

Diseño y Construcción de un Prototipo de Caldera que Usa Como Combustible Cáscara de *Jatropha Curca* y Como Mecanismo de Transferencia Termosifones Bifásicos Cerrados.

Carolina Mira Hernández

Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, cmiraher@eafit.edu.co

Juan Esteban Ospina Berrío

Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, jospinab@eafit.edu.co

Julio César Betancourt Prisco

Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, jbetanc2@eafit.edu.co

Luis Santiago Paris Londoño

Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, lparis@eafit.edu.co

RESUMEN

Este artículo describe el desarrollo de un prototipo de caldera que utiliza como combustible cáscara de *Jatropha Curca* y como mecanismos de transferencia de calor, Termosifones Bifásicos Cerrados (TSBC). El desarrollo de este proyecto inicia con un proceso de búsqueda de información, a partir del cual se obtuvieron características y parámetros de diseño. Lo cual se tradujo en el desarrollo de un proceso de diseño físico y modelo de cálculo, a partir de cual se definieron las características físicas y técnicas del equipo. Además de la construcción de un modelo funcional del equipo, se realizaron algunas pruebas básicas de operación. A partir de los resultados del proyecto se establecieron conclusiones y algunas recomendaciones para trabajos futuros. También se evaluó el desempeño de la caldera utilizando gas propano como combustible.

Palabras claves: *Jatropha Curca*, Termosifones bifásicos, Caldera, Cáscara

ABSTRACT

This paper describes the development process of a boiler prototype that uses the shell from *Jatropha Curca* as fuel and two-phase closed thermosyphons (TPCT) for heat transfer. The project begins by collecting information, from which the characteristics and design and parameters are obtained. Then the physical design and sizing of the prototype was accomplished. Besides the construction of the prototype, some basic operation tests were also implemented. Conclusions and recommendations for future work were formulated from the project results. The performance of the boiler prototype was also assessed using propane gas as fuel.

Keywords: *Jatropha Curca*, two phase thermosyphons, boiler,

1. INTRODUCCIÓN

El término de caldera se aplica usualmente a un dispositivo para generar vapor para fuerza, procesos industriales o calefacción o para uso general, en pocas palabras, una caldera es un generador de vapor.

Las calderas son diseñadas para transmitir el calor procedente de una fuente externa, generalmente, la combustión de algún combustible, a un fluido contenido en una cámara dentro de la misma caldera. (SHIELD, 1982). En la cámara ocurre el cambio de fase del fluido y se eleva la presión dentro de la misma. La presión que debe alcanzar el vapor depende de la aplicación.

Las calderas han acompañado el desarrollo de la humanidad desde el siglo XVII hasta llegar a convertirse en equipos fundamentales en el desarrollo de la industria (Agua Market@, 2010). En este contexto, se han venido realizando desarrollos que contribuyen al mejoramiento de las características de este tipo de equipos. Además de dar cabida a otras fuentes de energía, como la biomasa.

El combustible sólido más común es el carbón, no obstante, se han desarrollado nuevas calderas que usan combustibles provenientes de la biomasa, es el caso de la Caldera de Biomasa KWB Easyfire(KWB@, 2005). Sin embargo, el aprovechamiento energético de la biomasa, actualmente, está muy por debajo del potencial disponible.

Un termosifón bifásico cerrado (TSBC) es un dispositivo con una alta capacidad de conducir calor, cuyo funcionamiento se basa en la evaporación y la condensación de un fluido. Consiste en un recipiente sellado dentro del cual se encuentra un fluido de trabajo. A través del evaporador se ingresa calor al sistema, lo que se traduce en una vaporización del fluido. El vapor viaja a una zona de menor temperatura (condensador), donde entrega el calor y se condensa. Para mantener el ciclo en funcionamiento es necesario que el fluido retorne al evaporador. Este transporte es asistido por la gravedad, por lo cual el TSBC debe estar en posición vertical con el evaporador en la parte inferior (FAGHRI, 1995) (PETERSON, 1994). Un esquema del funcionamiento de un TSBC se presenta en la figura mostrada a continuación.

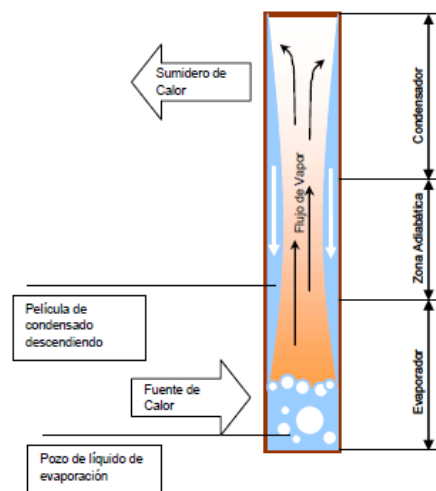


Ilustración 1. Termosifón Bifásico Cerrado (MIRA HERNÁNDEZ & PARIS LONDOÑO, 2011)

La *Jatropha Curca* es una planta perenne que crece rápidamente y produce semillas con alto contenido de aceite (32% a 35%), durante aproximadamente 50 años. El interés actual en la *Jatropha*, se debe principalmente a sus propiedades como cultivo energético, ya que de sus semillas se puede extraer aceite; el cual se usa para la producción de biodiesel. La torta residual del proceso de prensado, para la extracción de aceite, es un buen fertilizante y puede ser utilizado para la producción de biogás (VAN DER PUTTEN, FRANKEN, & DE JONGH, 2009).

Cabe anotar además que en investigaciones anteriores por parte del grupo de investigación IEXS (Ingeniería, Energía, Exergía y Sostenibilidad) de la Universidad EAFIT, se determinó de manera experimental el poder calorífico superior de la cáscara de *Jatropha Curca*, el cual es de aproximadamente 16300 kJ/kg. Este valor es relativamente cercano al poder calorífico superior de la madera. Lo cual se tradujo en un interés energético para el aprovechamiento de esta cáscara. En este orden de ideas el primer acercamiento a este objetivo fue la combustión directa de la cáscara. Todo esto toma más relevancia si se tiene en cuenta que la cáscara de *Jatropha Curca* representa aproximadamente el 37% de la masa total del grano.

El objeto de estudio de este proyecto es un prototipo de caldera de baja potencia alrededor de 1 kW que utilice como mecanismo de transferencia de calor los TSBC, y como combustible la cáscara de los granos de *Jatropha Curca*.

2. DISEÑO DEL PROTOTIPO

El prototipo de caldera se encuentra compuesto por una zona de combustión, un sistema para la transferencia de calor con TSBC y una cámara de vapor. En la zona de combustión hay un quemador comercial de gas propano y una rejilla, sobre la cual se alimenta la cáscara de *Jatropha Curca*.

Se encuentran además 19 tubos de calor que se encargan de transferir el calor generado en el hogar, donde se produce la combustión, hacia el agua que se encuentra en la cámara de vapor. Los tubos de calor se encuentran roscados a una placa, en la cual se asientan y ajustan cada uno de los tubos de calor. Además se encuentran unas perforaciones adicionales que permiten el ensamble con el hogar y la cámara de vapor de la caldera.

En cuanto a la cámara de vapor, se puede decir que es un recipiente cilíndrico fabricado en acero 1020. Este cilindro tiene una tapa en la parte superior, en la cual se instalan la válvula de seguridad, un manómetro y la válvula de suministro. Y en el extremo inferior una brida que tiene una serie de perforaciones que permiten el ensamble y desensamble de la cámara de vapor de la caldera.

Haciendo referencia a los TSBC se exponen las características mostradas en la siguiente tabla. Esta información corresponde a las características físicas y mecánicas más relevantes de la tubería de cobre.

Tabla 1. Características Físicas y Mecánicas Tubería de Cobre Tipo L (METALES EXTRUIDOS C,A)

| PARÁMETRO | VALOR | UNIDAD |
|---------------------------|--------------|----------------------|
| Material | Cobre Tipo L | NA |
| Diámetro Nominal | 12,70 | mm |
| Espesor | 1,02 | mm |
| Masa de Carga | 3,20 | gr de agua destilada |
| Longitud | 0,3 | m |
| Peso | 0,424 | kg/m |
| Resistencia a la Tracción | 4200 | kgf/cm ² |

La arquitectura final del proyecto, en manera esquemática y física es la que se muestra en la siguiente imagen.

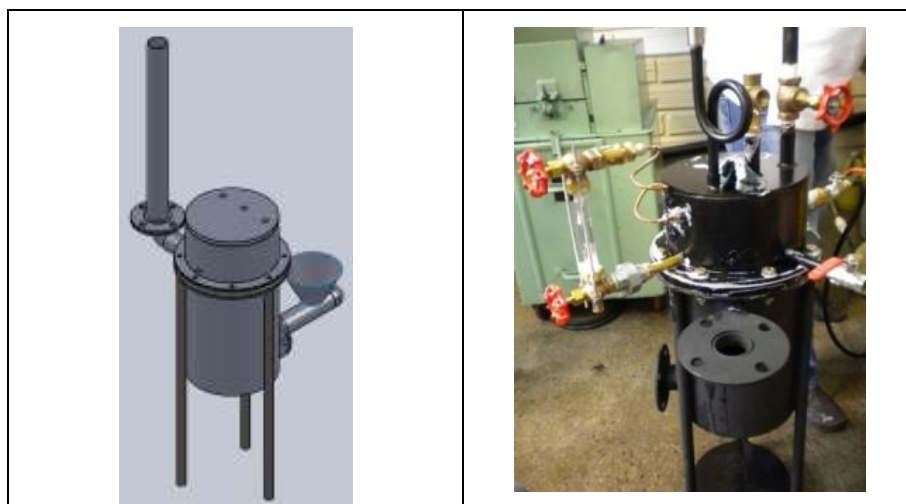


Ilustración 2. Prototipo de Caldera

Para llegar al modelo definitivo de diseño se realizaron cálculos de transferencia de calor, combustión y resistencia de materiales que contribuyeran al dimensionamiento geométrico y funcional del equipo. Se realizaron los cálculos que se presentan a continuación.

Los cálculos térmicos permitieron establecer, bajo condiciones ideales, las dimensiones del hogar, de la cámara de vapor y de los tubos de calor. Entre otros se realizaron cálculos del proceso de combustión; la cual se realizó a condiciones estequiométricas, y asumiendo que como fórmula química de la *Jatropha*, a la hora de realizar el balance químico, la misma de la madera. Se calculó además el volumen que debía tener la cámara de combustión y de la cámara de vapor.

Para realizar estos cálculos y un posterior análisis de los resultados es fundamental conocer información relevante de las propiedades de los combustibles utilizados en los ensayos, para nuestro caso gas propano y cáscara de *Jatropha Curca*. En la siguiente tabla se muestran algunos de los datos de cada uno de estos combustibles.

Tabla 2. Propiedades del Gas Propano y Cáscara de *Jatropha Curca*

| VARIABLE | VALORES | UNIDAD |
|----------------------------------|---------|-------------------|
| <i>GAS PROPANO</i> | | |
| Densidad | 1,58 | kg/m ³ |
| Poder Calorífico Inferior | 46340 | kJ/kg |
| <i>CÁSCARA DE JATROPHA CURCA</i> | | |
| Densidad | 264,87 | kg/m ³ |
| Poder Calorífico Superior | 16300 | kJ/kg |

Además se realizaron los cálculos mecánicos, lo cuales contemplaron, básicamente, los tubos de calor, la placa de los tubos y la cámara de vapor. Y el valor principal que se determinó el esfuerzo máximo soportado bajo la acción de la presión de operación.

En el caso de los tubos de calor, la presión máxima de trabajo se encuentra determinando la temperatura del vapor saturado y teniendo en cuenta la geometría seleccionada y algunas características mecánicas del material.

Para determinar los esfuerzos soportados internamente en la cámara de vapor y de la placa en la cual se ensamblan los tubos de calor se hicieron simulaciones mecánicas teniendo en cuenta las propiedades físicas del material (AISI-SAE 1020) y la presión de diseño, la cual se estableció de 150 Psi. A continuación se presentan algunas de las imágenes obtenidas en el proceso de simulación.

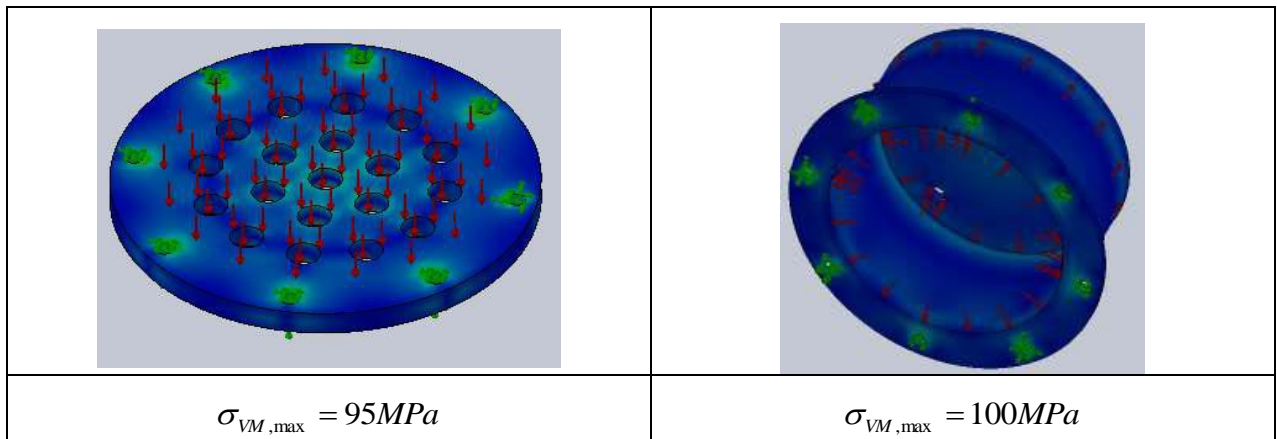


Ilustración 3. Distribución de Esfuerzos en Placa de Tubos de Calor y la Cámara de Vapor.

Del proceso de cálculo se obtuvieron los resultados que se muestran en la siguiente tabla. Estos datos corresponden a los valores hallados de manera teórica, y dan cuenta de parámetros de diseño del equipo.

Tabla 3. Resultados de Proceso de Cálculos

| PARÁMETRO | VALOR | UNIDAD |
|--|----------|------------------------------|
| Potencia Útil (Pu) | 1 | kW |
| Número de Tubos de Calor | 19 | Unidades |
| Temperatura Superficial del Agua en la Cámara de Vapor | 120 | C |
| Temperatura de los Gases de Combustión | 300 | C |
| Flujo Másico de Combustible | 0,403 | KJ/h |
| Relación Teórica Aire-Combustible | 5,09 | kg de Aire/kg de Combustible |
| Relación Real Aire-Combustible | 6,11 | kg de Aire/kg de Combustible |
| Flujo Volumétrico de Aire | 1,21 | c.f.m |
| Volumen del Hogar | 7,05E-03 | m ³ |
| Área del Hogar | 3,35E-02 | m ² |
| Altura del Hogar | 0,21 | m |
| Volumen Cámara de Vapor | 1,66E-03 | m ³ |
| Altura Cámara de Vapor | 4,94E-02 | m |
| Calor Transferido por Radiación | 716,95 | W |
| Calor Transferido por un Tubo de Calor | 14,9 | W |

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Desempeño térmico de termosifón bifásico cerrado.

Esta prueba mide la resistencia equivalente del TSBC, es decir, oposición del termosifón para transmitir el calor del evaporador al condensador. Para realizar esta prueba se hizo uso, entre otros equipos, de un PLC, una fuente eléctrica, termopares, bomba centrífuga, intercambiador de calor y control de temperatura.

Para realizar este ensayo se instalaron 5 termopares distribuidos de la siguiente manera; dos de ellas en la zona de condensación y tres en la zona de evaporación. Después se introdujo el condensador en el intercambiador de calor, para proceder a simular con la resistencia eléctrica los gases de combustión. Este ensayo fue realizado a 40°C y 60°C, y bajo estas condiciones se registraron los datos de temperatura por medio del PLC. Además de los datos de temperatura se tomaron datos de tiempo, voltajes, corrientes eléctricas, entre otras.

A continuación, se muestra un esquema del montaje realizado para este ensayo y un esquema de distribución de los termopares en el TSBC.

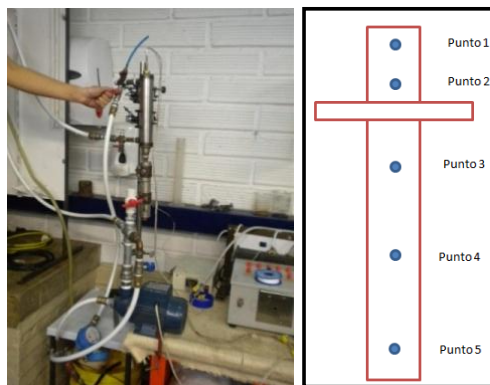


Ilustración 4. Montaje de ensayos de desempeño térmico de termosifón cerrado

3.2. Desempeño Térmico de la caldera

La evaluación del desempeño térmico básico de la caldera es tal vez el ensayo más importante para conocer el funcionamiento en condiciones normales del equipo, y dar cuenta de las características del producto final entregado por el equipo. La prueba permite conocer la calidad del vapor, la eficiencia del equipo, la tasa de generación de vapor y la potencia útil del equipo

Para esta etapa de los ensayos se realizaron pruebas con dos combustibles; gas propano y cáscara de Jatropha Curca. La primera prueba se hizo usando en todo el proceso de calentamiento el gas propano (PRUEBA 1), es decir, el gas propano estuvo en las dos etapas de operación de la caldera. En la primera se aumentaba la temperatura para lograr el cambio de fase y alcanzar la presión de generación de vapor. En la segunda etapa se generaba vapor a una tasa relativamente constante.

En la segunda prueba se usaron dos combustibles, gas propano y cáscara de Jatropha Curca (PRUEBA 2). El primero se usó para lograr el calentamiento del agua hasta antes que ocurriera el cambio de fase, y el segundo se usó para la etapa de generación de vapor. Cabe anotar que en la etapa que se usó como combustible la cáscara de

Jatropha Curca, se hizo necesario la inclusión de una fuente externa de aire caliente (Secador Industrial) para mejorar el desempeño del proceso de combustión.

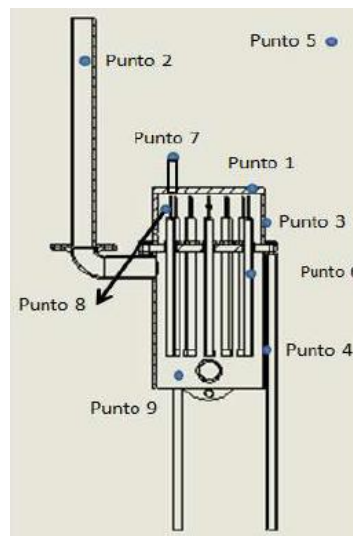


Ilustración 5 Ensayo de desempeño Térmico de la Caldera

Para este ensayo se hizo uso de diferente equipos, entre los cuales se encontraban; un PLC, cilindros de gas propano, un medidor de flujo de gas, manómetros, un quemador y una bomba calorimétrica.

En resumen el procedimiento de esta prueba consistió en lo siguiente: Se ubicaron termopares en la superficie de la cámara de vapor, al interior de la salida de la chimenea, los aislamientos térmicos; tanto en la cámara de vapor como en la de combustión, el ambiente, la superficie de los tubos de calor, el agua dentro de la caldera y en la superficie de la cámara de combustión. Esta distribución de termopares se puede ver de manera esquemática en la siguiente imagen.

Tabla 4. Ubicación de Termopares Para Ensayo de Desempeño Térmico



Después de verificar que cada una de las termocuplas estuvieran funcionando bien, se procedió a cargar la caldera con 2500 gramos de agua destilada. Acto seguido se verifica que estén cerradas las válvulas correspondientes se inicia el proceso de combustión y el registro de datos de temperatura, presión del combustible, cantidad de combustible consumido, masa de condensados, presión al interior de la caldera y tiempo de cada prueba. Todo esto se realiza hasta que por un período de tiempo considerable la presión en el manómetro de la cámara de vapor esté estable.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

Del ensayo de desempeño térmico del TSBC se obtuvieron los resultados que se muestran en la gráfica mostrada a continuación. En esta gráfica la pendiente representa la resistencia del TSBC a pasar el calor de la zona del evaporador al condensador, en ese sentido se puede decir que la resistencia equivalente promedio del TSBC teniendo en cuenta los datos obtenidos bajo ambas temperaturas, es de **0.1385 °C/W** aproximadamente.

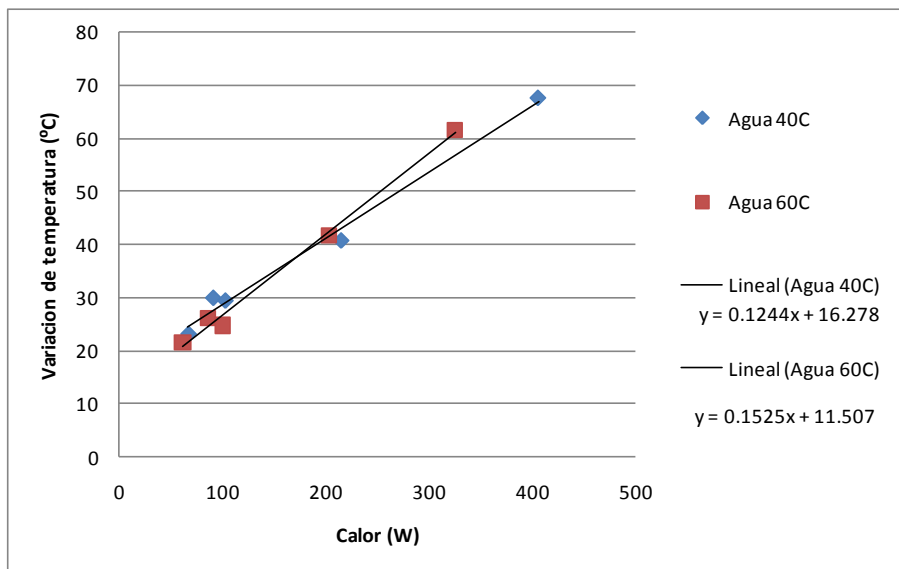
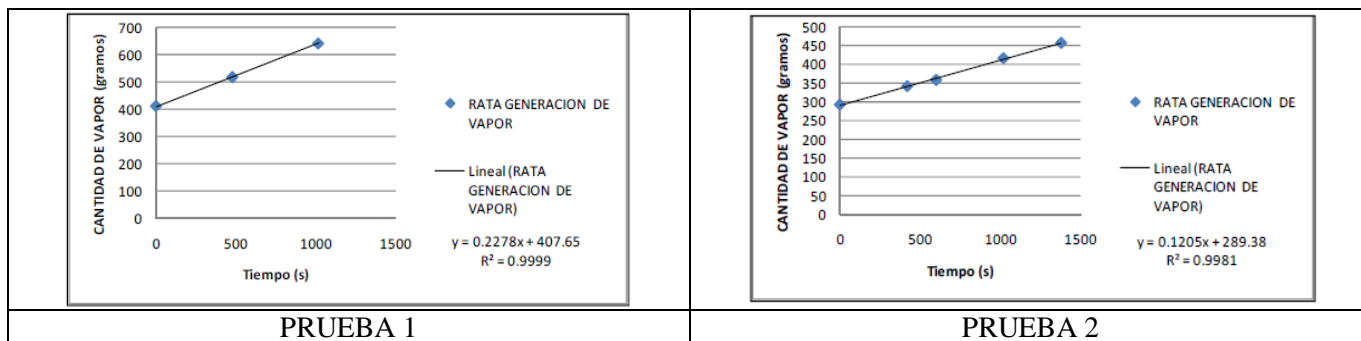


Ilustración 6. Resultados Ensayo de Desempeño Térmico de TSBC

Después de realizar las pruebas de operación de la caldera con los dos combustibles (gas propano y cáscara de Jatropha) se obtuvieron los siguientes resultados que dan muestra del comportamiento del equipo. Uno de los datos más relevantes es la tasa de generación del equipo, a continuación se puede ver las gráficas que muestran el comportamiento de esta variable en cada una de las pruebas. Como se puede ver en la prueba 1 la tasa de generación es aproximadamente 0.2278 g/s (820.8 g/h), mientras que en la prueba 2 es de 0.1205 g/s (433.8 g/h).

Tabla 5. Tasa de Generación de Vapor



A continuación se puede ver una tabla con las principales características de operación obtenidas en las dos pruebas.

Tabla 6. Resumen de Resultados.

| PARÁMETRO | VALOR | UNIDAD |
|--|--------|--------|
| Calidad de Vapor | 98,39 | % |
| Temperatura Promedio en la Cámara de Vapor | 118,10 | °C |
| PRUEBA 1 | | |
| Potencia Útil | 502,19 | W |
| Eficiencia | 50 | % |
| PRUEBA 2 | | |
| Potencia Útil | 281,46 | W |
| Eficiencia | 19,13 | % |

CONCLUSIONES

Se diseñó, fabricó y probó un prototipo de caldera de baja potencia que utiliza como combustible cáscara de *Jatropha Curca*, y cuyo mecanismo de transferencia de calor son termosifones bifásicos cerrados. Sin embargo, este equipo puede utilizar distintos tipos de combustibles e inclusive otras fuentes de energía para su operación. El desempeño del prototipo de caldera es aceptable y se logró la generación de vapor con la cáscara de *Jatropha Curca* como combustible.

La *Jatropha* es una planta que produce granos del cual se pueden obtener dos subproductos, el albumen y la cáscara. El primero hoy en día tiene aplicaciones bastante específicas como lo son es producción de aceite para biocombustibles, y el segundo puede ser usado como un combustible sólido. La decisión de cáscara de *Jatropha* como combustible para la *Jatropha* se basa, principalmente, en dos argumentos; el primero es la capacidad calorífica disponible en este recurso, y el segundo es el aprovechamiento de un subproducto del ciclo productivo de este grano, que actualmente no se le da ningún valor energético.

Los cálculos mecánicos permitieron determinar que el equipo puede soportar presiones de 150psi en la cámara de vapor con un factor de seguridad de 3.6. Además, de los cálculos térmicos se estableció que las pérdidas de calor estimadas por los aislamientos son menores al 5%.

La combustión de un combustible sólido presenta ciertas exigencias que deben ser consideradas en el diseño de los hogares. Se debe prestar especial atención al suministro de aire para garantizar una combustión completa. Además, se debe procurar mantener altas temperaturas en el hogar para sostener la combustión. Estos aspectos generaron ciertos inconvenientes en el desarrollo del presente proyecto, ya que para el combustible utilizado es difícil sostener la combustión y se requiere ventilación de aire permanente. Además, es necesario un sistema mecánico que garantice una alimentación continua de la cáscara.

REFERENCIAS

- Agua Market@. (2010). *www.aguamarkett.com*. Recuperado el 12 de 02 de 2010, de <http://www.aguamarket.com/diccionario/terminos.asp?Id=3050&termino=Caldera>
- COLBIO@. (2008). *Colombiana de Biocombustibles*. Recuperado el Marzo de 2010, de <http://www.colbio.com/pinon2.htm>
- FAGHRI, A. (1995). *Heat Pipe Science and Technology*. New York: Taylor ans Francis.
- KWB@. (2005). *KWB - Biomass Heating Systems*. Recuperado el Marzo de 2010

- METALES EXTRUIDOS C,A. (s.f.). *http://www.metalex.com.ve*. Recuperado el 22 de 06 de 2010, de http://www.metalex.com.ve/index.php?option=com_content&view=article&id=60&Itemid=65
- MIRA HERNÁNDEZ, C., & PARIS LONDOÑO, L. S. (2011). Propuesta de Obtención de Curvas de Operación de Termosifones Bifásicos Cerrados. *Ninth LACCEI Latin American and Caribbean Conference*, 9.
- PETERSON, G. (1994). *An Introduction to Heat Pipes: Modeling, Testing, and Applications* (Vol. 2). New York: Wiley.
- SHIELD, C. (1982). *Calderas, Tipos, Características y su Funciones*. Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill.
- VAN DER PUTTEN, E., FRANKEN, Y. J., & DE JONGH, J. (2009). Datos generales de la Jatropha. En F. F. (FACT), *Manual de Jatropha* (pág. 230). Amsterdam, Holanda.

Autorización y Renuncia

Los autores autorizan a LACCEI para publicar el escrito en las memorias de la conferencia. LACCEI o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que esta expresado en el escrito