

enerLAC

Revista de
Energía de
Latinoamérica
y el Caribe

Biomasa
residual de
piñón como
combustible
sólido

Aprovechamiento
GNL en empresas
mineras en
Perú

*NAMA &
Residential
efficient lighting
in Grenada*

Refinación
y eficiencia
energética

Indicadores
para medir
pobreza
energética

Residuos
leñosos para
calefacción

Resultados de
estudios prospectivos
internacionales de
ALC



COMITÉ EDITORIAL

Alfonso Blanco
SECRETARIO EJECUTIVO DE OLADE

Pablo Garcés
ASESOR TÉCNICO DE OLADE

Marcelo Vega
COORDINADOR DE LA COMISIÓN ACADÉMICA DE LA
ASOCIACIÓN DE UNIVERSIDADES GRUPO MONTEVIDEO
(AUGM)

Martha Ligia Vides Lozano
ESPECIALISTA PRINCIPAL DE HIDROCARBUROS DE OLADE

Blanca Guanocunga
BIBLIOTECARIA OLADE

COORDINADORES DE LA EDICIÓN

DIRECTOR GENERAL
Alfonso Blanco

DIRECTORES EJECUTIVOS
Pablo Garcés
Marcelo Vega

COORDINADORA DE PRODUCCIÓN
Martha Ligia Vides Lozano

REVISORES

Cristhian Carrasco Villanueva. *Universidad Mayor de
San Andrés (UMSA). Bolivia*

Marcelo Castelli Léméz. *MCT ESCO. Uruguay*

Martha Ligia Vides Lozano. *Especialista Principal de
Hidrocarburos de OLADE*

Mauricio Medinaceli Monrroy. *Consultor Externo. Bolivia*

Byron Chilingua.
Gerente de Proyecto de Cooperación Canadiense

Jaime Guillén. *Consultor de OLADE*

Alexandra Arias. *Energy Advocacy Officer, Oficina regional
América Latina HIVOS, Costa Rica*

Carina Guzowski.
Universidad Nacional del Sur (UNS). Argentina

María Rosa Gamarra Céspedes. *Instituto Universitario de
Ciencia y Tecnología (IUCT). España*

Laura Moyano. *Universidad Nacional de Córdoba. Argentina*

COLABORADORES

Raquel Atiaja. *Técnica de Área Informática OLADE*
Ana María Arroyo. *Diseño y diagramación*

© Copyright Organización Latinoamericana de Energía
(OLADE) 2018. Todos los derechos reservados.

2602-8042 (Impresa)
2631-2522 (Electrónica)

Dirección: Av. Mariscal Antonio José de Sucre N58-63 y
Fernández Salvador.
Quito - Ecuador

Página web Revista ENERLAC: <http://enerlac.olade.org>
Página web OLADE: www.olade.org
Mail ENERLAC: enerlac@olade.org

Teléfonos: (+593 2) 2598-122 / 2598-280 / 2597-995 /
2599-489

Fotografía de portada: Central Hidroeléctrica Coca Codo
Sinclair. Ecuador. Foto cedida por el Ministerio de Energía y
Recursos Naturales no Renovables del Gobierno del Ecuador.

Esta revista es financiada por la Cooperación Canadiense.



Global Affairs
Canada

Affaires mondiales
Canada

NOTA DE RESPONSABILIDAD DE CONTENIDO

Las ideas expresadas en este documento son responsabilidad
de los autores y no comprometen a las organizaciones
mencionadas.



CO-COMBUSTIÓN DE PELLETS DE *JATROPHA CURCAS* (PIÑÓN) Y ASTILLAS DE MADERA EN UN QUEMADOR HORIZONTAL PROTOTIPO

Daniel Rivadeneira¹, Mario A. Heredia Salgado², Valeria Ramírez³, Ricardo Narvaez⁴,
Luíz António da Cruz Tarelho⁵, M.A Amador de Matos⁶

Recibido: 14/05/2018 y Aceptado: 15/10/2018
ENERLAC. Volumen II. Número 2. Diciembre, 2018, 2018 (8-23).



RESUMEN

En Ecuador, el uso de aceite de *Jatropha curcas* (Piñón) como biocombustible para generación eléctrica en las Islas Galápagos representa importantes beneficios a nivel ambiental y social. Sin embargo, estudios previos demuestran que el rendimiento financiero del proceso de acopio del fruto, así como la extracción del aceite de Piñón es bajo. El proceso de extracción tiene un rendimiento de aceite de 30 % p/p. Por lo tanto, 70% p/p de la materia prima procesada se convierte en biomasa residual, i.e. torta de piñón y cascarilla de piñón. En este contexto, la valorización energética de estos residuos es de gran interés pues la comercialización de combustible sólido pelletizado podría representar una alternativa para equilibrar el rendimiento financiero de las operaciones de extracción y por ende extender la producción y consumo de aceite de Piñón en Galápagos. Es así que el presente trabajo evalúa de forma experimental el uso de biomasa residual de piñón pelletizada como combustible sólido para la generación de energía térmica. Es importante notar que, en el Ecuador, la diferencia de altura que existe entre cada región hace que la demanda de energía térmica sea mayor en la sierra. Por lo tanto, el presente estudio estima además las calibraciones que sería necesario practicar a un sistema de combustión convencional para que opere a una altura típica de la serranía ecuatoriana. Los experimentos se llevaron a cabo a una altura de 2635 m.s.n.m. en un quemador de llama horizontal prototipo desarrollado localmente (30kWth). Un detector de radiación ultravioleta ubicado en la cámara de combustión permite evaluar el proceso de ignición a bajas temperaturas de la biomasa residual de Piñón pelletizada. Una vez verificada la presencia de una llama estable en la salida del quemador se estima el perfil axial de temperaturas de los gases efluentes en condiciones de estado estacionario. Los tipos de biomasa considerados en este estudio son: pellets de torta de piñón (P1), pellets producidos con 50% p/p de torta y 50% p/p cascarilla de piñón (P2), pellets producidos con 50% p/p

1 Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables – INER, Quito, Ecuador; Ingeniero Mecánico; analista técnico de INER, daniel.rivadeneira@iner.gob.ec

2 Department of Environment and Planning and Centre for Environmental and Marine Studies, University of Aveiro; Master en Sistemas Energeticos Sustentables, candidato a PhD, heredia.mario@ua.pt

3 Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables – INER, Quito, Ecuador; Master en Energías Renovables y Sostenibilidad Energética; analista técnico de INER, valeria.ramirez@iner.gob.ec

4 Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables – INER, Quito, Ecuador; Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador; MSc. en Energías Renovables; Subdirector Técnico en INER y Profesor en la UCE; ricardo.narvaez@iner.gob.ec

5 Department of Environment and Planning and Centre for Environmental and Marine Studies, University of Aveiro; Doctor en Ciencias Aplicadas del Ambiente, Profesor asistente, ltarelho@ua.pt

6 Department of Environment and Planning and Centre for Environmental and Marine Studies, University of Aveiro; Doctor en Ciencias Aplicadas del Ambiente, Profesor auxiliar, amatos@ua.pt

cascarilla de piñón y 50% p/p carbón de torta de piñón (P3) y finalmente astillas de origen forestal (AS).

Se estima que para operar bajo una condición estándar de combustión (concentración de 8-10% de O₂ en el efluente, gas seco) el exceso de aire requerido por la combustión es de 100 y 170%. Se verifican dificultades para estabilizar el frente de llama durante los procesos de ignición a baja temperatura de las muestras de combustible P1, P2 y P3. A este respecto, se observa que la adición de 75 % p/p de AS a las muestras de combustible P1, P2 y P3 permite sobrepasar estas limitaciones fijándose un frente de llama robusto y estable a la salida del quemador en un tiempo promedio de 124 s. Durante los experimentos de combustión, se verifican temperaturas del orden de 900°C en los gases efluentes, así como también ciertas oscilaciones en el perfil axial de temperaturas, comportamiento típico asociado a este tipo de sistemas.

Palabras Clave: Combustión de Biomasa Residual, Pelletización, *Jatropha Curcas*, Conversión Termoquímica, Ecuador.

ABSTRACT

*In Ecuador, the use of *Jatropha curcas* oil (Piñón) as a biofuel for power generation in the Galapagos Islands represents important environmental and social benefits. However, previous studies show that the financial performance of the process of gathering the fruit as well as the oil extraction is low. The extraction process has an oil yield of 30 wt%. Therefore, 70 wt% of the raw material processed is converted into residual biomass, i.e. seed cake and fruit shells. In this context, the energetic valorization of this waste is of major interest because the commercialization of solid pelletized fuel could represent an alternative to improve the financial performance of the extraction operations and thus extend the production and consumption of Piñón oil in the Galapagos Islands.*

Thus, the present work experimentally evaluates the use of Piñón pelletized residual biomass as a solid fuel for thermal energy production. It is important to note that in Ecuador, the altitude difference between each region makes the demand for thermal energy higher in the sierra. Therefore, the present study also estimates the calibrations that would be necessary to practice to a conventional combustion system to operate at a typical altitude of the Ecuadorian highlands. The experiments were carried out at an altitude of 2635 m.a.s.l. in a locally developed prototype horizontal flame burner (30kWth). An ultraviolet radiation detector located in the combustion chamber allows to evaluate the low temperature ignition process of the pelletized Piñón residual biomass. Once the presence of a stable flame in the burner exit has been verified, the axial profile of the temperature of the effluent gases is estimated under steady-state conditions. The types of biomass considered in this study are: seed cake pellets (P1), pellets produced with 50 wt% seed cake and 50 wt% fruit shell (P2), pellets produced with 50 wt% fruit shell and 50 wt% pyrolyzed seed cake (P3) and finally wood chips (AS).

It is estimated that to operate under a typical combustion condition (O₂ concentration of 8-10% in the effluent, dry gas) the excess air required must be between 100 and 170%. There are difficulties in stabilizing the flame front during the low temperature ignition processes of the fuel samples P1, P2 and P3. In this regard, it is observed that the addition of 75 wt% of AS to the fuel samples P1, P2 and P3 allows to overcome these limitations by fixing a robust and stable flame front at the burner outlet in an average time of 124 s. During the combustion experiments, temperatures in the order of 900°C were verified in the hot flame gases as well as certain oscillations in the axial temperature profile, that is a typical behavior associated with this type of systems.

Keywords: Residual Biomass Combustion, Pelletization, *Jatropha Curcas*, Thermochemical Conversion, Ecuador.

INTRODUCCIÓN

Ecuador es considerado un país muy diverso debido a la extensa flora y fauna que se distribuye a lo largo de su territorio. Sin embargo resaltan en particular las Islas Galápagos dado que son un refugio de inusual vida silvestre hecho que le ha merecido la declaración de Patrimonio de la Humanidad en 1979 y en el 2007 por la UNESCO (UNESCO, 1978). Las Islas Galápagos cuentan con 25.244 residentes permanentes cuya actividad principal está relacionada a los servicios turísticos (Gal, 2010). La demanda de energía eléctrica de la población residente en las Islas Galápagos es generada mediante la conversión energética de combustibles fósiles, principalmente diésel (Arboit, Arena, & de Rosa, 2008), que a su vez son transportados por vía marítima desde el continente (ELECGALÁPAGOS S.A., 2015). El potencial derrame de combustibles fósiles durante los procesos de transporte es una gran preocupación, pues podría ocasionar daños irreversibles al ecosistema de las Galápagos. De hecho, en el año 2001 se registró un derrame de 145.000 galones de combustible en las aguas del archipiélago durante una desafortunada operación de transporte. A raíz de este evento, el gobierno ecuatoriano impulsa la iniciativa “Cero Combustibles Fósiles en las Islas Galápagos” (Enrique Heinemann GIZ, 2015).

Es así que dentro del marco del “Cero Combustibles Fósiles en las Islas Galápagos”, el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) lleva a cabo el Proyecto “Producción de aceite de Piñón para el plan piloto de generación eléctrica en Galápagos”, el cual a partir del 2008 tiene como objetivo principal, reemplazar parte del diésel utilizado para la generación eléctrica por aceite vegetal puro de *Jatropha Curcas* (Piñón) que a su vez sería producido en la provincia costera de Manabí (IICA, 2011). A partir del lanzamiento de este proyecto se han reportado impactos positivos tanto a nivel ambiental como a nivel social en las Islas Galápagos y en la provincia de

Manabí. Sin embargo, las operaciones de post-cosecha asociadas a la producción de aceite de Piñón en la provincia de Manabí representan una gran preocupación debido al bajo rendimiento financiero que arrojan requiriendo por lo tanto inyecciones continuas de capital tanto de instituciones públicas como también de organizaciones no gubernamentales para darle continuidad a esta iniciativa (Recalde, 2016).

Es importante notar que durante el proceso de extracción de aceite de piñón se genera una importante cantidad de biomasa residual. Dentro de la biomasa residual generada durante la extracción de aceite de piñón se encuentran: a) la cáscara del fruto y b) la torta (fracción sólida obtenida luego de la extracción de aceite). Se estima que el 70% p/p de la materia prima que se procesa durante la extracción de aceite de Piñón se convierte en biomasa residual (Recalde, 2016). Por lo tanto, se ha venido planteando que la valorización energética de esta biomasa residual podría representar una importante alternativa para mejorar el rendimiento financiero de las operaciones de post-cosecha (i.e. acopio y extracción de aceite de Piñón).

Bajo esta coyuntura y con el fin de evaluar el potencial de conversión energética de la biomasa residual de Piñón, el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER) ha implementado una planta piloto de pelletización en la ciudad de Portoviejo, provincia de Manabí que tiene como principal objetivo valorizar la biomasa residual producida durante el proceso de extracción de aceite de Piñón, transformándola en un combustible sólido de alto contenido energético. Por lo tanto, enmarcado en estos esfuerzos el presente trabajo pretende evaluar el uso de biomasa residual de piñón pelletizada como alternativa para la generación de energía térmica generando así evidencias documentadas que permitan conocer las implicaciones prácticas del uso de este tipo de combustible sólido en un sistema de conversión de energía. Es importante notar que la naturaleza del proceso de extracción de

aceite de Piñón (presión mecánica) hace que no se requiera energía térmica en las extractoras. Por ende, el uso de los pelletizados provenientes de la biomasa residual de Piñón no podría ser valorizado dentro de las mismas extractoras. Sin embargo, los pelletizados provenientes de la biomasa residual de Piñón podrían encontrar un importante mercado en la serranía ecuatoriana, dado que la diferencia de altura que existe entre esta y las demás regiones del país hace que la demanda de energía térmica sea mayor en las ciudades situadas en la altura.

Con esta base se definieron siete tipos de biocombustibles que consideran pelletizados de biomasa residual de Piñón y astillas de biomasa forestal, para los que se evalúa de forma individual: a) el proceso de ignición a bajas temperaturas (tiempo de ignición de una muestra normalizada en la cámara de combustión del quemador) y b) el perfil axial de temperaturas en la región de la llama. Los ensayos de combustión se realizaron en un quemador horizontal prototipo diseñado y construido localmente cuyas condiciones de operación fueron definidas mediante un modelo numérico que aplica una corrección estequiométrica acorde a condiciones de altura específicas (2635 msnm). Se determinó además

la composición teórica del gas efluente con base en un balance general de masa y energía tomando en cuenta la composición proximal y elemental de cada formulación de pellets. Finalmente, para una condición estequiométrica fija fue prevista la estimación del perfil de temperaturas axial en tres puntos diferentes de la región de la llama con el fin de definir las temperaturas del proceso de combustión además de evaluar si se alcanzan condiciones de estado estacionario.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

La biomasa residual expuesta en este trabajo considera los residuos desprendidos durante el proceso de extracción de aceite de Piñón (pelletizados) y una muestra de biomasa residual forestal, ya que toda la experimentación a nivel mundial basa sus investigaciones en quemadores de biomasa de residuos forestales. Con base en estas muestras de combustible se elaboraron diferentes mezclas de combustible. Así, la tabla 1 presenta en detalle la composición y porcentaje de mezcla de cada muestra de combustible utilizada en este estudio.

Tabla 1.- Denominación y formulación de los biocombustibles utilizados durante los ensayos.

Número	Muestras	Abreviaturas	Formulación
1	Astilla	AS	100% Astilla*
2	Pellet 1	P1	100% de torta de piñón*
3	Pellet 2	P2	50% de torta de piñón & 50% de cascarilla de piñón*
4	Pellet 3	P3	50% de carbón de torta de piñón & 50% de cascarilla de piñón*
5	Mezcla 1	M1	75 % AS & 25% P1*
6	Mezcla 2	M2	75 % AS & 25% P2*
7	Mezcla 3	M3	75 % AS & 25% P3*

*Los porcentajes expuestos en la tabla corresponden al porcentaje en peso de la muestra.

El diámetro equivalente (d_e) de la biomasa residual forestal utilizada en los experimentos es de $10 \text{ mm} > d_e < 30 \text{ mm}$. Por otro lado, las dimensiones de la biomasa residual de Piñón pelletizada son; largo: 35mm y ancho: 9mm.

La composición proximal y elemental de las muestras de combustible utilizadas como base para la formulación del resto de muestras de combustibles (M1, M2 y M3) se muestra en la tabla 2.

Tabla 2.- Análisis proximal y elemental de las muestras de combustible utilizadas en los ensayos de ignición a baja temperatura

Análisis Proximal (p/p.%)				Análisis Elemental (p/p.%, bs)				
Muestras	Humedad (%)	Cenizas (%)	Poder calórico ^b (MJ/kg)	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O ^a (%)
AS	8,02	4,21	24,21	60,51	7,56	1,03	0,00	30,90
P1	4,08	7,24	17,04	54,34	6,73	5,22	0,73	32,98
P2	7,33	9,04	15,71	50,13	6,03	3,53	0,62	39,69
P3	9,93	12,10	21,34	56,69	4,02	2,94	0,46	35,89

^a Valores obtenidos por diferencia

^b Poder calórico superior PCS

bs=base seca.

Fuente: INER, 2017

Modelo numérico para el balance de masa y energía del sistema de combustión

El modelo numérico utilizado para realizar el balance de masa del quemador horizontal prototipo sigue las ecuaciones y consideraciones propuestas por (Mario A. Heredia Salgado, 2013; Mario A. Heredia Salgado, A.C.Tarelho, &

Matos, 2016). Todas las variables del proceso y las ecuaciones de estado fueron integradas en Matlab® con fines analíticos. Así, la ecuación global para estimar la composición teórica del gas efluente se presenta en la Ec. (1).

$$(1) \left[\frac{W_{C,F}}{M_C}, \frac{W_{H,F}}{M_H}, \frac{W_{O,F}}{M_O}, \frac{W_{N,F}}{M_N}, \frac{W_{S,F}}{M_S}, \frac{W_{W,F}}{M_W} \right] + \left[\frac{W_{a,A}}{M_{aire}} \right] * (1 * O_2 + 3.76 * N_2 + 7.66 * W_A * H_2O) = (n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{O_2} + n_{SO_2} + n_{N_2} + \frac{W_{ceniza,F}}{12})$$

Del mismo modo, el balance global de energía para el quemador horizontal prototipo fue implementado en el modelo numérico mediante la Ec. (2).

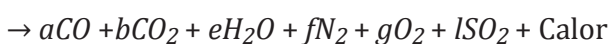
$$(2) \quad \Delta H_r = \Delta H_u + \Delta H_p + \Delta H_l$$

Durante el balance de energía (Ec.2), el contenido de energía en los reactivos: ΔH_r (biomasa y aire) y en los productos de la reacción ΔH_p (efluente gaseoso) fue dividido en tres porciones: a) calor sensible, b) calor latente y c) calor de la reacción. El calor sensible considera la diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura del elemento bajo análisis (reactivos o productos). Por otro lado, el calor latente considera la energía generada o perdida como resultado del cambio de fase de las especies condensables y el calor de la reacción considera la energía química presente en los elementos bajo análisis (reactivos o productos). Finalmente, las pérdidas de energía durante el proceso de combustión se estimaron como el 10% del contenido de energía en los reactivos (Mario A. Heredia Salgado et al., 2016). Por otro lado, la energía térmica útil como resultado del proceso de combustión se estimó mediante la Ec. (3).

$$(3) \quad \Delta H_u = \Delta H_r - \Delta H_p - \Delta H_l$$

Reacciones de combustión y cálculo estequiométrico

Para la combustión de M1 con la formula $C_n H_m N_o S_r$ la reacción de combustión para un mol (volumen) de combustible se presenta en la Ec. 4:



En esta reacción (Ec. 4), n representa el número de átomos de carbón en la molécula de combustible, m el número de átomos de hidrógeno, p el número de átomos de oxígeno, q el número

de átomos de nitrógeno y r el número de átomos de azufre. Con el fin de garantizar una conversión completa del combustible durante el proceso de combustión se considera un exceso de oxígeno. El exceso de oxígeno utilizado se expresa en función del oxígeno teórico mediante un coeficiente α tal como se presenta el cálculo en la Ec. 5:

$$(5) \quad \text{Exceso de oxígeno} = \alpha = \frac{\text{oxígeno total utilizado} - \text{oxígeno teórico}}{\text{oxígeno teórico}}$$

$$\alpha = \frac{\text{oxígeno total}}{\text{oxígeno teórico}} - 1$$

Del mismo modo, el oxígeno que se utiliza para quemar una masa determinada de combustible, puede ser expresado según la Ec. 6.

$$(6) \quad \text{oxígeno total} = (1 + \alpha) \text{oxígeno teórico}$$

Quemador horizontal prototipo

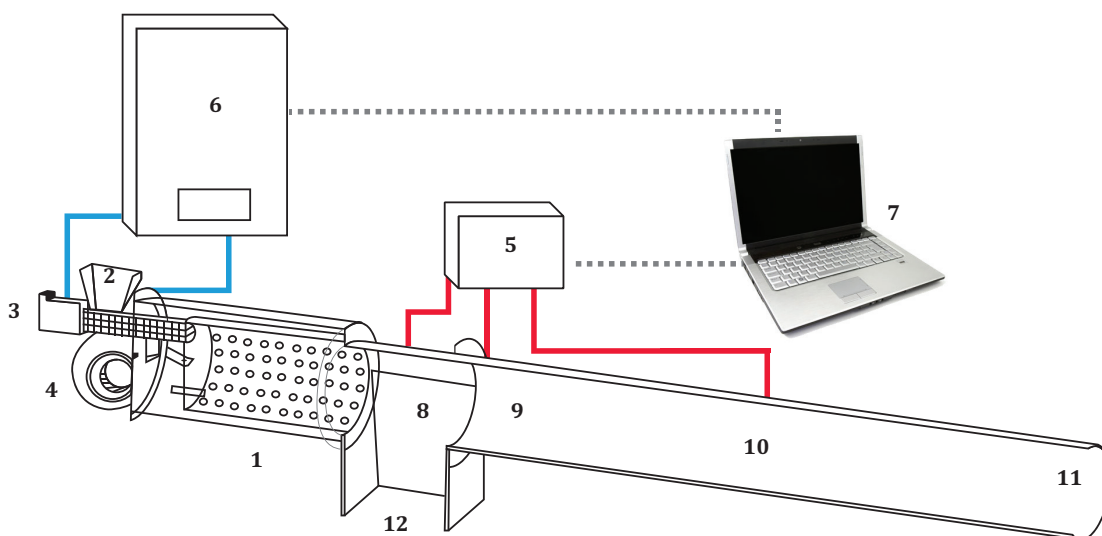
Las experiencias se realizaron en un prototipo de quemador horizontal configurable para la combustión de biomasa residual de diferentes granulometrías. El quemador fue diseñado para una potencia térmica máxima de 30kWth. El aire para la combustión es suministrado por un soplador industrial de velocidad variable CY 125 (Montero, Taiwán). El aire primario es dosificado a través de 34 orificios de 5 mm de diámetro dispuestos en la superficie inferior de la camisa de combustión (ver Fig. 1). El aire secundario es dosificado a través de un anillo de post-combustión (orificios de 5 mm de diámetro) dispuesto sobre el extremo final de la boca del quemador (ver Fig. 1). El quemador cuenta con un alimentador horizontal de tornillo accionado por un motor de velocidad y torque variable 85BYGH450D-007B (Wantai., Jiangsu, China). El sistema de ignición y puesta en marcha utiliza una resistencia térmica PT-101 de 300W (HKT Co., Tokio, Japón). Todos los dispositivos y sistemas

auxiliares para el control del quemador se gestionan a través de un sistema de automatización desarrollado sobre una plataforma de código abierto “open source” comandado por un micro controlador ATmega1280 (Arduino LLC, Italia). Los parámetros de control del proceso de combustión que pueden ser manipulados desde el sistema de control electrónico son: velocidad y torque del alimentador horizontal de tornillo, velocidad del soplador y tiempo de activación del sistema de ignición (resistencia térmica).

Para la estimación de la relación estequiométrica aire/combustible, los diferentes niveles de caudal de aire entregado por el soplador industrial se determinaron a través de un caudalímetro (tubo de Pitot) integrado a un elemento de sensado MPXV7002dp (Freescale Semiconductor Inc., Texas, EEUU), comandado por un micro controlador ATmega328P (Arduino LLC, Italia). Cada medición fue replicada en cinco ocasiones. Por otro lado, las temperaturas del proceso de combustión fueron monitoreadas utilizando termopares tipo K G675455 (Watlow Electric Manufacturing Co., St. Louis, EEUU)

integrados a un amplificador MAX6675 comandado a su vez por un microcontrolador ATmega328P (Arduino LLC, Italia). El sistema de medición del caudal de aire del soplador y el sistema de monitoreo de temperaturas también fueron desarrollados sobre plataformas de hardware y software de código abierto “open source”. La adquisición de todos los datos se realiza mediante una red de comunicación serial que enlaza todos los dispositivos de monitoreo con un computador mediante una interfaz gráfica que permite su posterior análisis y evaluación. Es importante indicar que los termopares están ubicados sobre una cámara de combustión que posee un diámetro de 152.4 mm y una longitud 1200 mm con una capa de aislamiento térmico con un espesor de 150 mm. La referencia para la colocación de los termopares en relación a la boca de salida de la llama del quemador se detalla a continuación: Termopar 1 (T1) a 30 mm de la boca de salida de la llama del quemador, Termopar 2 (T2) a 160 mm del mismo punto referencial y finalmente el Termopar 3 (T3) instalado a 730 mm del mismo punto referencial según se indica en la Fig. 1.

Figura 1. Esquema de la infraestructura experimental utilizada para evaluar el perfil de temperaturas en el gas efluente. 1) Cámara de combustión, 2) Tolla, 3) Tornillo sin fin, 4) Soplador, 5) Registrador de datos temperatura, 6) Tablero de control dl quemador, 7) Laptop, 8) Termopar - T1, 9) Termopar - T2, 10) Termopar - T3, 11) Cámara de combustión con aislamiento térmico, 12) Puerto de descarga de cenizas.



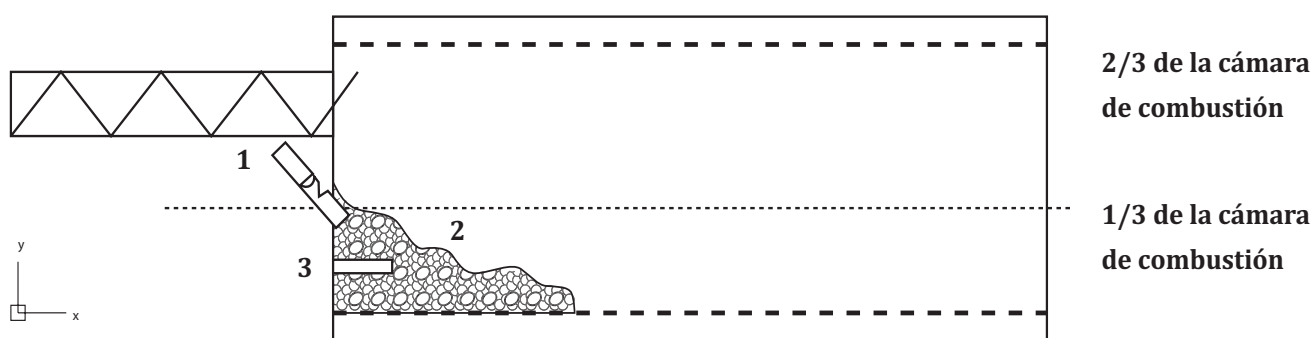
Fuente: Rivadeneira & Heredia, 2017

Ensayos de ignición a bajas temperaturas

Los ensayos de ignición a baja temperatura para cada muestra de combustible según la tabla 1 se llevaron a cabo considerando: a) El mismo caudal de aire para cada muestra y b) El mismo volumen de biomasa dentro de la cámara de combustión según un nivel de referencia fijo. La masa de cada muestra de combustible que se alimenta hacia la cámara de combustión de acuerdo al volumen de referencia establecido se estimó mediante una balanza KS05P (electrolux, Estocolmo - Suecia) de 5kg de capacidad con una apreciación de

0,001 kg. Para cada ensayo de ignición a bajas temperaturas, el nivel de referencia fijo dentro de la cámara de combustión -que es establecido de acuerdo al volumen de referencia- fue definido en relación a la ubicación del detector de llama (ver Fig. 2). A su vez, la ubicación del detector de llama dentro de la cámara de combustión fue definida de acuerdo con las recomendaciones del fabricante (Honeywell, 2015) tal como se muestra en la Fig. 2. El detector de llama es del tipo ultravioleta C7032 (Honeywell, Nueva Jersey-EUA).

Figura 2. Infraestructura experimental utilizada para analizar el proceso de ignición de las muestras de combustible a bajas temperaturas. 1) Detector de llama ultravioleta, 2) Muestra de combustible, 3) Resistencia térmica.



Fuente: Rivadeneira, 2017

Los ensayos de ignición a bajas temperaturas se llevaron a cabo conforme el siguiente procedimiento: a) se alimenta la muestra de combustible hasta el nivel de referencia - 1/3 del volumen de la cámara de combustión (Fig. 2), b) se activa la resistencia térmica (elemento calefactor de 300 W) por un periodo de 60s, c) Una vez transcurridos 60s desde la activación de la resistencia térmica, se activa el soplador con un flujo de aire constante de 109.6 kg/h, d) Finalmente, posterior a los pasos b) y c) se verifica el cambio de estado del detector de llama del tipo ultravioleta en el tablero de control. Así, el tiempo total del procedimiento es cronometrado para cada muestra de combustible. Se realizan 5 réplicas de todo el procedimiento por cada muestra de combustible considerada en el ensayo (AS, P1, P2, P3, M1, M2, M3).

Es importante notar que durante el proceso de extracción de aceite de piñón se genera una importante cantidad de biomasa residual. Dentro de la biomasa residual generada durante la extracción de aceite de piñón se encuentran: a) la cáscara del fruto y b) la torta (fracción sólida obtenida luego de la extracción de aceite). Se estima que el 70% p/p de la materia prima que se procesa durante la extracción de aceite de Piñón se convierte en biomasa residual.

Análisis y tratamiento de datos del perfil de temperaturas

Con el fin de comparar la estabilidad del proceso de combustión (amplitud de las fluctuaciones en el perfil de temperaturas axial del gas efluente) entre cada una de las muestras de combustible analizadas fue necesario utilizar gráficas de control para distinguir así, si el sistema mantiene su temperatura dentro de parámetros establecidos que permitan predecir si el sistema es adecuado para una aplicación industrial o no, mediante las fluctuaciones de la temperatura en función del tiempo. Para lo cual se planteó una gráfica en la que se define un límite superior y un límite inferior mediante la Ec. (7).

$$(7) \quad \mu \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Los parámetros μ y σ de la (Eq.7), representan la media y la desviación típica respectivamente. Es importante notar que la desviación típica (σ) es simétrica respecto a la media (μ). Por lo tanto, con el fin de evaluar la amplitud de las fluctuaciones que presenta el perfil de temperaturas a lo largo del tiempo, en un entorno ± 1 de σ se consideran múltiplos de σ a ambos lados de μ (Hernán Darío Rendón, 2013; Rojas, 2006).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ignición a baja temperatura de las muestras de biomasa

Los resultados obtenidos durante los ensayos de ignición a bajas temperaturas de cada muestra de biomasa en el quemador horizontal prototipo se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de los ensayos de ignición a baja temperatura para cada una de los tipos de biomasa consideradas en la Tabla 1. El caudal másico de aire suministrado durante los experimentos fue 109.6 kg/h

Ensayo	Tipo de biomasa	Masa alimentada (kg)	Tiempo de ignición de la biomasa (s)
1	AS	0,0735	124
2	P1	0,14	<i>a</i>
3	P2	0,086	<i>a</i>
4	P3	0,2005	<i>a</i>
5	M1	0,845	167
6	M2	0,1585	116
7	M3	0,1245	132

a Bajo las condiciones consideradas no hubo presencia de llama ni señal en el sensor de radiación ultravioleta después de 360 segundos.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la Tabla 3, se observa que el tiempo de ignición promedio de las muestras AS, M1, M2, M3 es de 134,7s. El tiempo de ignición promedio es el tiempo transcurrido desde la activación del sistema de ignición (resistencia térmica y soplador) hasta que el sensor de radiación ultravioleta verifica la presencia de un frente de llama estable en el quemador. Por el contrario, bajo las mismas condiciones experimentales las muestras P1, P2 y P3 no encendieron a pesar de considerarse un periodo de ensayo más extenso (360 s). Es decir, a pesar de la activación del sistema de ignición (resistencia térmica y soplador) por un periodo de 360s no se consigue establecer un frente de llama estable en el quemador que permita sustentar el proceso de combustión. Las dificultades para encender el quemador al usar las muestras de combustible P1, P2 y P3 puede estar relacionado a la baja reactividad típica de las biomásas agrícolas (Jones, Saddawi, et al., 2015; Jones, Lea-Langton, Ma, Pourkashanian, & Williams, 2015) y probablemente a la necesidad de alcanzar mayores temperaturas en la cámara de combustión durante el periodo de ignición. La literatura disponible afirma que las dificultades asociadas al uso de biomasa agrícola como combustible sólido para la generación de energía térmica pueden ser únicamente contorneadas mediante la incorporación de biomasa forestal en un porcentaje de al menos 70% p/p (Zeng, Pollex, Weller, Lenz, & Nelles, 2018; Zeng, Weller, Pollex, & Lenz, 2016).

A este respecto, se observa que el uso de una mezcla de combustible de 75% p/p de la muestra AS con 25% p/p de las muestras P1, P2 y P3 (es decir las muestras de combustible M1, M2 y M3) permite aproximar el tiempo de ignición de los pelletizados de piñón al tiempo verificado en la muestra AS que es de 124s, estableciéndose un frente de llama estable en la salida del quemador. Es importante notar que, para el caso de la muestra M2, el tiempo de ignición fue reducido en 8s respecto del tiempo de ignición de la muestra AS, hecho que posiblemente se pueda atribuir a que la masa ingresada en la cámara de

combustión para el ensayo correspondiente a la muestra M2 es mayor con respecto a la masa que ingresa en los ensayos correspondientes a las muestras M1 y M3 (ver Tabla 3). Este aumento de la masa observado durante el ensayo de la muestra M2 se debe a que el tamaño de partículas de las astillas (AS) utilizadas no es uniforme, por ende, esta diferencia en el tamaño y forma asociadas a las astillas utilizadas en este ensayo provocan alteraciones e irregularidades durante el proceso de alimentación de combustible hacia la cámara de combustión.

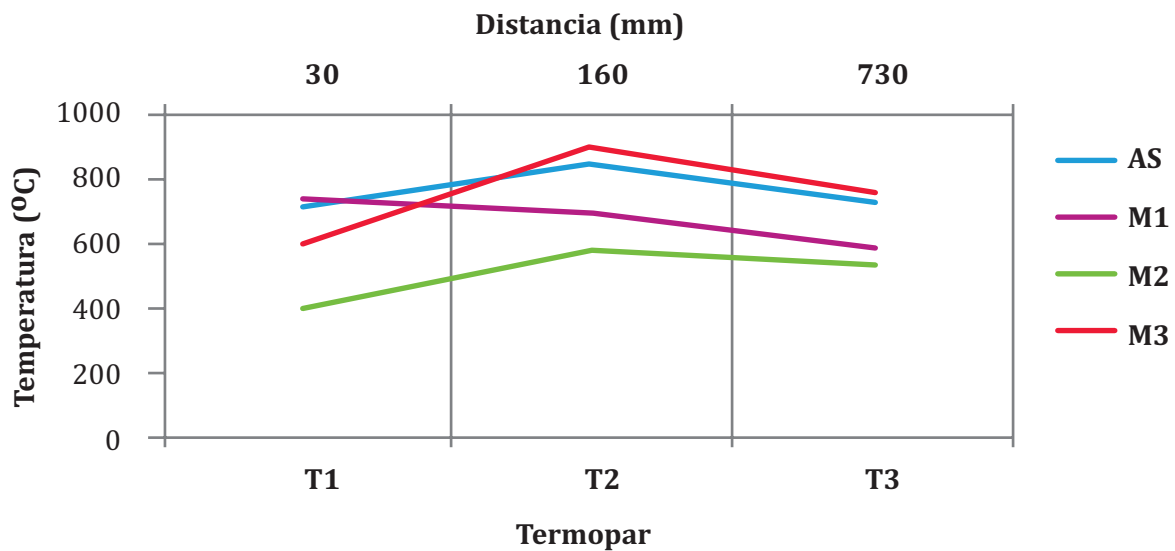
Proceso de combustión y perfil axial de temperaturas del gas efluente

El modelo numérico expuesto en la página 13 estima que para las condiciones de altura consideradas en los ensayos (2635 m.s.n.m), la concentración de O₂ en el aire de combustión decrece del típico 21%vol observado a nivel del mar a un valor de 16%vol. Se ha observado que la condición típica de concentración de O₂ en el efluente gaseoso durante los procesos de combustión de biomasa residual es del 10%vol, gas seco (L.- Carvalho, Lundgren, Wopienka, & Ohman, 2007; L. Carvalho et al., 2013; Obaidullah et al., 2014). Por lo tanto, para compensar la caída en la concentración de O₂ producto de la altura y alcanzar la concentración de O₂ referida en la literatura (10%vol, gas seco) en el efluente es necesario incrementar el suministro de aire en un 170%. Bajo estas condiciones estequiométricas (exceso de aire: 170%, alimentación de combustible: 5.5 kg/h), se observa que las temperaturas alcanzadas superan los 700°C con excepción de la muestra de combustible M2 en la que se verifican temperaturas por debajo de los 600°C. La temperatura más alta registrada en la región de la llama corresponde al ensayo que considera la muestra M3 como combustible (899.6°C). La muestra M3 considera el uso de una materia prima pirolizada (torta pirolizada, ver Tabla 1) a la que se le atribuye un alto contenido energético (21.34 MJ/kg). Por lo tanto, la mayor temperatura observada esta en directa relación con el contenido energético

de la muestra M3. En orden decreciente, la segunda mayor temperatura observada corresponde a la combustión de la muestra de combustible

AS (astillas) (800°C) y M1 (25 % p/p torta de Piñón & 75 % p/p astillas) (711.6 °C) respectivamente.

Figura 3. Perfil axial de temperatura de los gases efluentes (frente de llama) del quemador durante los ensayos de combustión en estado estacionario.



Fuente: Rivadeneira & Heredia, 2017

Es importante notar que el perfil de temperaturas alcanzado durante la combustión de las muestras de combustible: AS, M2 y M3 es similar. Es decir, se observa un incremento de temperatura desde la salida del quemador, que alcanza el punto máximo de temperatura a la altura del termopar 2, punto a partir del cual la temperatura decrece a medida que aumenta la distancia con respecto de la salida del quemador. Por otro lado, el perfil de temperaturas que se observa durante la combustión de la muestra M1 presenta un comportamiento independiente del observado durante la combustión de las muestras AS, M2 y M3. Así, durante la combustión de la muestra M1, la temperatura más alta se verifica a la altura del termopar 1, precisamente a la salida del quemador. A partir del punto de ubicación del termopar 1, la temperatura decrece a medida que la distancia hacia la salida del quemador aumenta. Esta diferencia puede deberse al hecho de que una parte de la composición de muestra M1 considera un pellet formado con torta de

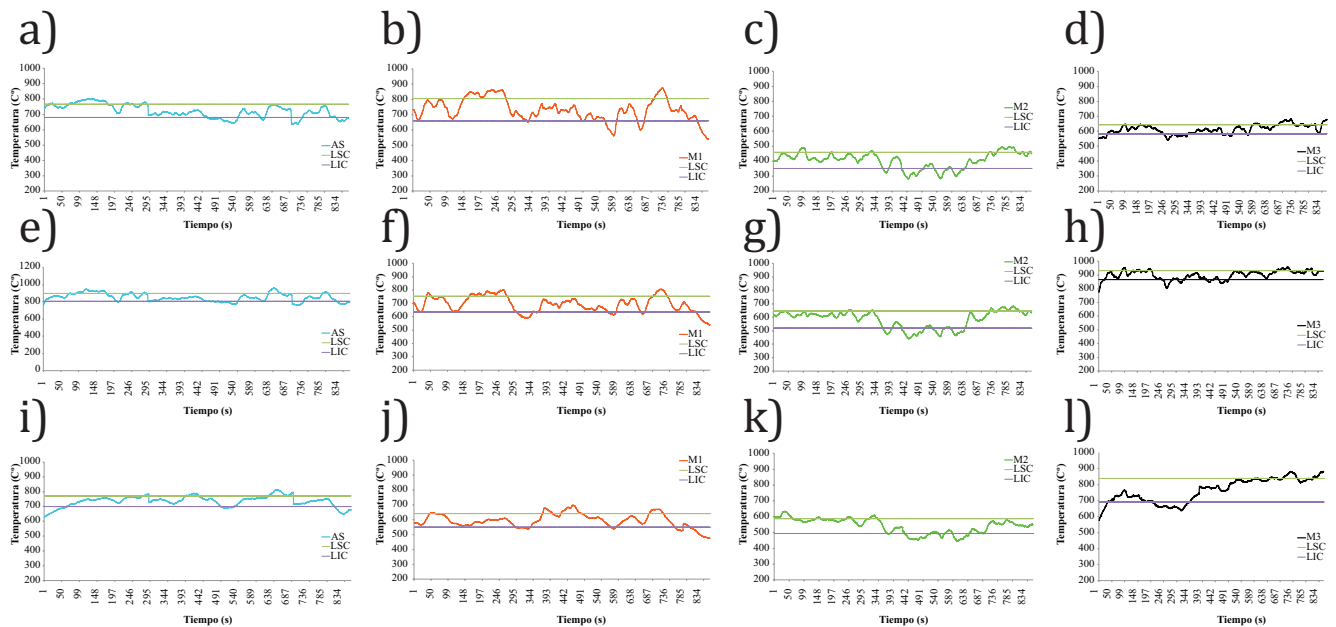
Piñón. Por la naturaleza del proceso de extracción del aceite de Piñón (presión mecánica) la torta puede contener en su estructura restos del aceite de Piñón, lo cual podría estar influenciando el perfil de temperaturas en la región de la llama, especialmente en relación al punto en el que se ubica la más alta temperatura. La ubicación en la que se sitúa la más alta temperatura durante el proceso de combustión (a la altura de T2 para el caso de las muestras de combustible AS, M2 y M3 y a la altura de T1 para el caso de la muestra de combustible T1) muestra que la mayor disponibilidad de energía térmica se encuentra en la proyección de los gases calientes, entre 30mm y 160mm aproximadamente desde la boca del quemador. A partir de ese punto (entre 30 y 160 mm desde la boca del quemador) la temperatura decrece debido al intercambio de calor entre el efluente gaseoso y el ambiente circundante. En las regiones de la llama mencionadas (a la altura de T1 y T2) se verifica por tanto una intensa zona de combustión en fase gaseosa.

Finalmente, la Fig. 4. muestra las gráficas de control del proceso de combustión obtenidas mediante la Eq. (4). El análisis de la amplitud de las fluctuaciones en el perfil de temperaturas axial de los gases efluentes se tomó como parámetro de control el perfil de temperaturas obtenido durante la combustión de la muestra de combustible AS. En la Fig. 4 se observa que la adición del 25 p/p % de las muestras de combustible (P1, P2 y P3) a la muestra de combustible AS (es decir las muestras de combustible M1, M2 y M3) provoca una disminución en la amplitud de las oscilaciones en el perfil de temperaturas, especialmente a la altura de los termopares T1 y T2. A la altura de los termopares T1 y T2 se verifica una mayor estabilidad en el proceso de combustión con una disminución del 20% en las oscilaciones. La disminución en las oscilaciones en el perfil de

temperaturas observado entre la muestra AS y M1, M2 y M3 se debe a que la presencia de los pellets permite uniformizar mejor el proceso de alimentación de combustible hacia la cámara de combustión, tornando más estables las descargas del tornillo sinfín sobre la cama de combustión. Sin embargo, a pesar de que la adición de pellets a la mezcla de combustible permite mejorar el proceso de alimentación y transporte de la biomasa en el reactor, en el termopar 3 aún se evidencian oscilaciones mayores en el perfil de temperaturas. El hecho de que las oscilaciones sean mayores a la altura del termopar 3 (el más alejado de la salida del quemador) podría deberse a la menor disponibilidad de energía térmica en esa zona (zona de más baja temperatura) y al intercambio de calor más intenso que sufre el gas efluente con el medio circundante en esa región.



Figura. 4. Graficas de control del proceso de combustión en el quemador piloto de 60kWth. Leyenda: Azul= astillas^a, Rojo= M1^a, Verde = M2^a, Negro = M3^a.



^a Los valores representados en las gráficas de control corresponden en forma vertical de arriba hacia abajo, las condiciones en T1, T2 y T3 respectivamente.

Fuente: Rivadeneira, 2017

CONCLUSIONES

Durante la ejecución del proyecto “Producción de aceite de Piñón para el plan piloto de generación eléctrica en Galápagos” se ha verificado que las operaciones de post-cosecha (es decir, acopio del fruto y extracción de aceite) tienen un bajo rendimiento financiero. Sin embargo, en contrapartida, el uso de aceite de Piñón puro para la generación de energía eléctrica en las Islas Galápagos representa importantes beneficios de carácter ambiental y social. Es por ello que la evaluación de alternativas para la valorización energética de la biomasa residual que se produce durante el proceso de extracción de aceite de Piñón es de gran importancia pues este enfoque complementario podría ser un aporte al mejoramiento del rendimiento financiero de las operaciones de extracción de aceite. Es importante notar que a diferencia de

otro tipo de oleaginosas, durante las operaciones de extracción de aceite de Piñón no se requiere energía térmica. Por lo tanto, el proceso se realiza apenas de forma mecánica. Esto, sugiere que los pelletizados de biomasa residual de Piñón deberán encontrar un mercado local para su consumo. A este respecto, el uso de combustibles sólidos, como la biomasa residual de Piñón pelletizada, para la generación de energía térmica podría encontrar un importante nicho de distribución y comercialización en la serranía ecuatoriana donde por condiciones climáticas la energía térmica es mayormente demandada, tanto a nivel doméstico como a nivel industrial. Sin embargo, el uso en condiciones de altura de un combustible sólido requiere importantes ajustes estequiométricos. Este trabajo estima que la concentración de O₂ en el aire de combustión disminuye del 21%vol observado a nivel del mar hasta un valor del 16%vol a una condición

de altitud típica de la serranía ecuatoriana (2635 m.s.n.m). Por ende, el suministro de aire del sistema de combustión debe operar bajo una tasa de alimentación de 170% por encima del nivel estequiométrico (combustión ideal).

Adicionalmente, se verifica que los pelletizados de biomasa residual de Piñón (P1, P2 y P3) presentan dificultades durante el proceso de ignición a bajas temperaturas, siendo que en ninguno de los casos fue posible establecer un frente de llama estable en el quemador. Por el contrario, se observa que el uso de astillas como combustible permite iniciar el proceso de combustión (ignición a baja temperatura) en un tiempo máximo de 124 s. Esto indica que la posiblemente la reactividad de la biomasa residual de Piñón es baja, comportamiento también observado en otros tipos de biomasa residual principalmente de origen agrícola. Se observa, por lo tanto, que una mezcla de 75% p/p de astillas con 25% p/p de pelletizados de biomasa residual de Piñón (P1, P2 y P3) permite sobrellevar estas dificultades permitiendo la ignición del quemador en un tiempo promedio de 138 s.

Durante los ensayos de combustión de las mezclas de combustible M1, y M3 se observaron altas temperaturas en la región de la llama; 711.6°C y 899.6°C respectivamente. Únicamente para el caso de la muestra de combustible M2 se verificaron bajas temperaturas (menores a 600°C) lo que sugeriría que la mezcla de torta de Piñón con cascarilla de Piñón en una relación de 50/50% p/p provoca una disminución de la temperatura máxima alcanzada en la región de la llama, considerando que la mezcla que considera el uso de torta de Piñón, y de torta de Piñón pirolizada permite alcanzar

temperaturas por encima de 700°C y tan altas como 900°C respectivamente, también se debe resaltar que la adición de pellet provoca que el sistema se estabilice en alrededor de un 20%, logrando así que los ascensos y descensos de temperatura se tornen más estables con lo cual se puede pensar en darle una aplicación industrial. Finalmente, es importante señalar que la evaluación de la factibilidad técnica del uso de pelletizados de biomasa residual de Piñón en condiciones de altura requiere de manera complementaria el análisis de la composición del gas efluente, con el fin de evaluar si las concentraciones (de CO por ejemplo) cumplen con los límites de emisión actualmente exigidos por los entes de regulación nacionales e internacionales.

A diferencia de otro tipo de oleaginosas, durante las operaciones de extracción de aceite de Piñón no se requiere energía térmica. Por lo tanto, el proceso se realiza apenas de forma mecánica. Esto, sugiere que los pelletizados de biomasa residual de Piñón deberán encontrar un mercado local para su consumo.

REFERENCIAS

- Heinemann, E. (2015). Energías renovables para Galápagos. ENERLAC, 1-2.
- Arboit, M., Arena, P., & de Rosa, C. (2008). Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 12, 97-104.
- Carvalho, L., Lundgren, J., Wopienka, E., & Ohman, M. (2007). Challenges in small scale combustion of agricultural biomass fuels. . Energy for a Clean Environment, 9(1-3), 127-142.
- Carvalho, L., Wopienka, E., Pointner, C., Lundgren, J., Verma, V., Haslinger, W., & Schmidl, C. (2013). Performance of a pellet boiler fired with agricultural fuels. Applied Energy. Applied Energy, 58-100.
- Heredia Salgado, M. A. (2013). Sewage sludge drying and combustion. Aveiro.
- Heredia Salgado, M., Tarelho, L., & Matos, A. (2016). Valoración del calor residual de reactores de pirólisis para la producción combinada de carbón vegetal y combustible torreficado. Revista Técnica Energía, 12(1), 396-404.
- Honeywell. (2015). Minipeeper Ultr Data Sheet :C7027A, C7035A, C7044A, C7927A .
- IICA. (2011). Proyecto Piñón para Galapagos. Obtenido de IICA Ecuador: http://legacy.iica.int/Esp/regiones/andina/Ecuador/Paginas/proyecto_pi%C3%B1on_pag1.aspx
- Jones, J., Lea-Langton, A., Ma, L., Pourkashanian, M., & Williams, A. (2015). Combustion of Solid Biomass: Classification of Fuels. In Pollutants Generated. The Combustion of Solid Biomass Fuels , 144.
- Jones, J., Saddawi, A., Dooley, B., Mitchell, E., Werner, J., & Waldron, D. (2015). Low temperature ignition of biomass. Fuel Processing Technology, 134, 372-377.
- Nogués, F., García-Galindo, D., & Rezeau, A. (2010). Combustión. En Energía de la biomasa (págs. 64-67). Zaragoza.
- Obaidullah, M., Dyakov, I., Thomassin, J., Dusquesne, T., Bram, S., Contino, F., & De Ruyck, J. (2014). CO emission measurements and performance analysis of 10 kW and 20 kW wood stoves. . Energy Procedia, 61, 2301-2306.
- Recalde, P. (2016). Sistematización de la experiencia, producción de aceite de piñón para plan piloto de generación eléctrica en Galápagos. Quito: Tesis de Posgrado Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Rendón, H. (2006). Control Estadístico de Calidad.
- Rojas, P. (2006). Control Estadístico de Procesos.
- UNESCO. (1978). The World Heritage Convention: Galapagos Islands, Ecuador. Obtenido de The World Heritage Convention: Galapagos Islands, Ecuador: <http://whc.unesco.org/en/list/1/documents/>
- Zeng, T. W. (2016). Blended biomass pellets as fuel for small scale combustion appliances: Influence on gaseous and total particulate matter emissions and applicability of fuel indices. Zeng, T., Weller, N., Pollex, A., & Lenz, V. (2016). Blended biomass pellets as fuel for small scale combustion appliances: In Fuel, 184, 689-700. .
- Zeng, T., Pollex, A., Weller, N., Lenz, V., & Nells, M. (2012). Effect of blending on slag formation in the bottom ash and pre-evaluation options. . Fuel, 108-116.