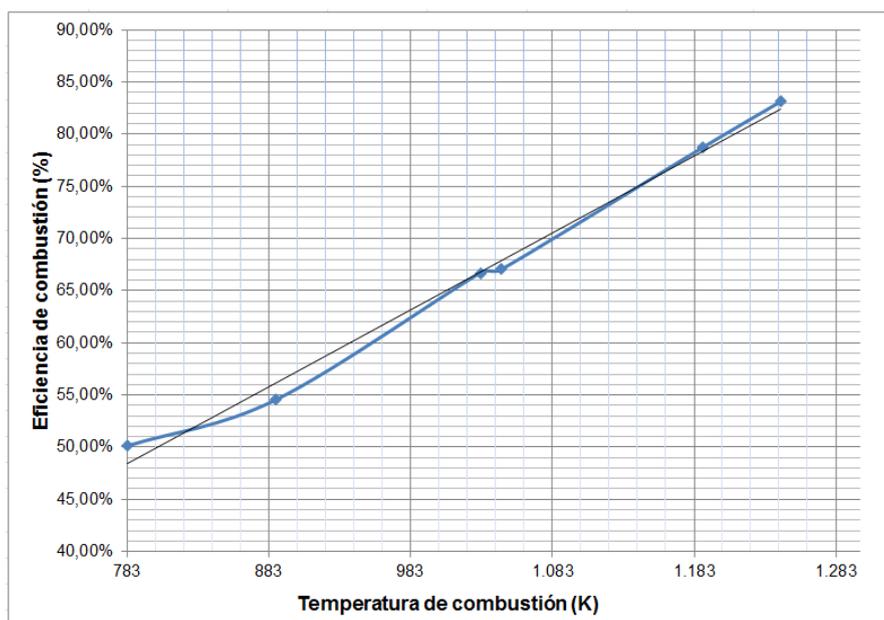


Figura 12: Eficiencia de Combustión vs Temperatura de combustión medida

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 12, se muestra la relación de la eficiencia de combustión vs la temperatura de combustión medida. Se tiene una temperatura máxima medida de 1250 K para lo cual se obtuvo una eficiencia máxima del 84%.

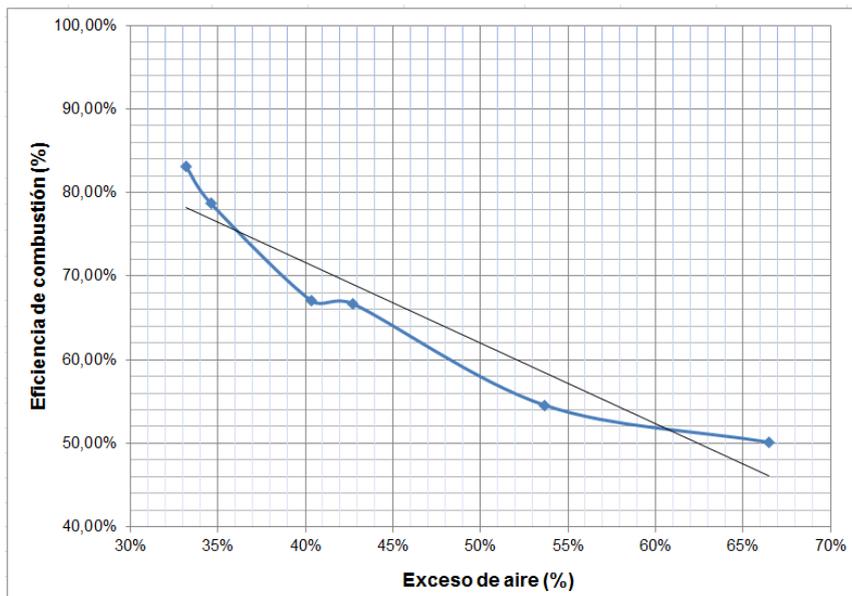


Figura 13: Eficiencia de combustión vs exceso de aire

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 13, se relaciona el porcentaje de eficiencia de combustión vs el porcentaje de exceso de aire, en donde se puede notar que a medida que aumentamos el exceso de aire disminuye la temperatura de combustión y por ende disminuye la eficiencia de combustión.

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

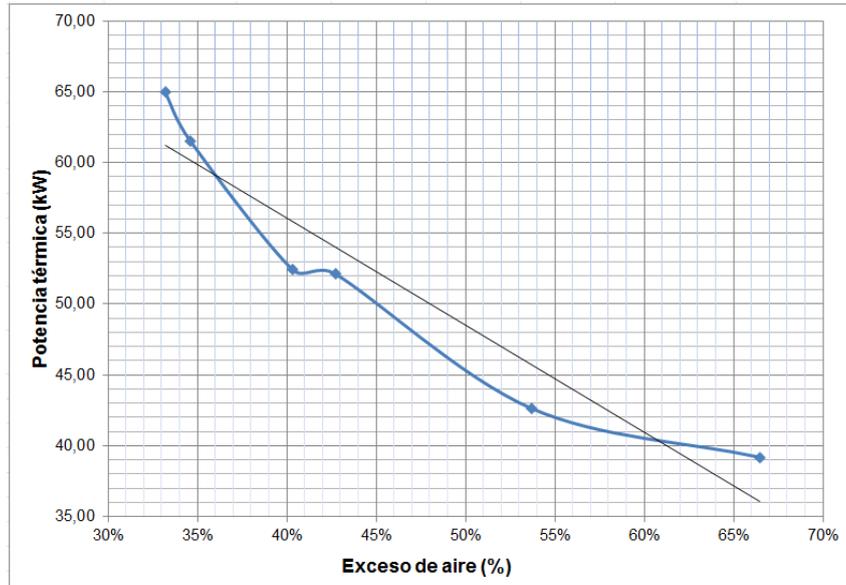


Figura 14: Potencia térmica efectiva vs Exceso de aire

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 14, se visualiza que la potencia térmica obtenida en el quemador de tiro forzado aumenta a menor porcentaje de exceso de aire debido a que se tiene mayor porcentaje de eficiencia de combustión.

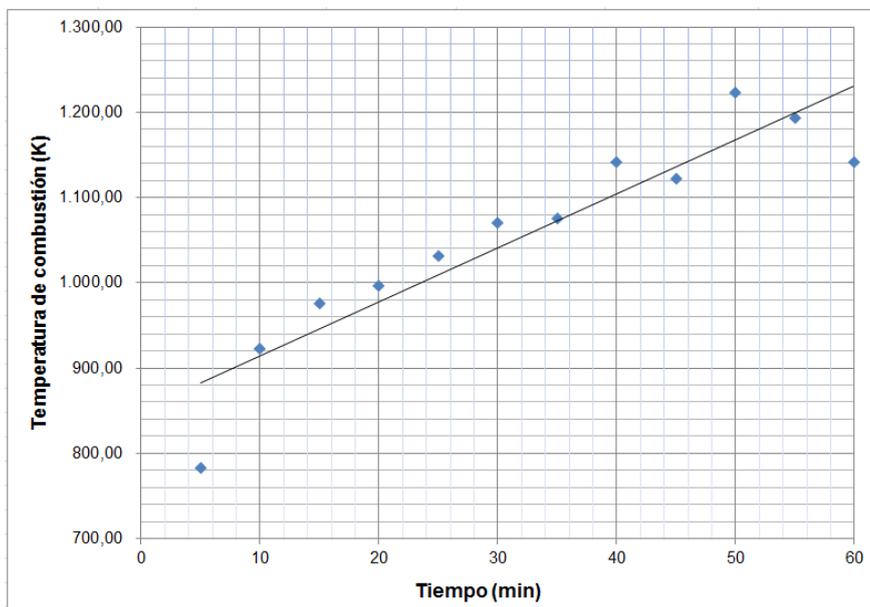


Figura 15: Temperatura de combustión vs tiempo

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 15, se presenta la variación de la temperatura de combustión en función del tiempo. En 60 min se tiene una variación desde 780 K hasta llegar a los 1250 K máximo para un 33% de exceso de aire.

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

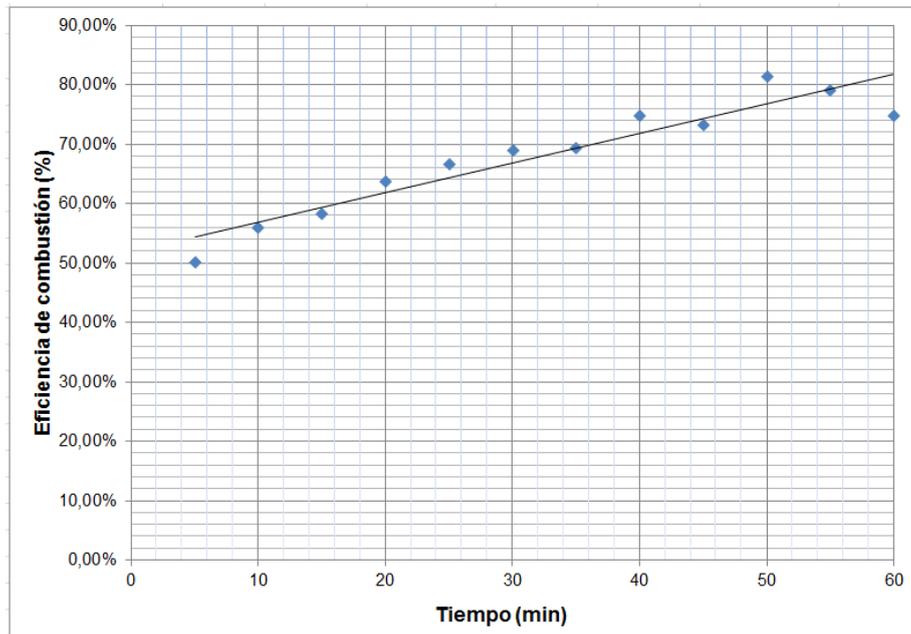


Figura 16: Eficiencia de combustión vs tiempo

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 16, se presenta la variación de la eficiencia de combustión para un 33% de exceso de aire en función del tiempo.

En la tabla 6, se presentan los resultados obtenidos en la fase de experimentación de combustión del cuesco de palma africana (PKS) en un quemador de tiro forzado de 70 kW térmico y con flujos máxicos máxicos permisibles por el quemador de 15 kg/h de PKS y 115,53 kg/h de aire:

Tabla 6.

Análisis de resultados obtenidos

Flujo máxico de PKS (kg/h)	Exceso de aire (%)	Potencia térmica máxica (kW)	Eficiencia de combustión	Relación de aire-combustible (kg aire/kg PKS)
15,00	33,18%	66,93	84%	7,70
14,00	42,70%	50,12	67%	8,25
13,00	53,67%	38,07	55%	8,89

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

12,00	66,48%	32,29	50%	9,63
-------	--------	-------	-----	------

Fuente: Elaboración Propia

Discusión

De acuerdo a la investigación de aprovechamiento de unos de los residuos producidos en las extractoras de palma africana conocida como cuesco o PKS el cual se ha identificado y calculado un alto poder calorífico inferior y superior de 19,32 MJ/kg y 20,04 MJ/kg respectivamente que se encuentran dentro de los rangos de acuerdo a Barrera (2018) con poder calorífico superior del cuesco equivalente en $20,09 \pm 0,43$ MJ/kg lo que representa una excelente oportunidad de aprovechamiento en procesos de combustión para la generación de energía térmica en industrias en la generación de vapor, agua o aire caliente.

El aprovechamiento de PKS como biocombustible sólido genera una oportunidad a las industrias de sustituir sus quemadores de combustibles fósiles y reemplazarlos por quemadores de biomasa de tiro forzado obteniendo una eficiencia de combustión de hasta el 84 % y beneficios económicos y sociales al tratarse de un residuo agroindustrial considerada como biomasa sólida. Cabe mencionar que las características de forma y tamaño del cuesco de palma africana logran considerarse como pellet natural lo que evita un pretratamiento al residuo y facilita su aprovechamiento directamente en procesos de combustión.

Salgado (2017) en su investigación de combustión de cuesco de palma africana analizó la variación de temperaturas de los productos mediante un porcentaje del 200% de exceso de aire obteniendo un rango de temperaturas desde 823 K hasta 1223 K, que se encuentran dentro del rango de las temperaturas medidas de los productos en el quemador de tiro forzado con rangos de temperaturas que varían desde 897 K hasta los 1223 K con porcentajes de exceso de

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

aire entre 17 % y 66 %, lo que representa mayor eficiencia en quemadores de tiro forzado debido a que se tiene menor cantidad de aire de combustión.

En este estudio experimental uno de los factores más importantes es el porcentaje de exceso de aire de combustión a temperatura ambiente con el objetivo de obtener el mayor porcentaje de eficiencia de combustión y mayor potencia térmica. Esto es debido a que mientras más porcentaje de exceso de aire se disminuye la temperatura y eficiencia de combustión y proporcionalmente disminuye la potencia térmica a entregar por el quemador.

En quemadores de diésel se tiene una eficiencia de combustión óptima del 89 %, lo que representa una similitud en porcentaje obtenido en el quemador de biomasa de tiro forzado con un 84% mediante la combustión de cuesco de palma africana.

Dentro de los resultados obtenidos, se identificó que en el quemador de tiro forzado de 70 kW de potencia nominal, se obtiene mayor eficiencia de combustión con un 84% al tener un porcentaje del 33,18% de exceso de aire para la combustión de PKS en la ciudad de Quito a una temperatura ambiente de 20°C y 60% de humedad relativa y 13% de humedad del combustible sólido. Esto mediante la alimentación de 15 kg/h de PKS y 115,53 kg/h de aire obteniendo una potencia total efectiva de 64,98 kW. Además, se identificó que a mayor porcentaje de exceso de aire disminuye la eficiencia de combustión, esto genera que la potencia térmica efectiva se reduzca debido a la disminución de la temperatura de los productos, por ello se obtuvo el punto máximo de trabajo se encuentra cuando se trabaja al máximo flujo másico de PKS y menor porcentaje de exceso de aire permitido por el quemador.

Conclusiones

- El presente estudio consideró una combustión completa transformando el carbono, nitrógeno e hidrogeno contenido en el PKS en CO₂, H₂O y N₂. Para lo cual la eficiencia de

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

combustión tomó en consideración las entalpías de combustión de dichos productos a la temperatura de combustión medida.

- Las variables independientes seleccionadas en este estudio como son: el flujo másico de cuesco (PKS) y el flujo másico de aire de combustión tienen alta influencia en la eficiencia de combustión como se presenta en la tabla 4 en donde indica la relación directa de 2 efectos tales como el flujo másico de biomasa y la relación de A/C que tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son las variables que poseen diferencias significativas con un nivel de confianza del 95,0%.

- El estudio desarrollado permitió obtener que en el quemador de tiro forzado de 70 kW de potencia nominal para la combustión de PKS, se obtiene mayor una potencia térmica máxima de 64,98 kW térmicos con un flujo másico de PKS de 15 kg/h con un flujo másico de aire de combustión de 115,53 kg/h, con una eficiencia de combustión del 84%, con un porcentaje de exceso de aire del 33,18%.

- En las pruebas realizadas, se visualizó que el quemador de tiro forzado la combustión se estabiliza en el transcurso de una hora de carga constante de biomasa e inyección de aire de combustión.

- En calderos de generación de vapor mediante el consumo de diesel se tiene una eficiencia de combustión con un quemador de diesel óptima del 85 %, lo que representa una similitud en porcentaje obtenido con el quemador de biomasa de tiro forzado con un 84% mediante la combustión de cuesco de palma africana.

- El quemador al operar con los flujos máximos permisibles de 14,94 kg/h de biomasa (PKS) y 115,53 kg/h de aire, se tiene un exceso máximo de aire del 33,18% lo que representa su máxima eficiencia de combustión del 84%.

- De acuerdo a la eficiencia de combustión citada por el fabricante del 90% con pellets, se puede notar la disminución en eficiencia al momento de utilizar como biomasa el cuesco de

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

palma africana que se obtiene una eficiencia de combustión del 84%.

Bibliografía

A. Gómez, W. K. (2004). Transformación termoquímica de la biomasa residual del proceso de extracción del aceite de palma: tecnologías y perspectivas. *PALMAS*, 10.

Agencia Chilena de Eficiencia Energética. (2013). *Guía para la calificación de consultores en eficiencia energética*. . Santiago de Chile: Agencia Chilena de Eficiencia Energética.

Amell, A. A. (s.f.). Herramientas para el uso eficiente del gas: diagramas de eficiencia térmica. *Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia*, 56 - 59.

Barrera, J. R.-C. (2018). Combustión de biomasa: conceptos, tecnologías y aplicaciones en la agroindustria de la palma de aceite . *Palmas*, 24 - 44.

Buzón Ojeda, J. (2010). Fabricación de adoquines para uso en vías peatonales, usando cuesco de palma africana. *Revista Inge-CUC*, 6, 67-77.

Calderón, M., Andrade, F., Lizarzaburu, L., & Masache, M. (2017). Valoración económica de los cobeneficios del aprovechamiento energético de los residuos agrícolas en el Ecuador. *Estudios del cambio climático en América Latina*, 44.

Cerdá, E. (2009). Energía obtenida a partir de biomasa*. *Cuadernos económicos de ICE* n.º

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

83, 24.

Demirbas, A. (2004). Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 219-230.

Earthscan, J. (2005). *Planning and installing bioenergy systems. The German Solar Energy Society*. London: DGS.

Fernández, J. (2013). Biomasa. *Energías renovables para todos*, 20.

Forero Núñez, C., A., C. U., J.L, R. G., A., S. M., F.E., S. V., & F.E., S. V. (2010). Estudio preliminar del potencial energético de cuesco de palma y cascara de coco en Colombia. *Revista Ingeniería Solidaria*, 8(14), 19-25.

Gomelsky, R. (2013). Evaluación Rápida y Análisis de Brechas Ecuador. *Sustainable Energy for all*, 139.

Gómez, C. D. (2013). *La eficiencia energética en el uso de la biomasa para la generación de energía eléctrica: optimización energética y energética*. Madrid: Universidad Complutense De Madrid.

Ibarra, J. (2018). Modelado y dimensionamiento de una hornilla de biomasa. *HAL archives-ouvertes*, 20.

Jenkins, B. (1988). *Combustion properties of biomass*. Fuel Processing Technology.

Kohan, A. L. (2000). *Manual de calderas*. Madrid: McGRAW-HILL.

Koppejan, S. V. (2008). *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. USA.

López, H. C. (2008). Combustión con exceso de entalpía. *Revista Tecnológicas*, 21-22.

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

- MAGAP. (2013). *Boletín Situacional - La Palma Africana. Ecuador*. Coordinación General del Sistema de Información.
- Martínez, M. M. (2005). *Combustión y quemadores*. . España: Marcombo.
- Melissari, B. (2012). Comportamiento de Cenizas y su Impacto en Sistemas de Combustion de Biomasa. *Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica*, 14.
- MICSE. (2016). *Balance energético nacional 2015*. Quito.
- Ministerio de Comercio Exterior. (mayo de 2017). *Informe sobre el sector palmicultor Ecuatoriano*. Obtenido de <https://www.produccion.gob.ec/wp-content/uploads/2019/06/informe-palma-esp%C3%B1ol-.pdf>
- Ministerio de energía y recursos naturales no renovables. (2018). Balance Energético Nacional / 2017. 176.
- Miranda, A. L. (2000). *Nueva Enciclopedia de la Climatización*. Barcelona: CEAC.
- Mitschke, T. (2016). *Desarrollo de análisis de mercado nacional e internacional de los productos de pellet*. Quito - Ecuador.
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments*. Singapore: Lightning Source, Inc.
- Natural Fire. (15 de 08 de 2018). *Natural Fire*. Obtenido de <https://naturalfire.es/>
- Peter Quaak, H. K. (1999). *Energy from Biomass; A Review of Combustion and Gasification Technologies*. Washington D.C.: World Bank Technical Paper.
- Pichet Ninduangdee, V. I. (2013). Study oil kernel shell in a conical fluidized-bed combustor

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA EN UN QUEMADOR DE TIRO FORZADO

using alumina as the material. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 10-15.

Salaet, S., & Roca, J. (2015). Agotamiento de los combustibles fósiles y emisiones de CO₂: Algunos posibles escenarios futuros de emisiones. *Revista Galega de Economía*, 19(1), 1-19.

Salgado, M. A. (2017). Cuesco de palma africana, un nuevo combustible para uso comercial en Ecuador: análisis económico y evidencia experimental. *ResearchGate*, 15-20.

Salomón, M. (2014). On the optimal use of industrial generated biomass residues for polygeneration. *Biomass Conversion and Biorefinery*.

Serrano, J. C. (2005). Análisis teórico de la combustión en quemadores de gas natural. *Scientia et Technica Año XI(29)*, 5.

Takeno, T. (1979). An excess enthalpy flame theory. *Combustion Science and Technology*, 73-84.

Tanaka, R., & Shinoda, M. (2001). Combustion characteristics of a heat-recirculating ceramic burner using a low-calorific-fuel. *Energy Conversion and Management*, 42-45.

Toscano Morales, L. A. (2009). *Análisis de los parámetros y Selección de hornos para la combustión de biomasa*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Yunes, A., & Cengel, M. A. (2011). *Termodinámica Séptima edición*. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.