

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE CALDERA QUE USA
COMO COMBUSTIBLE CÁSCARA DE JATROPHA CURCA

JULIO CÉSAR BETANCOURT PRISCO
JUAN ESTEBAN OSPINA BERRÍO

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
MEDELLÍN
2010

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE CALDERA QUE USA
COMO COMBUSTIBLE CÁSCARA DE JATROPHA CURCA

JULIO CÉSAR BETANCOURT PRISCO
JUAN ESTEBAN OSPINA BERRÍO

PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO

ASESOR:
CAROLINA MIRA HERNÁNDEZ
INGENIERA MECÁNICA

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
MEDELLÍN
2010

DEDICATORIA

El desarrollo de este proyecto está dedicado a todas aquellas personas que durante toda nuestra vida han contribuido a nuestra formación personal y académica.

Por supuesto, este proyecto está muy dedicado a nuestros padres y familiares que con sus enseñanzas y su constancia han logrado educarnos para convertirnos en las personas que hoy en día somos.

AGRADECIMIENTOS

Un especial agradecimiento a la ingeniera Carolina Mira Hernández, y al ingeniero Luis Santiago Paris que con sus conocimientos técnicos en muchas de las áreas de la ingeniería mecánica guiaron el desarrollo de nuestro proyecto para llevarlo a feliz término.

Un agradecimiento muy grande para todas aquellas personas que con su participación directa o indirecta ayudaron a que la idea de nuestro proyecto se materializara.

Finalmente, queremos darle un sincero a agradecimiento a todos nuestros familiares y amigos que estuvieron al lado de nosotros durante el desarrollo del proyecto, y por supuesto durante nuestra formación como ingenieros mecánicos.

CONTENIDO

| | pág. |
|--|------|
| INTRODUCCION | 14 |
| 1 OBJETIVOS | 17 |
| 1.1 GENERAL | 17 |
| 1.2 ESPECIFICOS | 17 |
| 1.2.1 OBJETIVO 1 | 17 |
| 1.2.2 OBJETIVO 2 | 17 |
| 1.2.3 OBJETIVO 3 | 17 |
| 1.2.4 OBJETIVO 4 | 17 |
| 1.2.5 OBJETIVO 5 | 17 |
| 2 METODOLOGIA | 19 |
| 3 ALCANCE | 20 |
| 4 ESTADO DEL ARTE | 21 |
| 4.1 CALDERAS | 21 |
| 4.1.1 Clasificación de calderas | 21 |
| 4.1.2 Partes y accesorios de una caldera | 24 |
| 4.2 CALDERAS DE BIOMASA | 26 |
| 4.3 BIOMASA | 30 |
| 4.4 TUBOS DE CALOR | 34 |
| 4.5 JATROPHA | 36 |
| 5 DISEÑO CALDERA | 39 |
| 5.1 CONFIGURACION BASICA DEL EQUIPO | 39 |
| 5.1.1 Proceso de diseño | 40 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.1.2 | Portadores de funciones | 45 |
| 5.1.3 | Arquitectura final del producto | 49 |
| 5.2 | MODELO DE CÁLCULO | 50 |
| 5.2.1 | Cálculos térmicos | 50 |
| 5.2.2 | Poder calorífico del combustible | 62 |
| 5.2.3 | Cálculos mecánicos | 64 |
| 5.2.4 | Tubería de cobre | 64 |
| 5.2.5 | Análisis de esfuerzos en la placa de los tubos | 66 |
| 5.2.6 | Análisis de esfuerzos en la cámara de vapor | 68 |
| 5.3 | DISEÑO DE DETALLE | 70 |
| 5.3.1 | Empaque Cámara de Vapor | 71 |
| 5.3.2 | Datos de entrada | 72 |
| 5.3.3 | Resultados | 73 |
| 6 | CONSTRUCCION | 74 |
| 6.1 | PROVEEDORES Y LISTA DE MATERIALES | 74 |
| 6.2 | MANUFACTURA TUBOS DE CALOR | 76 |
| 6.3 | COSTOS FINALES DEL PROYECTO | 80 |
| 7 | PRUEBAS DE OPERACIÓN BÁSICA | 82 |
| 7.1 | PRUEBAS DE ESTANQUEDAD | 82 |
| 7.2 | DESEMPEÑO TERMICO DE UN TUBO DE CALOR | 83 |
| 7.2.1 | Elementos necesarios | 84 |
| 7.2.2 | Procedimiento | 85 |
| 7.2.3 | Realización de la prueba | 86 |
| 7.2.4 | Resultados | 88 |
| 7.3 | DESEMPEÑO TÉRMICO DE LA CALDERA | 89 |
| 7.3.1 | Elementos necesarios | 89 |

| | | |
|-------|----------------------|-----|
| 7.3.2 | Procedimiento | 89 |
| 7.3.3 | Adquisición de datos | 91 |
| 7.3.4 | Resultados | 92 |
| 8 | CONCLUSIONES | 111 |
| 9 | RECOMENDACIONES | 115 |
| 10 | BIBLIOGRAFIA | 117 |
| 11 | ANEXOS | 122 |

LISTA DE FIGURAS

| | pág. |
|---|------|
| Ilustración 1. Árbol de objetivos | 18 |
| Ilustración 2. Caldera Piro tubular | 22 |
| Ilustración 3. Caldera de Biomasa KWB Easy Fire | 23 |
| Ilustración 4. Caldera de llama invertida | 28 |
| Ilustración 5. Caldera de astillas | 29 |
| Ilustración 6. Funcionamiento de un tubo de calor asistido por gravedad | 35 |
| Ilustración 7. Caldera piro tubular | 39 |
| Ilustración 8. Convenciones estructura funcional | 43 |
| Ilustración 9. Caja negra | 43 |
| Ilustración 10. Estructura funcional | 44 |
| Ilustración 11. Portadores de funciones | 45 |
| Ilustración 12. Control de nivel | 48 |
| Ilustración 13. Indicador de nivel de agua | 48 |
| Ilustración 14. Válvulas de alivio de presión | 49 |
| Ilustración 15. Modelo del prototipo de caldera | 50 |
| Ilustración 16. Resistencias equivalentes alrededor de la cámara de vapor | 59 |
| Ilustración 17. Propiedades del aislamiento térmico | 60 |
| Ilustración 18. Resistencias equivalentes por la tapa de la cámara de vapor | 61 |
| Ilustración 19. Variación Temperatura vs Tiempo | 63 |
| Ilustración 20. Asignación de restricciones y malla | 67 |
| Ilustración 21. Resultados de la simulación | 68 |
| Ilustración 22. Restricciones y generación de la malla cámara de vapor | 69 |
| Ilustración 23. Resultados de la simulación | 70 |
| Ilustración 24. Propiedades del Asbesto | 71 |
| Ilustración 25. Diagrama de flujo manufactura de tubos de calor | 76 |
| Ilustración 26. Corte y limpieza de los tubos de calor | 77 |

| | |
|--|-----|
| Ilustración 27. Lavado de los tubos de calor | 78 |
| Ilustración 28. Tubo de calor ensamblado | 78 |
| Ilustración 29. Estación de carga | 79 |
| Ilustración 30. Ensamble con empaque de asbesto | 82 |
| Ilustración 31. Propiedades del TEFSEAL | 83 |
| Ilustración 32. Pruebas de estanqueidad | 83 |
| Ilustración 33. Ubicación de las termocuplas en el tubo de calor | 85 |
| Ilustración 34. Montaje prueba | 86 |
| Ilustración 35. Resistencia equivalente de un tubo de calor | 88 |
| Ilustración 36. Ubicación de las termocuplas en el prototipo | 90 |
| Ilustración 37. Calorímetro | 92 |
| Ilustración 38. Diagrama P-h | 93 |
| Ilustración 39. Balance de energía en la cámara de vapor | 95 |
| Ilustración 40. Variación de la temperatura vs tiempo sin cambio de fase | 97 |
| Ilustración 41. Condensador | 99 |
| Ilustración 42. Rata de generación de vapor con gas propano | 99 |
| Ilustración 43. Rata de generación de vapor con cáscara de Jatropha | 103 |
| Ilustración 44. Secador industrial | 107 |
| Ilustración 45. Combustión cáscara de Jatropha | 110 |

LISTA DE ECUACIONES

| | pág. |
|---|------|
| Ecuación 1. Flujo másico de combustible | 51 |
| Ecuación 2. Flujo másico de aire | 52 |
| Ecuación 3. Flujo másico de los gases de combustión | 53 |
| Ecuación 4. Volumen cámara de combustión | 53 |
| Ecuación 5. Volumen cámara de vapor | 54 |
| Ecuación 6. Calor transferido por radiación | 55 |
| Ecuación 7. Calor transferido por convección | 57 |
| Ecuación 8. Primera ley de termodinámica | 92 |

LISTA DE TABLAS

| | pág. |
|--|------|
| Tabla 1. Densidad energética de algunas especies de árboles | 30 |
| Tabla 2. Poder calorífico de algunos combustibles y de Biomasa | 32 |
| Tabla 3. Especificaciones de diseño | 42 |
| Tabla 4. Poder calorífico Jatropha | 63 |
| Tabla 5. Propiedades placa de los tubos | 67 |
| Tabla 6. Propiedades cilindro cámara de vapor | 69 |
| Tabla 7. Variables de entrada | 72 |
| Tabla 8. Resultados | 73 |
| Tabla 9. Componentes comerciales y materia prima | 74 |
| Tabla 10. Resumen carga de los tubos | 79 |
| Tabla 11. Costos totales | 80 |
| Tabla 12. Resultados obtenidos | 94 |
| Tabla 13. Gas propano consumido | 97 |
| Tabla 14. Propiedades del gas propano | 97 |
| Tabla 15. Resultados pérdidas de calor y eficiencia | 98 |
| Tabla 16. Consumo de gas en cambio de fase | 102 |
| Tabla 17. Pérdidas de calor y eficiencia en cambio de fase | 103 |
| Tabla 18. Valores de masas obtenidas con Jatropha | 106 |
| Tabla 19. Temperatura promedio cámara de vapor | 107 |
| Tabla 20. Datos energéticos del combustible | 107 |
| Tabla 21. Desempeño de la caldera con cáscara de Jatropha | 108 |
| Tabla 22. Análisis de gases (Gas Propano) | 109 |
| Tabla 23. Análisis de gases (Cáscara de Jatropha) | 109 |

INTRODUCCION

Las calderas, son recipientes que operan a cierta presión con el fin de transferir calor de la combustión de un combustible sólido, líquido o gaseoso, a un fluido, comúnmente el agua, para conseguir un cambio de fase. Los combustibles que más se usan en esta aplicación son los sólidos, líquidos o gaseosos. Sin embargo, también se utilizan gases calientes de procesos industriales, resistencias eléctricas, entre otros (ACERCAR@, 2003).

Las calderas han acompañado el desarrollo de la humanidad desde el siglo XVII, pero tomaron más fuerza a partir de los mejoramientos desarrollados por James Watt. Hasta llegar a convertirse en equipos fundamentales en el desarrollo de la industria y apalancar la revolución industrial (Agua Market@, 2010). En este contexto, se han venido realizando desarrollos que contribuyen al mejoramiento de las características de este tipo de equipos, lo cual ocasiona que no pierdan vigencia y continúen siendo factores tangibles e importantes en nuestra industria.

El vapor, como estado gaseoso del agua, tiene múltiples aplicaciones industriales y residenciales porque sus propiedades energéticas son aprovechadas para la generación de energía y en sistemas de calentamiento de hogares (TLV@, 2010). Por lo anterior, el proyecto tiene relevancia como solución a la problemática energética que se presenta en zonas no interconectadas del país.

El combustible sólido más común es el carbón, no obstante, se han desarrollado nuevas calderas que usan combustibles como la biomasa, es el caso de la Caldera de Biomasa KWB Easy fire (KWB@, 2005). La biomasa es una materia orgánica que se origina en un proceso biológico, espontáneo o provocado, y que se utiliza como fuente de energía (RAE@, 2008).

Actualmente, la contribución de la biomasa a la necesidad de energía está muy por debajo del potencial disponible, y se produce fundamentalmente por la utilización de leña para quemar en chimeneas y estufas, a menudo obsoletas y poco eficaces. No obstante, las tecnologías para la utilización de combustibles vegetales han experimentado un gran desarrollo en los últimos años (CECU@, 2010).

La *Jatropha Curca* es una planta no tóxica perenne, resistente a la sequía que se desarrolla bien en suelos de escasa fertilidad. Esta planta crece rápidamente y produce semillas con alto contenido de aceite (32% a 35%) durante muchos años (COLBIO@, 2008). El aceite de las semillas de esta planta puede usarse para elaborar biodiesel, el subproducto de la extracción puede usarse como fertilizante orgánico. Se obtienen semillas para extraer su aceite, dos o cinco años después de la plantación, dependiendo de la cantidad lluvia o riego y la calidad del suelo (BIODISOL@, 2010).

La eficiencia de producción de biodiesel a partir del grano de *Jatropha* se ve afectada por la presencia de cáscara en el proceso de extracción de aceite (Palacio, 2009), lo cual convierte en requisito incluir un proceso previo de descascarado del grano. Las cáscaras que cubren el piñón y el grano no tienen un uso específico en la actualidad, y actualmente sólo ocasiona pérdidas en el proceso de producción de aceite para biodiesel debido a la porosidad y abrasión propia de la cáscara.

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 tubos de calor, y como combustible la cáscara de los granos de *Jatropha Curca*. Así se aprovecha un subproducto ofrecido por esta planta para la producción de energía, mediante el proceso de combustión.

La caldera debe cumplir con requisitos de seguridad necesarios para este tipo de equipos con el fin de garantizar una operación confiable. Además es importante garantizar cierto grado de modularidad que permita realizar más fácilmente labores de mantenimiento.

En el desarrollo de este proyecto se involucran diversas áreas de la Ingeniería Mecánica tales como Mecánica de Fluidos, Termodinámica, Transferencia de Calor como también la combinación de conceptos de Dibujo Técnico, Procesos de Manufactura, entre otras.

1 OBJETIVOS

1.1 GENERAL

Diseñar y construir un prototipo de caldera de baja potencia que use como combustible cáscara de *Jatropha curca*.

1.2 ESPECIFICOS

1.2.1 OBJETIVO 1

Hacer una revisión bibliográfica para conocer el estado del arte de las calderas de combustibles sólidos, de las propiedades físicas de los residuos de la *Jatropha curca* y la tecnología de los tubos de calor. Nivel 1 – Conocer.

1.2.2 OBJETIVO 2

Desarrollar el proceso de diseño de un prototipo de caldera, del cual se obtiene la memoria de cálculo y los planos técnicos del equipo. Nivel 2 – Comprender.

1.2.3 OBJETIVO 3

Fabricar un prototipo de la caldera a partir de la fase de diseño. Nivel 3 – Aplicar.

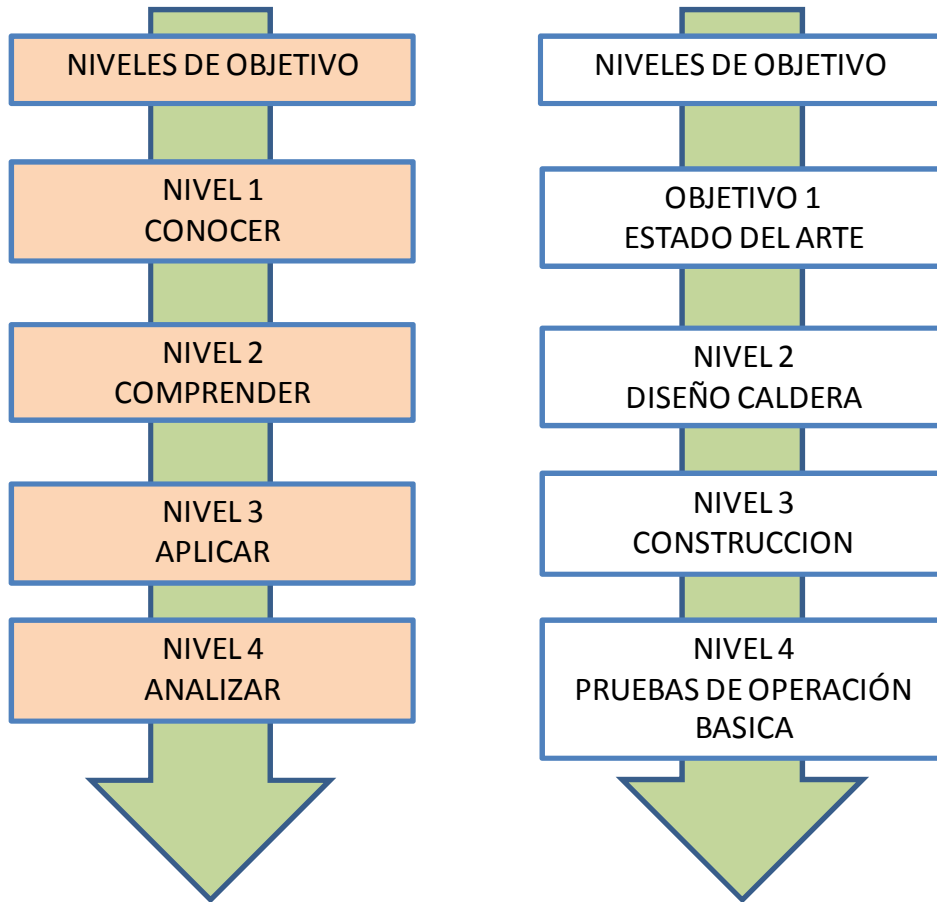
1.2.4 OBJETIVO 4

Realizar pruebas de operación básica. Nivel 4 – Analizar.

1.2.5 OBJETIVO 5

Formular conclusiones y recomendaciones para trabajo futuro.

Ilustración 1. Árbol de objetivos



2 METODOLOGIA

La metodología consiste en recopilar información en documentos y textos, con el fin de analizarla, estudiarla y generar el modelo de cálculo para el posterior diseño y construcción del prototipo de caldera.

El proyecto se desarrolla en un ambiente investigativo aplicado, con información presente en revistas científicas reconocidas nacional e internacionalmente, libros, artículos y posibles visitas a empresas con experiencia en el desarrollo de estos equipos.

El proyecto genera planos constructivos, el equipo y pruebas de operación básicas, el proyecto no genera *software* ni aplicaciones, solo el desarrollo descrito anteriormente.

3 ALCANCE

Los entregables del proyecto comprenden el diseño, la manufactura y la prueba de un prototipo de caldera. En la fase de diseño se lleva a cabo un recolección de información de estos equipos, se realizan cálculos, se dimensiona adecuadamente el equipo y se seleccionan los materiales para cumplir con las especificaciones de seguridad para estos equipos. Una vez los planos constructivos estén listos, se manufacturan las partes del equipo, se ensambla el prototipo y se evalúa el funcionamiento del equipo.

Luego del proceso de construcción y ensamble se realizan pruebas básicas de operación del prototipo.

4 ESTADO DEL ARTE

4.1 CALDERAS

El término caldera se refiere a un equipo de generación de vapor para fuerza, procesos industriales o calefacción. El diseño de generadores de vapor está estipulado para transferir el calor procedente de la combustión de un combustible a un líquido contenido dentro de este equipo.

El líquido contenido en el equipo está sujeto a ciertas condiciones de seguridad. El vapor o agua caliente debe ser suministrado bajo ciertas condiciones requeridas de temperatura, presión y calidad (Shield, 1982).

4.1.1 Clasificación de calderas

El principal criterio para clasificar las calderas es por el contenido de los tubos, pirotubular o acuotubular, o por lo menos es una de la clasificación más común en la industria (Sanz@, et al., 2000), sin embargo, las calderas pueden clasificarse basándose en algunas de las siguientes características: (1) uso, (2) presión, (3) materiales de que están construidas, (4) tamaño, (5) contenido de los tubos, (6) forma y posición de los tubos, (7) sistema del fogón, (8) fuente de calor, (9) clase de combustible, (10) fluido utilizado, (11) sistema de circulación, (12) posición del hogar, (13) tipo del fogón, (14) forma general, (15) nombre registrado del fabricante y (16) propiedades especiales (Shield, 1982).

El entregable del proyecto tiene que ver con el diseño y fabricación de una caldera de baja potencia que use como combustible cáscara de *Jatropha*, por tal razón, la

revisión bibliográfica incluye tanto la clasificación de calderas por la clase de combustible como por el contenido de los tubos.

4.1.1.1 Contenido de los tubos

La clasificación de calderas por el contenido de los tubos comprende básicamente dos tipos:

- Piro tubulares o de tubos de humo: en estas los gases de la combustión circulan por los tubos, los cuales están rodeados de agua por el exterior. Normalmente, los tubos se sumergen en el fluido para evitar que nunca estén secos, estos son de un solo paso, y la transferencia de calor en ellos es por convección procedente de los gases de la combustión, pueden estar dispuestos de manera horizontal o vertical (UNIVERSITAT JAUME I@, 2010).

Ilustración 2. Caldera Piro tubular



(La-llave@, 2009)

- Acuotubulares o de tubos de agua: el agua circula por los tubos, y los gases de la combustión viajan por la parte exterior de los tubos transfiriendo el calor liberado por el combustible.

Existen tres disposiciones diferentes:

- Tubos verticales y circulación natural: los gases de la combustión circulan horizontalmente a través del banco de tubos de la caldera.
- Tubos horizontales y circulación forzada: Los gases de la combustión circulan verticalmente a través de los tubos del generador, economizador y recalentador.
- Tubos inclinados y circulación natural: los gases de la combustión circulan en sentido vertical ascendente a través del banco de tubos del generador (UNIVERSITAT JAUME I@, 2010).

4.1.1.2 Clase de combustible

El combustible es un factor que se debe tener en cuenta en el diseño de calderas porque es el elemento que libera la energía necesaria para que el agua cambie de fase, de allí se deriva otra manera de clasificarlas.

Los combustibles que se usan frecuentemente en las calderas son: el carbón, bituminoso, antracita, carbón pulverizado, gas, petróleo, leña y bagazos u otros productos de desperdicio (Shield, 1982), actualmente, se está usando biomasa y biocombustibles.

Ilustración 3. Caldera de Biomasa KWB Easy Fire



(KWB@, 2005)

4.1.2 Partes y accesorios de una caldera

Los generadores de vapor son equipos que están compuestos de muchas partes y accesorios necesarios para una operación confiable y eficiente de la caldera, cabe destacar tres sistemas principalmente:

Sistema de combustión: Los accesorios y partes que componen el sistema de combustión son sumamente importante en las calderas, en ellos se presenta todo el proceso de combustión del combustible en equipo, los elementos más importantes son:

- Quemador: Cumplen la función de mezclar el combustible y el aire en la proporción correcta para obtener una combustión completa, y además, determinar la forma y la dirección de la llama (CONUEE@, 2007). Los quemadores para combustibles gaseosos o líquidos son los atmosféricos y mecánicos respectivamente, mientras que los sólidos se queman sobre parrilla con un tratamiento previo (San José@, 2001).
- Hogar: El hogar o cámara de combustión es lugar donde se produce la combustión del combustible, la forma y su tamaño es netamente dependiente del combustible utilizado. El correcto diseño de este espacio garantiza la no producción de humo y hollín (Ceballos, 1990). Los hogares pueden ser para carga manual, carga mecánica, para gas o para carbón pulverizado (THIBAUT, 1974).
- Chimenea: Es el ducto por donde son evacuados los gases de la combustión del equipo.
- Tubos o *fluxes*: Dependiendo del tipo de caldera, son elementos muy necesarios para que se transfiera la energía liberada por el combustible

al fluido, evitando el contacto directo entre ambos.

Sistema de control: Los accesorios del control son muy importantes para evitar accidentes en los generadores de vapor. Algunos elementos son:

- Indicadores de nivel: Accesorios que permiten la visualización de los niveles de fluido en el tanque.
- Fococeldas: Accesorio para control de la llama.
- Presostatos: Accesorios que permiten controlar presiones en el equipo.
- Termostatos: Accesorios que permiten controlar las temperaturas en el equipo.

Sistema de alimentación de agua: Este sistema es de gran importancia porque asegura que el agua que va pasar a un estado gaseoso es la ideal para evitar pérdidas de eficiencia, además, que mantienen un flujo constante de agua al equipo para evitar que este opere en vacío. Algunos de los accesorios que componen este sistema son:

- Equipos de tratamiento: Equipos usados para retirar contaminantes del agua.
- Bomba de inyección: Accesorio usado para mantener el nivel de agua en el punto necesario por la caldera (ACERCAR@, 2007).

4.2 CALDERAS DE BIOMASA

Una caldera es un recipiente que sirve para calentar agua. Básicamente una caldera está compuesta por un hogar, donde se produce la combustión y un intercambiador de calor, donde el agua se calienta. Además, debe tener un sistema para evacuar los gases procedentes de la combustión (Textos Científicos@, 2010).

El agua puede calentarse a diferentes temperaturas. En las calderas normales no se suelen sobrepasar los 90°C. En calderas más grandes, se llega hasta los 140°C, manteniendo la presión alta en las conducciones para que no llegue a evaporarse (agua sobrecalentada). Existen también calderas de vapor, en las que el agua se lleva a la evaporación y se distribuye el vapor a los elementos terminales. Existen también calderas en que el agua se calienta a temperaturas inferiores a 70°C y que consiguen elevados rendimientos (BIODISOL@, 2010). Los combustibles empleados pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos, lo cual determina la forma de las calderas.

Las calderas que funcionan con combustible sólido, el cual puede ser biomasa, tienen en el hogar dos compartimentos superpuestos. En el superior, brasero, se coloca el combustible sobre una parrilla. El inferior, cenicero, recibe las cenizas del combustible. Por la puerta de éste entra el aire necesario para la combustión y los humos se extraen por un conducto (chimenea) vertical, por tiro térmico. El propio tiro térmico es que crea en el hogar una falta de presión que aspira el aire de la combustión. La regulación de la potencia se hace abriendo o cerrando la entrada del aire.

Con las calderas de biomasa se logra un importante ahorro económico en la compra de combustible y una gran disminución de emisiones de carbono y azufre.

Las instalaciones de calderas de biomasa tienen periodos de amortización que oscilan entre uno a cinco años en la mayoría de los casos (Ceballos, 1990).

Existen en el mercado varios tipos de calderas de biomasa. Algunas son totalmente automáticas y otras semi-automáticas o casi totalmente manuales.

En la elección de una caldera de biomasa es importante saber el tipo de biomasa con la que se va realizar la combustión. Hay calderas de biomasa que sólo operan con biomasa de granulometrías muy homogéneas y hay otras que permiten quemar casi cualquier tipo de biomasa (CECU@, 2010).

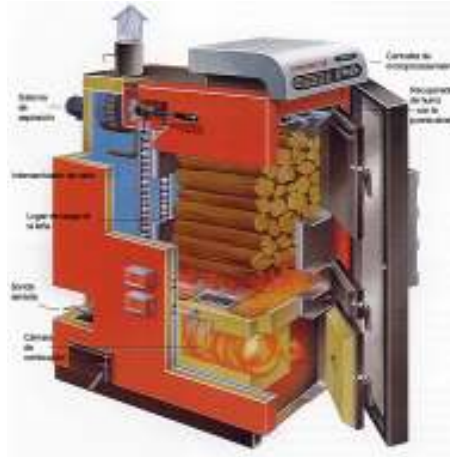
Las calderas de biomasa son usadas principalmente para la calefacción de viviendas (Ceballos, 1990), lo que va de la mano con la introducción del concepto de vivienda sostenible. En este contexto existen en el mercado diversas ofertas de calderas entre las cuales las más comunes son las que se presentan a continuación.

Calderas de llama invertida, tienen esta denominación por la posición de la cámara de combustión, situada debajo del hueco en el que se carga la leña. Normalmente, se trata de calderas equipadas con un rotor para la circulación forzada del aire comburente. De una manera breve su funcionamiento es el expuesto consiste en lo siguiente.

Una parte del aire primario se introduce en la caldera justo encima la rejilla sobre la cual está apoyada la leña. El aire primario impulsa la combustión (fase de gasificación). Los gases liberados son arrastrados hacia abajo a través de la rejilla y llegan a la cámara inferior, donde la adición del aire secundario permite que se complete la combustión.

Factores esenciales para obtener una combustión óptima son una cantidad adecuada de aire, temperatura y turbulencia elevada en la cámara de combustión, y la permanencia de los gases calientes en el hogar por un tiempo suficiente para que se completen las reacciones termoquímicas de combustión.

Ilustración 4. Caldera de llama invertida



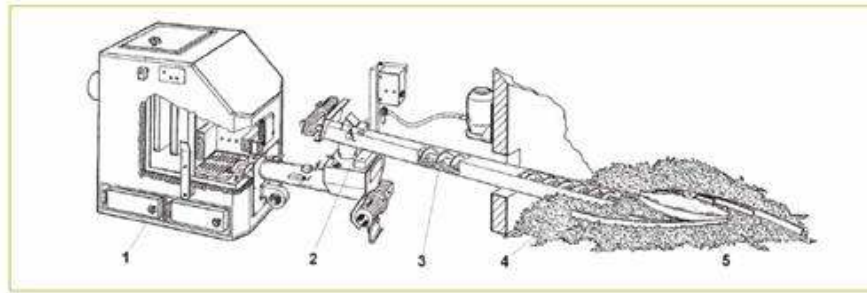
(CECU@, 2010)

Otro tipo de caldera es la caldera de astillas, las cuales utilizan madera virgen cortada en pequeños trozos de unos centímetros de tamaño, cargados automáticamente a través de dispositivos mecánicos especiales. El combustible procede de materiales diferentes, como podas desmenuzadas, desechos de serrería o biomasa procedentes de las actividades forestales (corte de monte bajo, aclareos, cortes de conversión, entre otros).

Los sistemas de astillas son totalmente automatizados y no tienen límite de tamaño, pudiendo alcanzar potencias de incluso varios MW térmicos. El rendimiento y el confort son los mismos que los de las calderas de gas o gasóleo. Por sus características de automatización y ahorro de actividad, los sistemas de astillas están especialmente indicados para la calefacción en edificios de tamaño

medio o grande, como hoteles, escuelas, comunidades, hospitales y centros comerciales.

Ilustración 5. Caldera de astillas



(CECU@, 2010)

En los sistemas más avanzados, el flujo de astillas y la combustión están regulados continuamente por un microprocesador según la demanda de energía del usuario y la temperatura y concentración de oxígeno de los humos (regulación lambda).

Otra de las calderas de biomasa que más se comercializa actualmente es la caldera de pellets para la cual el combustible es de madera virgen seca y prensada en pequeños cilindros, sin aditivos. El peso específico del pellet a granel es de aproximadamente 700 kg/m^3 , mucho más alto que el de otros combustibles no prensados de madera (astillas). El poder calorífico alcanza las 4.200 kcal/kg , con una densidad energética de $3000 - 3.400 \text{ kWh/m}^3$.

A causa de la forma cilíndrica y lisa y del tamaño pequeño, el pellet tiende a portarse como un fluido, lo que facilita el movimiento del combustible y la carga automática de las calderas. El pellet de madera puede utilizarse en las calderas de astillas o en calderas proyectadas especialmente para pellet. Es posible incluso utilizar el pellet en algunos modelos de calderas de gasóleo, a través de quemadores especiales (CECU@, 2010).

En la siguiente tabla se presentan características energéticas de algunas especies maderables que pueden ser utilizadas como combustible.

Tabla 1. Densidad energética de algunas especies de árboles

| Especie | Humedad* | Astillas | | Madera llena | |
|----------------|----------|---|--------------------------------|--------------------|--------------------------------|
| | | Densidad energética (KWh/m ³) | Densidad (kg/ m ³) | P.C. neto (KWh/kg) | Densidad (kg/ m ³) |
| Abeto | 20% | 686 | 170 | 4,03 | 485 |
| Abeto | 30% | 662 | 192 | 3,44 | 548 |
| Abeto | 40% | 640 | 224 | 2,86 | 640 |
| Abeto | 50% | 610 | 269 | 2,27 | 768 |
| Corteza abeto | 20% | 649 | 162 | - | - |
| Corteza abeto | 30% | 626 | 183 | - | - |
| Corteza abeto | 40% | 604 | 213 | - | - |
| Corteza abete | 50% | 575 | 256 | - | - |
| Alerce | 20% | 863 | 214 | 4,03 | 610 |
| Alerce | 30% | 841 | 244 | 3,44 | 697 |
| Alerce | 40% | 814 | 285 | 2,86 | 813 |
| Alerce | 50% | 775 | 342 | 2,27 | 976 |
| Pino silvestre | 20% | 799 | 198 | 4,03 | 565 |
| Pino silvestre | 30% | 768 | 223 | 3,44 | 638 |
| Pino silvestre | 40% | 743 | 260 | 2,86 | 744 |
| Pino silvestre | 50% | 710 | 313 | 2,27 | 893 |
| Haya/encina | 20% | 960 | 254 | 3,78 | 726 |
| Haya/encina | 30% | 925 | 287 | 3,22 | 820 |
| Haya/encina | 40% | 892 | 335 | 2,66 | 956 |
| Haya/encina | 50% | 847 | 402 | 2,10 | 1148 |

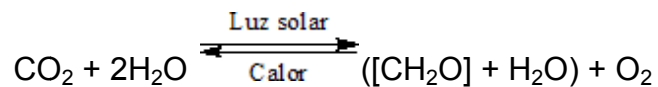
* La humedad está expresada como porcentaje del peso fresco.

4.3 BIOMASA

La biomasa es el nombre dado a cualquier materia orgánica derivado de animales y vegetales como resultado del proceso de conversión fotosintético. La energía de la biomasa deriva del material de vegetal y animal, tal como madera de bosques,

residuos de procesos agrícolas y forestales, y de la basura industrial, humana o animales (Ballesteros, 2001).

El valor energético de la biomasa de materia vegetal proviene originalmente de la energía solar a través del proceso conocido como fotosíntesis. Durante procesos de conversión tales como la combustión, la biomasa libera su energía, a menudo en la forma de calor, y el carbón se oxida nuevamente a dióxido de carbono para restituir el que fue absorbido durante el crecimiento de la planta. Esencialmente, el uso de la biomasa para la energía es la inversa de la fotosíntesis.



- Fotosíntesis

En naturaleza, en última instancia toda la biomasa se descompone a sus moléculas elementales acompañada por la liberación de calor. Por lo tanto, la liberación de energía de conversión de la biomasa en energía útil imita procesos naturales pero en una tasa más rápida. Razón por la cual se considera que la energía obtenida de la biomasa es una forma de energía renovable. Utilizar esta energía recicla al carbón y no añade dióxido de carbono al medio ambiente, en contraste con los combustibles fósiles.

La biomasa, a diferencia, de otros combustibles fósiles almacena energía solar con eficiencia. Además, es la única fuente renovable de carbón, y puede ser procesada convenientemente en combustibles sólidos, líquidos y gaseosos.

Tabla 2. Poder calorífico de algunos combustibles y de Biomasa

| Combustibles fósiles | P.C. neto KWh/kg | Litro equivalente gasóleo | | Litro equivalente GLP ¹ | | Metro cúbico equivalente metano | |
|---------------------------------------|---------------------|---------------------------|--------------|------------------------------------|--------------|---------------------------------|--------------|
| | | kg | Equivalencia | kg | Equivalencia | kg | Equivalencia |
| Gasóleo | 11,7 | 0,83 | 0,83 | 0,62 | 0,61 | 0,83 | 0,82 |
| Metano | 13,5 | 0,73 | 0,52 | 0,54 | 0,39 | 0,72 | 0,52 |
| GLP | 12,8 | 0,76 | 0,84 | 0,57 | 0,62 | 0,75 | 0,83 |
| Combustibles de biomasa | P.C. neto KWh/kg | Litro equivalente gasóleo | | Litro equivalente GLP | | Metro cúbico equivalente metano | |
| | | kg | Equivalencia | kg | Equivalencia | kg | Equivalencia |
| Leña para quemar 25% humedad | 3,5 | 2,79 | 0,29 | 2,07 | 0,21 | 2,76 | 0,28 |
| Leña para quemar 35% humedad | 3,0 | 3,31 | 0,31 | 2,45 | 0,23 | 3,27 | 0,30 |
| Leña para quemar 45% humedad | 2,4 | 4,08 | 0,32 | 3,02 | 0,23 | 4,03 | 0,31 |
| Astillas de haya/encina 25% humedad.. | 3,5 | 2,79 | 0,19 | 2,07 | 0,14 | 2,76 | 0,19 |
| Astillas de haya/encina 35% humedad. | 2,9 | 3,32 | 0,21 | 2,46 | 0,15 | 3,28 | 0,20 |
| Astillas de haya/encina 50% humedad | 2,1 | 4,64 | 0,26 | 3,43 | 0,19 | 4,59 | 0,26 |
| Astillas de álamo 25% humedad | 3,3 | 2,92 | 0,15 | 2,17 | 0,11 | 2,89 | 0,15 |
| Astillas de álamo 35% humedad | 2,8 | 3,51 | 0,15 | 2,60 | 0,11 | 3,47 | 0,15 |
| Astillas de álamo 50% humedad | 1,9 | 5,02 | 0,18 | 3,72 | 0,13 | 4,97 | 0,18 |
| Pellet de madera humedad máx. 10% | 4,9 | 2,00 | 0,36 | 1,48 | 0,27 | 1,98 | 0,36 |

¹ GPL: Gas Licuado de Petróleo

Algunas de las aplicaciones de la biomasa son; la producción de biocombustibles tales como el etanol y el biodiesel tiene el potencial de sustituir cantidades significativas de combustibles fósiles en varias aplicaciones de transporte.

La biomasa puede ser usada en la producción de energía eléctrica, la electricidad puede ser generada a partir de un número de fuentes de biomasa y al ser una forma de energía renovable se la puede clasificar como "energía verde". La producción de electricidad a partir de fuentes renovables de biomasa no contribuye al efecto invernadero ya que el dióxido de carbono liberado por la biomasa cuando es quemado es igual al dióxido de carbono absorbido por el material de la biomasa durante su crecimiento (Textos Científicos@, 2010).

También se puede obtener calor y vapor a partir de la biomasa. La combustión de la biomasa o de biogás puede utilizarse para generar calor y vapor. El calor puede ser el producto principal, en usos tales como calefacción de hogares y cocinar, o puede ser un subproducto de la producción eléctrica en centrales combinadas de calor y energía. El vapor generado por la biomasa puede utilizarse para accionar turbinas de vapor para la producción eléctrica, utilizarse como calor de proceso en una fábrica o planta de procesamiento, o utilizarse para mantener un flujo de agua caliente.

La biomasa tiene entre otras las siguientes ventajas, es una fuente renovable de energía y su uso no contribuye al calentamiento global. Los combustibles de biomasa tienen un contenido insignificante de azufre y por lo tanto no contribuyen a las emisiones de dióxido de azufre que causan la lluvia ácida. La combustión de la biomasa produce generalmente menos ceniza que la combustión del carbón, y la ceniza producida se puede utilizar como complemento del suelo en granjas para reciclar compuestos tales como fósforo y potasio. La conversión de residuos agrícolas y la basura sólida para la producción energética es un uso eficaz de los

residuos que a su vez reduce significativamente el problema de la disposición de basura (Sanz@, et al., 2000).

Sin embargo, actualmente existen ciertas restricciones para el uso de la biomasa como la baja densidad de energía en comparación con otro tipo de combustibles, lo que se traduce en la necesidad de grandes volúmenes. El transporte aumenta los costes y reduce la producción energética neta. Existe la posibilidad que el uso extensivo de bosques naturales cause la tala de árboles y escasez localizada de leña, con ramificaciones ecológicas y sociales serias.

Algunos usos de la biomasa no son completamente competitivos en esta etapa. En la producción de electricidad por ejemplo, hay fuerte competencia de las nuevas plantas de gas natural, altamente eficientes.

La producción y el proceso de la biomasa pueden implicar un consumo de energía significativa, tales como combustible para los vehículos y los fertilizantes agrícolas, dando por resultado un balance energético reducido para el uso de la biomasa. En el proceso de la biomasa se necesitan reducir al mínimo el consumo de combustibles fósiles, y maximizan la conversión de basura y recuperación de energía (Manuel, 1999).

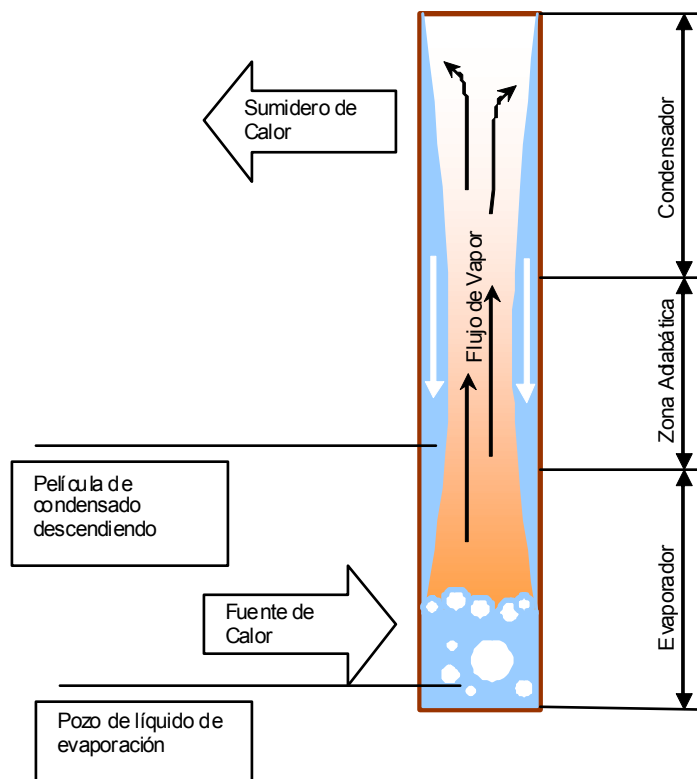
4.4 TUBOS DE CALOR

Un tubo de calor es un dispositivo de alta capacidad de conducir calor, gracias al aprovechamiento que se hace del calor latente de vaporización. Consiste de un contenedor metálico sellado dentro del cual se encuentra un fluido de trabajo al vacío. Al aplicar calor en un extremo del tubo de calor (evaporador), el fluido se evapora. El vapor se desplaza al sector más frío del tubo (condensador), a través del núcleo, en donde se condensa y entrega el calor. El líquido viaja de nuevo al

evaporador por una estructura capilar que es contigua a las paredes del tubo (FAGHRI, 1995).

El tubo de calor puede tener también en el medio una zona a través de la cual no se transfiere calor, la cual se conoce como zona adiabática. Los componentes típicos de los tubos de calor son: el contenedor; el cual es el recipiente que conforma el cuerpo del tubo de calor. La estructura capilar; se conoce también como mecha y es el mecanismo que permite realizar el transporte del líquido de la zona de condensación a la zona de evaporación. El fluido; este debe ser condensable, su selección se realiza de acuerdo al rango de operación del tubo. Y los accesorios adicionales; los cuales se incluyen de acuerdo a las condiciones de operación (FAGHRI, 1995).

Ilustración 6. Funcionamiento de un tubo de calor asistido por gravedad



(Mira, 2007)

Los tubos de calor suelen ser utilizados en situaciones en las que: la fuente de calor y el sumidero deben estar separadas, es necesario incrementar la conductividad de un sólido, o se quiere esparcir el calor en una superficie. Su capacidad de transferencia de calor puede ser muchas veces mayor que la del conductor sólido. Esto se traduce en una resistencia térmica pequeña y permite la separación del evaporador y el condensador sin un aumento significativo en la caída de temperatura a lo largo del tubo (PETERSON, 1994).

El ciclo bifásico en el que operan los tubos de calor favorece cortos tiempos de respuesta. Estos son menores que otros aparatos para la transferencia de calor y no son función de la longitud. Los tubos de calor son aparatos inmóviles y son casi libres de mantenimiento. Sin embargo, debe prestarse atención en su diseño y manufactura para lograr un buen desempeño. Hay dos aspectos de la manufactura de especial cuidado: la limpieza y el sellado. Un defecto en la primera puede generar gases no condensables que significan la pérdida de funcionalidad de un tramo de tubo; y un defecto de la segunda se traduce en un fallo definitivo del tubo (FAGHRI, 1995).

Las características particulares de diseño de los tubos de calor, establecen ciertos límites en cuanto al flujo de calor máximo que se puede transmitir. Los límites de transferencia de calor son los siguientes; límite de secado, límite capilar, límite de arrastre límite de ebullición, límite sónico, límite viscoso y límite termodinámico (SILVERSTEIN, 1992).

4.5 JATROPHA

Jatropha viene del griego *iatrós* que significa médico, y *trophe* que es alimento, debido a su uso medicinal-. Es una oleaginosa de porte arbustivo que pertenece al

subreino de la *tracheobionta* y a la división de *Magnoliophyta*, agrupa en más de 210 géneros más de 3500 especies. Es originaria de México y Centro América, pero crece en la mayoría de países tropicales de Suramérica, Sureste de Asia, India y África.

Se caracteriza por ser un arbusto cuyo ciclo productivo se extiende de 45 a 50 años. Sus hojas son de forma lobulada, presentan de 10 a 15 cm de longitud y de 7.5 a 12.5 cm de ancho. En las terminaciones de las ramas se forman manojos de 10 frutos ovoides o más, estos frutos son cápsulas que inicialmente son de color verde carnosos, cuando maduran se vuelven amarillos y finalmente son frutos secos de color café oscuro y negro, el cual produce tres almendras negras cada una aproximadamente (ALZATE, 2008).

La *Jatropha Curca* se desarrolla usualmente en suelos áridos y semiáridos, no presenta problemas con suelos de pH no neutro. Se encuentra en los trópicos y subtropicos. Presenta bajos requerimientos de agua, soportando periodos largos de sequedad, también resiste las bajas temperaturas, incluso con escarcha ligera sin embargo la planta es susceptible a inundaciones.

La planta crece en altura de 0 a 1500 msnm, pero la mejor altura para su producción es de 0 a 800 msnm, si se tiene un régimen de lluvias que no supere los 350 mm año, se puede llegar a obtener hasta 3000 kilogramos de semilla por hectárea con un rendimiento de 1140 kilogramos de aceite vegetal. Esta producción se duplica si el régimen pluviométrico supera los 600 mm año, o bien si existe riego (COLBIO@, 2008).

La *Jatropha Curca* empieza a producir de manera rentable al cabo de un año de sembrado, su producción se incrementa año a año durante los primeros 5 años y después de ahí se estabiliza. Cabe anotar que al comparar su rendimiento con otros cultivos como el de la higuera se obtiene que una hectárea de terreno

pueda producir de 6 a 8 toneladas métricas de semillas de *Jatropha*; la misma extensión sembrada de higuera produce de 3 a 5 toneladas métricas de semilla.

El contenido de aceite de cada semilla de *Jatropha* está entre 35% y 37% en peso, sin embargo este es menor comparado con otras plantas oleaginosas como la higuera, la palma africana, entre otras. Aun así se caracteriza por ser una planta que obtiene biodiesel de zonas improductivas debido a su resistencia a condiciones inapropiadas para otros cultivos (Palacio, 2009).

5 DISEÑO CALDERA

5.1 CONFIGURACION BASICA DEL EQUIPO

La operación confiable de la caldera es un aspecto que todos los fabricantes de estos equipos deben garantizar, pero los diseños de cada uno son diferentes.

Las principales partes constituyentes de una caldera son: suministro de energía, combustible, aire y agua; quemador, electrodo de chispa, ventilador, chimenea, tubos o *fluxes*, válvulas de seguridad (Agua o vapor), bomba de agua, medidor de presión, nivel de agua, corta fuego, válvulas de alivio, medidor temperatura de gases y tablero de control.

Ilustración 7. Caldera pirotubular



5.1.1 Proceso de diseño

Los proyectos nacen para dar solución a un problema o a una necesidad expresada por alguna persona o grupo de personas, este proyecto nace con el propósito de mitigar el problema ambiental, conocido como el calentamiento global. Además, se propone una alternativa viable para zonas no interconectadas del país. La solución propuesta es el diseño y fabricación de una caldera de baja potencia que utilice como combustible cáscara de *Jatropha*. Para el diseño de este equipo se desarrolla un proceso sistemático para satisfacer y llenar las expectativas de los clientes o usuarios del equipo, la cual consta de los siguientes pasos.

5.1.1.1 Descripción del problema

La crisis energética y el calentamiento global son problemas que afrontan todos los países del mundo, y exigen el desarrollo de tecnologías amigables con el ambiente. En Colombia existen ciertas zonas no interconectadas donde no existe suministro de energía eléctrica provista por alguna empresa.

La ausencia de energía eléctrica es un factor que afecta la calidad de vida y en el desarrollo de su principal actividad económica, la agricultura. Generar vapor a partir de subproductos que puedan ser usados como combustibles es una opción viable para que ellos mismo puedan generar su propia energía.

El desarrollo de este equipo también está dirigido a solucionar los problemas de algunas empresas que requieren de la generación de vapor para procesos industriales, que no justifican la operación de una caldera de gran tamaño. Empresas textiles y tintorerías son algunos de los ejemplos de empresas que requieren de vapor para su proceso industrial.

Igualmente, algunos hogares colombianos requieren de vapor para procesos de calefacción y calentamiento de agua.

5.1.1.2 Identificación de los usuarios

El producto de este proyecto está enfocado para habitantes de las zonas no interconectadas del país y para uso domestico en algunos hogares colombianos, con esta segmentación se asegura que los consumidores potenciales del equipo van a ver vistas satisfechas sus necesidades con este desarrollo.

Los usuarios de este equipo son principalmente son personas de bajos recursos, viviendas de difícil acceso, no están conectados a la red de energía eléctrica del país.

Los hogares colombianos que son personas de recurso variable (bajo – alto), acceso a energía eléctrica, viviendas de fácil acceso.

5.1.1.3 Especificaciones de diseño

La convención para la tabla de especificaciones es (Rf) requisito fijo (o de obligatorio cumplimiento), (Rm) requisito mínimo (o de cumplimiento entre ciertos límites), y (D) deseo (o lujo).

La construcción de esta tabla está basada en la revisión del estado del arte, y en el conocimiento de los equipos que compiten con este desarrollo.

Tabla 3. Especificaciones de diseño

| ESPECIFICACIONES | | | | |
|------------------|-------------------------------------|--|------------------|---------------------------------|
| TIPO | REQUERIMIENTO | | INTERVALOS | CRITERIO |
| Rm | Geometría | La caldera no ocupa mucho espacio | $\leq 1.3m^2$ | Calderas de biomasa comerciales |
| Rf | Masa | La caldera no es pesada | $\leq 400kg$ | Calderas biomasa comerciales |
| Rm | Energía | Es una caldera de baja potencia | $\leq 5kW$ | Calderas comerciales |
| Rf | | La caldera es eficiente térmicamente | $\geq 50\%$ | Calderas biomasa comerciales |
| D | | La caldera no necesita energía eléctrica | - | Uso doméstico y ZNI |
| Rf | Material | Los materiales de la caldera son adecuados | Cobre - Acero | Calderas comerciales |
| Rf | Señal | La caldera tiene control de nivel de agua | - | Calderas comerciales |
| Rf | | La caldera tiene control de presión de vapor | - | Calderas comerciales |
| Rm | | La caldera tiene control de nivel de temperatura de gases calientes | - | Calderas comerciales |
| Rf | Ergonomía | Funcionamiento confiable | - | Uso doméstico |
| Rm | | Los controles de operación de la caldera son fáciles y cómodos de manejar | - | Uso doméstico |
| Rf | | La caldera tiene un sistema motriz para trasladarse fácilmente | - | Uso doméstico |
| Rf | Fabricación y control de producción | La caldera es desarrollada siguiendo los estándares de calidad establecidos para estos equipos | - | Calderas comerciales |
| Rf | Montaje | La caldera es fácil de ensamblar y montar | - | Uso doméstico y ZNI |
| D | | Fácil de almacenar | - | Uso doméstico y ZNI |
| Rf | Mantenimiento | La caldera es de fácil mantenimiento | - | Uso doméstico y ZNI |
| Rf | | La caldera es de fácil reparación | - | Uso doméstico y ZNI |
| Rf | Costo | Bajo costo | $\leq \$3000000$ | Recursos disponibles |
| D | | Costo de repuestos | - | Recursos disponibles |

5.1.1.4 Análisis funcional

Luego de tener las necesidades de los clientes expresadas en especificaciones de ingeniería, se empieza con la identificación de la función principal del equipo (caja negra). Posteriormente, se desglosa esta función principal en subfunciones (estructura funcional).

5.1.1.5 Caja negra

La caja negra describe la función principal del equipo, y es una herramienta de gran ayuda para identificar todos los flujos de energía, materia e información que entran y salen del equipo.

Ilustración 8. Convenciones estructura funcional

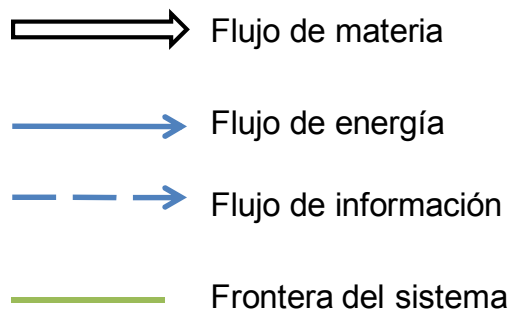


Ilustración 9. Caja negra

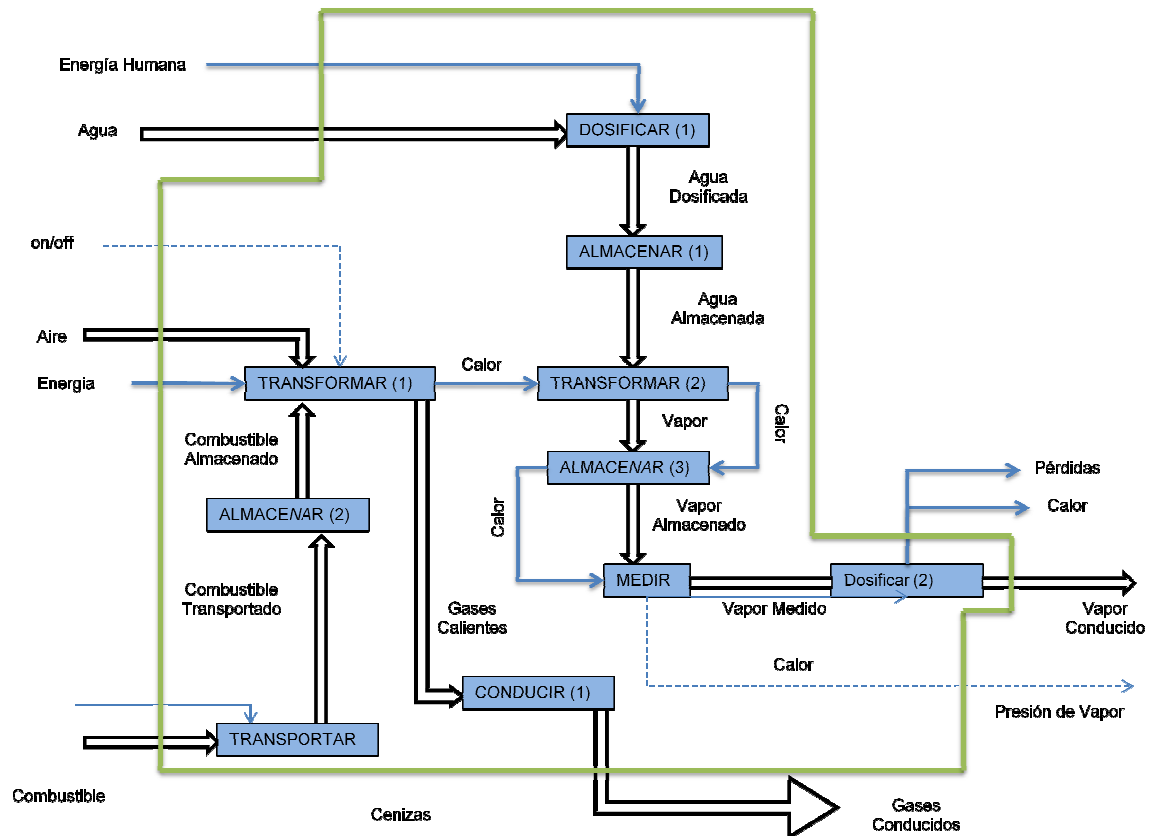


5.1.1.6 Estructura funcional

La caja negra es la concepción de una máquina, aparato o artefacto como un todo, sin embargo, en ese todo existen elementos internos que interactuando entre ellos, desempeñan la función principal del equipo. La estructura funcional es una manera de entender el equipo como un proceso.

La materia, energía e información son elementos que se van a transformar una vez interactúen con el equipo. La frontera del sistema indica que flujos y subfunciones son internos del equipo, y cuales son del entorno.

Ilustración 10. Estructura funcional



5.1.2 Portadores de funciones

Los portadores de funciones son elementos comerciales o a diseñar que interactuando entre sí, llevan a cabo la función principal del equipo. La principal restricción del proyecto es el tiempo de ejecución del mismo, por esta razón los únicos elementos a diseñar son los tubos de calor y la carcasa del prototipo.

Ilustración 11. Portadores de funciones






| FUNCIÓN | PORTADOR DE FUNCIÓN |
|---------------|--|
| Dosificar (1) |  Válvula de bola |
| Dosificar (2) |  Válvula de globo |
| Almacenar (1) |  Tanque |

Ilustración 11. (Continuación)

| FUNCIÓN | PORTADOR DE FUNCIÓN |
|------------------------------|--|
| Almacenar (2) |  <p data-bbox="932 604 1029 638">Parrilla</p> |
| Almacenar (3) |  <p data-bbox="938 903 1052 936">Tanque</p> |
| Transportar |  <p data-bbox="948 1226 1110 1260">Empujador</p> |
| Transformar (1) |  <p data-bbox="938 1562 1094 1596">Quemador</p> |
| Transformar (2) (Acoplar) |  <p data-bbox="938 1751 1143 1785">Tubo de calor</p> |

Ilustración 11. (Continuación)

| FUNCIÓN | PORTADOR DE FUNCIÓN |
|----------|---|
| Conducir |  <p data-bbox="948 680 1096 716">Chimenea</p> |
| Medir |  <p data-bbox="948 1066 1114 1102">Manómetro</p> |

Los elementos descritos no son los únicos constituyentes del equipo, la caldera debe disponer de algunos servicios auxiliares para garantizar una operación segura y confiable.

Tubos de nivel: La función de este sistema es garantizar que el nivel de agua en la cámara de vapor sea suficiente para garantizar que los tubos de calor estén transfiriendo el calor de la combustión al agua de la caldera, y que estén completamente sumergidos en el fluido.

Existen controles de nivel mucho más completos y costos, esto reciben una señal de un sensor de nivel, y dependiendo de la cantidad de agua en la caldera, este envía una señal a un actuador para que encienda la bomba de suministro de agua.

Ilustración 12. Control de nivel



(CONTROLES@, 2010)

El costo de este sistema es bastante alto, además, que requiere de conexiones eléctricas.

El control de nivel de agua en la caldera es por inspección visual y consta de un indicador de nivel de agua en vidrio que muestra la cantidad de agua en la caldera, cuando el nivel llegue al mínimo valor, manualmente se debe accionar una válvula de bola para alimentar el líquido a la caldera. El nivel de agua es un elemento necesario para garantizar que el equipo no vaya a operar en vacío, este es un indicador comercial usado en calderas de alta potencia.

Ilustración 13. Indicador de nivel de agua



Los generadores de vapor comerciales también tienen un control de combustible, este tipo de controles aplica para equipos que poseen quemadores de combustible líquido.

Control de lodos: La suciedad que se deposita en la caldera producto de la alimentación de agua, podría en algún momento afectar la eficiencia del equipo. El control de suciedad se hace con una válvula manual que un momento dado permite evacuar impurezas que se depositan en la cámara de vapor.

Válvulas de seguridad: Conocidas como válvulas de alivio de presión, son accesorios utilizados en las calderas para evitar sobrepresiones dentro de la cámara de vapor, y de tal manera evitar una explosión.

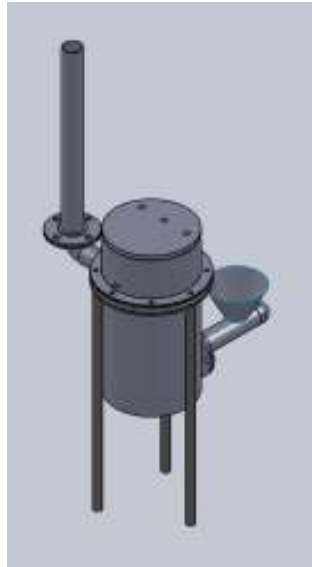
Ilustración 14. Válvulas de alivio de presión



5.1.3 Arquitectura final del producto

La arquitectura final del producto se ilustra en la figura, este solo es un esquema, y el producto final se detalla en el diseño de detalle.

Ilustración 15. Modelo del prototipo de caldera



El modelo de cálculo y los cálculos detallan las dimensiones del equipo, además que el registro fotográfico aporta los detalles constructivos.

5.2 MODELO DE CÁLCULO

5.2.1 Cálculos térmicos

Los cálculos térmicos indican en condiciones ideales cuales deben ser las medidas del hogar y de la cámara de vapor. Además de las dimensiones de los tubos de calor para que el equipo sea eficiente.

5.2.1.1 Proceso de combustión

La cantidad necesaria de combustible depende de la potencia útil de la caldera, del poder calorífico inferior y de la eficiencia de esta. Es importante recordar que

aunque se esté teniendo en cuenta una eficiencia relativamente baja en el proceso de combustión, en todos los cálculos se asume que la combustión se realiza en condiciones ideales.

Ecuación 1. Flujo másico de combustible

$$\dot{m}_c = \frac{P_u}{nPCI} 3600$$

Donde:

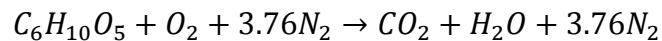
\dot{m}_c : Flujo másico del combustible [kg/h]

P_u : Potencia útil de la caldera [W]

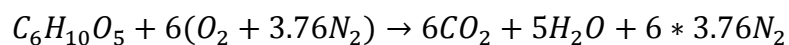
PCI : Poder calorífico inferior del combustible [kJ/kg]

n : Eficiencia de la caldera [%]

El poder calorífico de la cáscara de Jatropha es de aproximadamente 16300kJ/kg, dato obtenido durante investigaciones del semillero SIETE, no obstante, de esta cáscara no se tiene la formula química, por lo tanto para este proyecto se asume que la formula química de la cáscara de Jatropha es similar a la de la madera $C_6H_{10}O_5$. El proceso de combustión se realiza en presencia de aire y una fuente de energía, esta reacción libera ciertos gases de combustión y energía.



Balanceando la ecuación tenemos:



Para hallar el flujo másico de los gases es necesario encontrar la relación aire – combustible teórica, y la real que salen de balancear la reacción química entre aire, combustible y energía.

$$\left(\frac{A}{C}\right)_T = 28.56 \left(\frac{\text{moles aire}}{\text{moles } C_6H_{10}O_5} \right)$$

La relación de aire – combustible teórica es entonces:

$$\left(\frac{A}{C}\right)_T = 28.56 \frac{\text{moles aire}}{\text{moles } C_6H_{10}O_5} * \frac{28.92 \left(\frac{\text{kg aire}}{\text{mol}} \right)}{162 \left(\frac{\text{kg } C_6H_{10}O_5}{\text{mol}} \right)} = 5.098 \left(\frac{\text{kg aire}}{\text{kg } C_6H_{10}O_5} \right)$$

La relación aire – combustible teórica indica la cantidad necesaria de aire para quemar 1 kg de combustible. Las combustiones no son 100% eficientes, por eso se deben llevar a cabo con un exceso de aire, en este caso es del 20%.

$$\left(\frac{A}{C}\right)_R = 5.098 * \frac{(100 + e)}{100} \left(\frac{\text{kg aire}}{\text{mol}} \right) = 6.1176 \left(\frac{\text{kg aire}}{\text{kg } C_6H_{10}O_5} \right)$$

Con la relación de aire – combustible real, se halla el flujo másico de aire necesario para quemar determinada cantidad de cáscara de Jatropha.

Ecuación 2. Flujo másico de aire

$$\dot{m}_{air} = \dot{m}_c * \left(\frac{A}{C}\right)_R$$

Donde:

\dot{m}_{air} : Flujo másico de aire [kg/h]

$\left(\frac{A}{C}\right)_R$: Relación aire – combustible real [kg aire/kg combustible]

Ecuación 3. Flujo másico de los gases de combustión

$$\dot{m}_g = \dot{m}_c \left(1 + \left(\frac{A}{C}\right)_T \left(1 + \frac{e}{100} \right) \right)$$

Donde:

\dot{m}_g : Flujo másico de los gases de la combustión [kg/h]

$\left(\frac{A}{C}\right)_T$: Relación aire – combustible teórico [kg aire/kg combustible]

e : Exceso de aire [%]

5.2.1.2 Cámara de combustión

El dimensionamiento de la cámara de combustión o del hogar depende básicamente del tipo de combustible, el flujo másico de este y el coeficiente de liberación de calor del combustible. El coeficiente de liberación de calor son valores experimentales que se han obtenido para muchos combustibles, este coeficiente depende del combustible y de la forma como es alimentado al hogar de la caldera.

Ecuación 4. Volumen cámara de combustión

$$V = \frac{\dot{m}_c PCS}{I_v}$$

Donde:

V : Volumen cámara de combustión [m^3]

PCS : Poder calorífico superior del combustible [kJ/kg]

I_p : Coeficiente de liberación de calor del combustible en el hogar [$kJ/m^3 \cdot h$]

5.2.1.3 Cámara de vapor

La cámara de vapor se dimensiona teniendo en cuenta la potencia útil de la caldera, la entalpia de evaporización a la temperatura del agua en la cámara de vapor y la cantidad de agua en cambio de fase.

$$P_u = \dot{m}_a h_{fg}$$

Donde:

h_{fg} : Entalpia de evaporización del agua @ T_a [kJ/kg]

\dot{m}_a : Flujo másico de agua evaporada [kg/s]

Despejando la masa de agua evaporada, se puede determinar el volumen de la cámara de vapor.

$$\dot{m}_a = \frac{P_u}{h_{fg_u}}$$

Ecuación 5. Volumen cámara de vapor

$$v_{cv} = \frac{\dot{m}_a}{\rho_a} * 3.6$$

Donde:

ρ_a : Densidad del agua [kg/m^3]

v_{cv} : Volumen cámara de vapor [m^3]

El volumen de agua debe ser de 1/3 el volumen total de la cámara de vapor y la de vapor de 2/3. El volumen total equivale a todo el espacio interno de la cámara de vapor restando el volumen que ocupan los tubos de calor.

5.2.1.4 Calor transferido por radiación

La radiación es la transferencia de calor directa en forma de energía radiante procedente de la incandescencia del combustible del combustible o de las llamas a los tubos y al cuerpo de la caldera (ECOCARBON, 1998). Está definido por la siguiente ecuación:

Ecuación 6. Calor transferido por radiación

$$\dot{Q}_r = A_1 E_1 \sigma (T_g^4 - T_s^4)$$

Donde:

\dot{Q}_r : Calor transferido por radiación [W]

A_1 : Area de radiación [m^2]

E_1 : Emitancia de la superficie [adim]

σ : Constante de Boltzman ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$)

T_g : Temperatura de los gases de combustión [K]

T_s : Temperatura superficial tubo de calor [K]

T_a : Temperatura del agua dentro de la cámara de vapor [K]

La temperatura superficial de los tubos de calor se obtiene como el promedio entre la temperatura de los gases de combustión y la temperatura del agua en la cámara de vapor.

$$T_s = \frac{(T_g + T_a)}{2}$$

Lo anterior se puede decir si se asume que la resistencia del tubo de calor a la transferencia de calor es despreciable.

$$A_1 = NA_r$$

$$A_r = \pi DL_2$$

Donde:

N : Numero de tubos de calor [und]

A_r : Área de radiación por tubo de calor [m²]

D : Diámetro externo del tubo de calor [m]

L_2 : Longitud de los tubos en contacto con los gases de combustión [m]

5.2.1.5 Calor transferido por convección

La convección es la transferencia de calor entre una superficie sólida y un líquido o gas adyacente que está en movimiento. La convección natural se debe a la diferencia de densidad que proviene del diferencial de temperatura. La convección forzada es causada por una fuerza mecánica (ECOCARBON, 1998).

Ahora teniendo en cuenta el calor transferido por radiación se podría determinar la cantidad de calor transferido por convección para obtener la potencia deseada de 1000 W.

$$\dot{Q}_c = P_u - \dot{Q}_r$$

Ecuación 7. Calor transferido por convección

$$\dot{Q}_c = h_a A_c (T_{sc} - T_{ac})$$

Donde:

\dot{Q}_c : Calor generado por convección [W]

h_a : Coeficiente de transferencia de calor por convección en el agua [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]:

T_{sc} : Temperatura superficial del tubo de calor [$^\circ C$]

T_{ac} : Temperatura del agua dentro de la cámara de vapor [$^\circ C$]

A_c : Área de convección por tubo de calor [m^2]

Las variables que afectan el calor transferido por convección son todas conocidas, excepto, el área de transferencia de calor por convección.

$$A_c = \frac{\dot{Q}_c}{h_a (T_{sc} - T_{ac})} = \pi D L_1$$

Donde:

L_1 : Longitud del tubo de calor en contacto con el agua [m]

$$L_1 = \frac{\dot{Q}_c}{h_a \pi D (T_{sc} - T_{ac})}$$

Para la cámara de combustión la ecuación es igual que para la de vapor, por lo tanto:

$$L_2 = \frac{\dot{Q}_c}{h_g \pi D (T_{gc} - T_{sc})}$$

Donde:

h_g : Coeficiente de transferencia de calor por convección en los gases [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]

T_{gc} : Temperatura del gas dentro de la cámara de combustión [$^\circ C$]

5.2.1.6 Aislamiento térmico

Un aislante térmico es un material caracterizado por su baja conductividad térmica, que se opone al paso de calor entre un medio caliente a uno más frío.

Para la selección del aislamiento térmico es necesario hallar la temperatura interna de la cámara de vapor. La presión de saturación del vapor de la caldera será de máximo 150PSI, la presión a la cual está ajustada la válvula de seguridad. Asumiendo que la caldera opera al nivel del mar.

$$P_A = P_{atm} + P_{sat}$$

La presión absoluta es:

$$P_A = 101.3kPa + 1034.2kPa = 1.13MPa$$

Con la presión absoluta en la cámara de vapor, se encuentra la temperatura de la misma:

$$T_{sat@0.8MPa} = 185.165^{\circ}C$$

(Potter, et al., 2006)

Conociendo la temperatura de los dos medios, cámara de vapor y el ambiente, se calcula las pérdidas por transferencia de calor. El aislante térmico esta puesto alrededor de la cámara de vapor de un espeso de 2", se procede a calcular las pérdidas por conducción y convección, usando el método de resistencias equivalentes.

5.2.1.7 Perdidas de calor alrededor de la cámara de vapor.

El aislamiento térmico es el medio que se opone a que el calor vaya de la zona más caliente a la más fría, por su baja conductividad térmica; la temperatura de la caldera y el ambiente tienden a equilibrarse.

Ilustración 16. Resistencias equivalentes alrededor de la cámara de vapor



$$R_{at} = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi Lk}$$

(Kreith, et al., 2001)

Donde:

R_{at} : Resistencia aislante térmico forma cilíndrica [K/W]

$\frac{r_o}{r_i}$: Espesor del aislamiento[m]

L : Altura cámara de vapor [m]

k : Conductividad térmica del aislamiento [$W/^\circ C \cdot m^2$]

$$R_{air} = \frac{1}{h_c A}$$

Donde:

R_{air} : Resistencia aire [K/W]

h_c : Coeficiente de convección natural del aire [$W/m^2 K$]

Ilustración 17. Propiedades del aislamiento térmico

| Conductividad térmica | Temperatura máxima de aplicación | Características de quemado superficial |
|---|---|--|
| 0,035 $W/^\circ C \cdot m^2$. Valor típico (0,24 $BTU \cdot in/h \cdot ^\circ F \cdot ft^2$) a 75 $^\circ F$ ASTM C518. | hasta 454 $^\circ C$ (850 $^\circ F$) ASTM C411 | Sin recubrimiento: FS/SD = 25/50 Con foil expuesto: FS/SD = 5/0 Cumple la Norma ASTM E 84 |

(FiberGlass-Colombia@, 2010)

La temperatura máxima que puede soportar la cañuela de fibra de vidrio es de 454 $^\circ C$.

Se calcula la resistencia equivalente:

$$R_{eq} = R_{at} + R_{air}$$

Para convección natural el coeficiente de transferencia del aire puede ser asumido como 5 $W/m^2 K$, entonces:

$$R_{eq} = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi L k} + \frac{1}{h_c A}$$

$$R_{eq} = \frac{\ln(0.1603/0.1095)}{2 * \pi * 0.11 * 0.035} + \frac{1}{5 * (2 * \pi * 0.1603 * .11)} = 17.56 \text{ K/W}$$

Con la resistencia equivalente y ΔT se calculan las pérdidas de calor por el aislante.

$$\dot{Q} = \frac{1}{R_{eq}} \Delta T = \frac{1}{17.56} * (170.4 - 25) = 8.28 \text{ W}$$

Las pérdidas de calor por transferencia de calor entre el medio ambiente y el cilindro de la cámara de vapor representan únicamente 0.8%.

5.2.1.8 Pérdidas de calor por la tapa de la cámara de vapor.

El esquema de transferencia de calor entre el medio y la tapa plana de la cámara de vapor es similar al ilustrado anteriormente.

Ilustración 18. Resistencias equivalentes por la tapa de la cámara de vapor



La resistencia generada por el aislante térmico es:

$$R_{atp} = \frac{e}{kA_t}$$

Donde:

R_{atp} : Resistencia aislante térmico forma plana [K/W]

e : Espesor del aislamiento térmico [m]

A_t : Área transversal tapa cámara de vapor [m²]

$$R_{eq} = \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_c A}$$

Entonces

$$R_{eq} = \frac{0.0254}{0.035 * \pi * 0.3206^2 * 0.25} + \frac{1}{5 * \pi * 0.3206^2 * .25} = 11.47 \text{ K/W}$$

$$\dot{Q} = \frac{1}{R_{eq}} \Delta T = \frac{1}{11.47} * (170.4 - 25) = 12.676 \text{ W}$$

Las pérdidas de calor por transferencia de calor entre el medio ambiente y la tapa de la cámara de vapor no representan ni siquiera el 1.26%, por lo tanto el espesor seleccionado para aislar el equipo es adecuado.

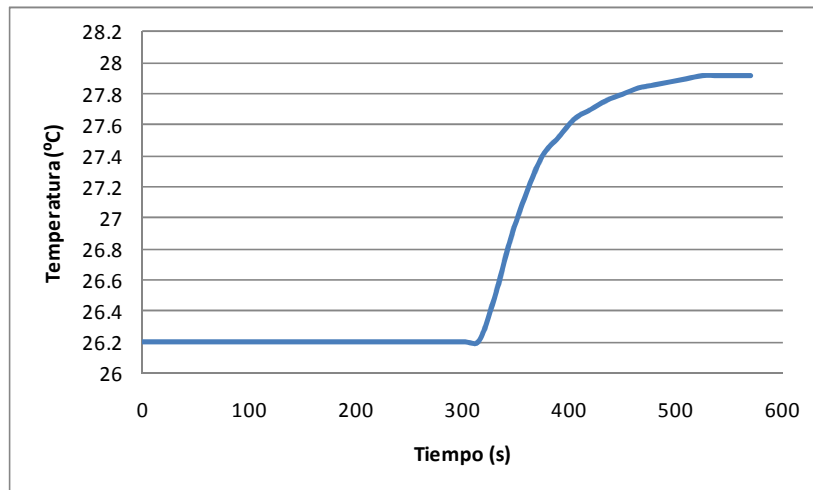
5.2.2 Poder calorífico del combustible

El poder calorífico es la cantidad de energía que puede liberar un combustible al oxidarse en forma completa con el aire (Fernandez@, 2010). La herramienta

usada para determinar el poder calorífico de la cáscara de *Jatropha Curca* es la bomba calorimétrica.

El poder calorífico se determina tomando la variación de la temperatura del agua dentro de la bomba durante un periodo de tiempo, además se tienen en cuenta factores de corrección afectan las mediciones como la combustión incompleta, segmentos de alambre de ignición que no se queman, entre otros.

Ilustración 19. Variación Temperatura vs Tiempo



Conociendo la curva de la variación de la temperatura contra el tiempo, la masa del combustible utilizada para la prueba y los parámetros de la bomba se calcula el poder calorífico del combustible.

Tabla 4. Poder calorífico *Jatropha*

| Variable | Valor | Unidad |
|---------------------------|----------|--------|
| deltaT | 1.72 | °C |
| Capacidad calorífica | 10155.24 | J/°C |
| Longitud alambre | 10 | cm |
| Error alambre | 96.3 | J |
| Masa muestra | 1 | g |
| Poder calorífico | 17370.7 | kJ/kg |
| Poder calorífico promedio | 16333.2 | kJ/kg |

El poder calorífico de la cáscara de *Jatropha* es relativamente bajo en comparación combustibles fósiles pero comparado con madera es bastante significativo.

5.2.3 Cálculos mecánicos

Los cálculos mecánicos comprende la resistencia de materiales a todos aquellos elementos que soportan presiones y temperaturas altas. Las principales piezas que requieren de una revisión en este prototipo son básicamente los tubos de cobre (tubos de calor), la placa de los tubos y la cámara de vapor.

5.2.4 Tubería de cobre

La selección de la tubería adecuada para los tubos de calor es muy importante para evitar que algunos de estos fallen y causen algún accidente. Los cálculos que rigen la selección de la sección transversal de los tubos de calor son las formulaciones de la resistencia de materiales aplicadas en tanques a presión. La presión se distribuye por todas las paredes de este al comportarse el vapor como gas. La tubería de cobre seleccionada para la manufactura de los tubos de calor es Tipo L, diámetro nominal 1/2".

$$\sigma_{tc} = \frac{P_w r_{tc}}{t_{tc}}$$

(Hibbeler, 2006)

Donde:

σ_{tc} : Esfuerzo en el tubo de calor [Pa]

r_{tc} : Radio del tubo de calor [mm]

t_{tc} : Espesor tubo de calor [mm]

P_w : Presión interna tubo de calor [Pa]

La presión máxima de trabajo del tubo de calor se encuentra determinando la temperatura del vapor saturado, esta presión se puede conocer con las tablas de vapor.

La temperatura del vapor saturado es:

$$V_{int} = \pi \frac{d_{int}^2}{4} L_{tubo}$$

Donde:

V_{int} : Volumen interno del tubo [m^3]

d_{int} : Diámetro interior del tubo [m]

L_{tubo} : Longitud total del tubo de calor [m]

Teniendo en cuenta la geometría del tubo $V_{int} = 4.22 * 10^{-5} m^3$, una vez se encuentra el volumen interno del tubo de calor, y conociendo la masa de carga del mismo, 3g de agua, se puede calcular el volumen específico, y de esta manera se puede calcular la temperatura y la presión, la longitud del tubo de calor es la suma de las longitudes en contacto con los gases y con el agua.

$$v = \frac{V_{int}}{m_{carga}} = 0.01409 m^3/kg$$

Donde:

v : Volumen específico del agua en el tubo de calor [m^3/kg]

m_{carga} : Agua cargada dentro del tubo [kg]

Finalmente, la presión y la temperatura del vapor saturado son:

$$T_{vsat@0.01409m^3/kg} = 325.6^{\circ}C$$

$$P_{vsat@0.01409m^3/kg} = 12.15MPa$$

(Potter, et al., 2006)

Ahora el esfuerzo que soporta el tubo de calor internamente es:

$$\sigma = \frac{12.15MPa * 6.6975mm}{1.24mm} = 65.62MPa$$

La resistencia a la tracción del cobre es de 4200 kgf/cm² (Cobre@, 2010). Por lo tanto, el tubo seleccionado y la geometría son suficientes para soportar la presión interna del vapor.

El factor de seguridad teniendo en cuenta el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo que soporta el tubo de calor es 6.3.

5.2.5 Análisis de esfuerzos en la placa de los tubos

El domo o la placa de los tubos es la pieza que tiene la función de servir de chasis para los tubos de calor, esta pieza va estar sometida a una presión de 150psi, la cual será la presión del vapor. La presión de diseño es de 150psi, ya que a este valor la válvula de alivio libera la sobrepresión en la cámara de vapor, posiblemente el equipo queda sobredimensionado pero se garantiza la seguridad de los usuarios del equipo.

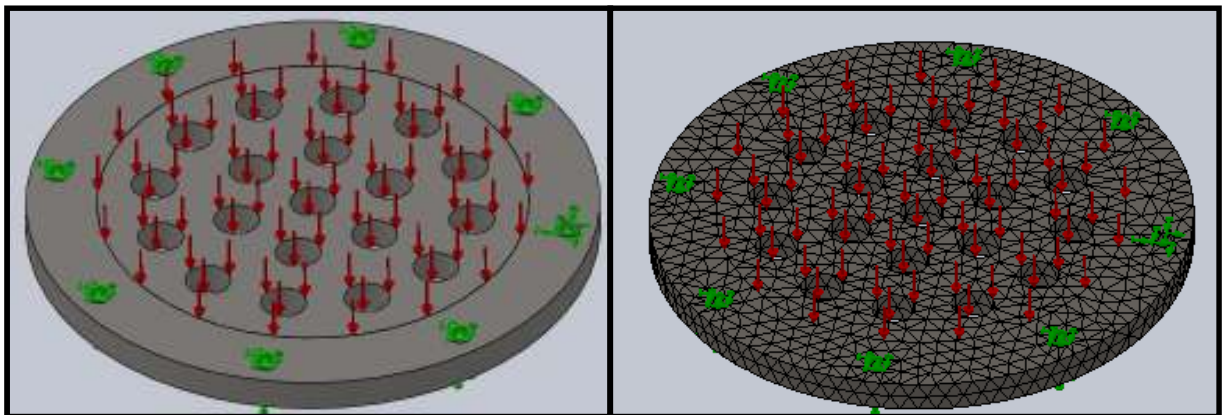
Los esfuerzos soportados por la pieza son hallados por un software de simulación Solidworks.

Tabla 5. Propiedades placa de los tubos

| | |
|-------------------------|------------------------|
| Material | ACERO AISI - SAE 1020 |
| Espesor | 15.55mm |
| Resistencia de fluencia | 350 MPa |
| Densidad | 7850 kg/m ³ |
| Modulo de elasticidad | 200 GPa |
| Modulo de rigidez | 75 GPa |
| Relación de Poisson | 0.32 |

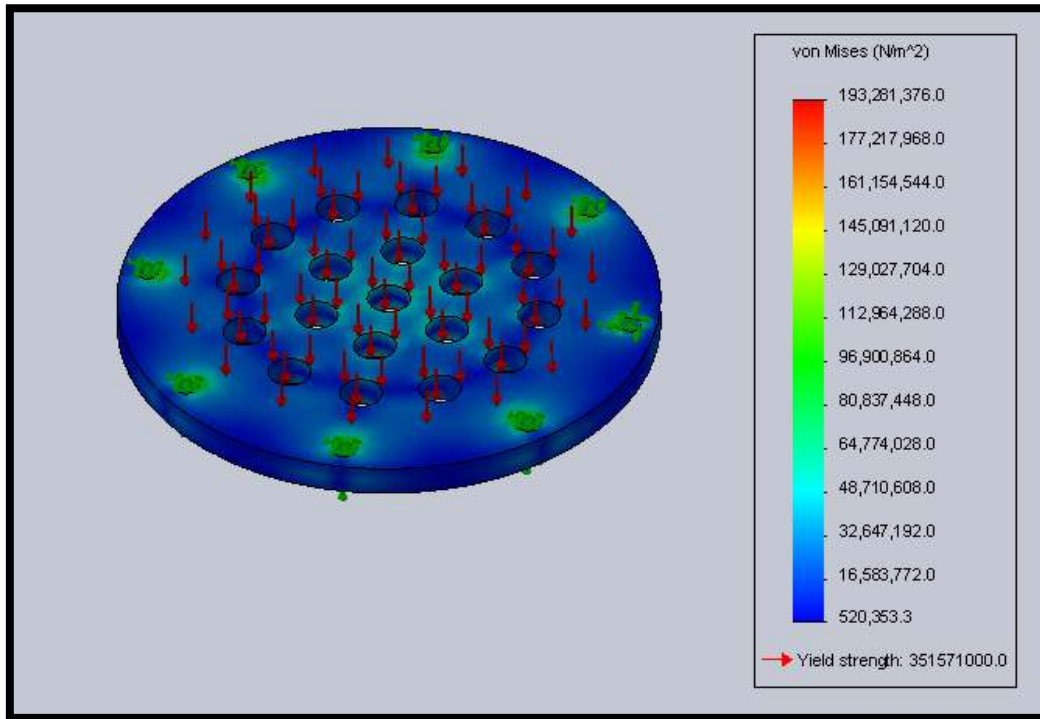
(Shigley, y otros, 2005)

Ilustración 20. Asignación de restricciones y malla



En la superficie superior de la placa se aplica una carga de presión de 150psi. Las cargas a las cuales está sometida la pieza se ilustran de color rojo en la figura, y la pieza está restringida en los agujeros de los pernos, de color verde, igualmente se aprecia la malla generada por el programa para desarrollar el análisis de elementos finitos.

Ilustración 21. Resultados de la simulación



La simulación muestra que la pieza va estar sometida máximo a un esfuerzo de 95MPa, según el método de von Mises, lo cual quiere decir que el material es apto para soportar la presión de 150psi sin fallar porque el esfuerzo de fluencia del material es de 350MPa, es decir, se estaría utilizando un factor de seguridad de 3.6. El esfuerzo máximo de 95MPa se presenta principalmente en el centro de la placa y en los agujeros donde se encuentran los tornillos.

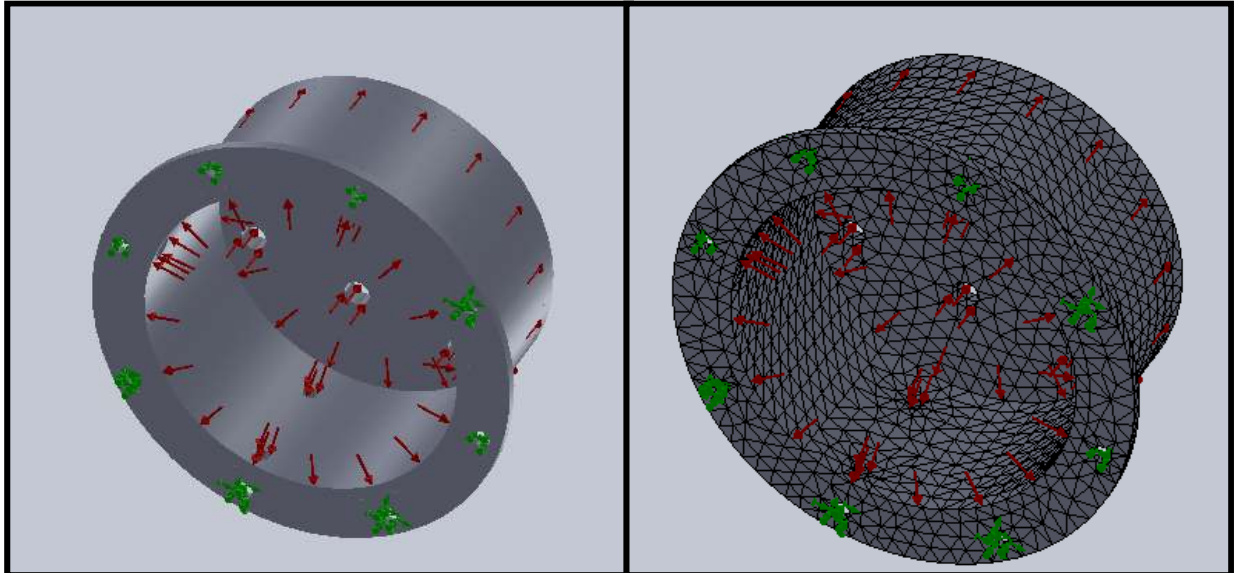
5.2.6 Análisis de esfuerzos en la cámara de vapor

La cámara de vapor va estar sometido a la presión generada por el vapor sobre, la presión se encuentra uniformemente distribuida sobre todo esta pieza.

Tabla 6. Propiedades cilindro cámara de vapor

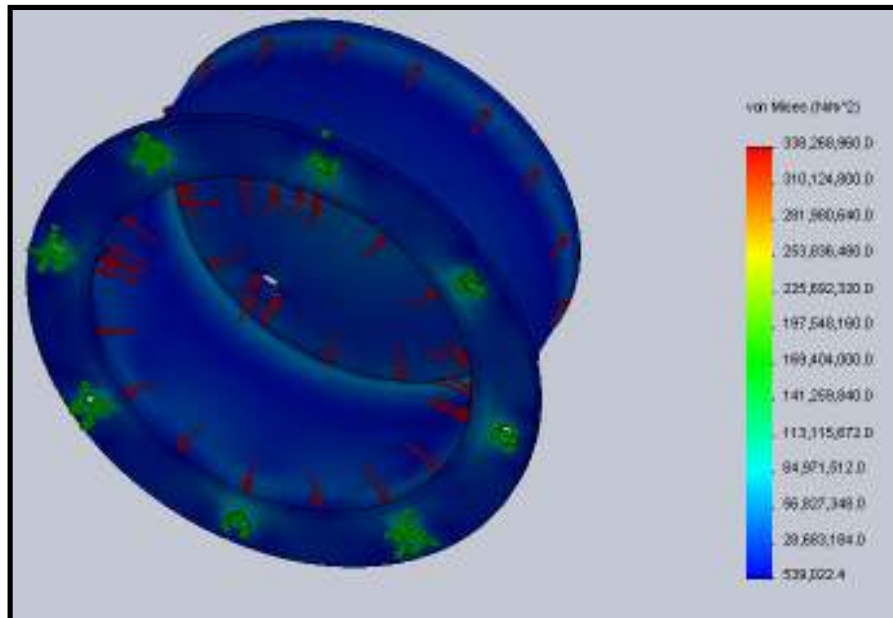
| | |
|-------------------------|------------------------|
| Material | ACERO AISI- SAE 1020 |
| Espesor | 8 mm |
| Resistencia de fluencia | 350 MPa |
| Densidad | 7850 kg/m ³ |
| Modulo de elasticidad | 200 GPa |
| Modulo de rigidez | 75 GPa |
| Relación de Poisson | 0.32 |

Ilustración 22. Restricciones y generación de la malla cámara de vapor



La pieza está sometida a una presión interna de 150psi (1034.21 kPa), de color rojo en la figura se observa la asignación de las cargas, y la pieza está restringida en los agujeros de los pernos, de color verde. Igualmente se aprecia la malla generada por el programa para desarrollar el análisis de elementos finitos.

Ilustración 23. Resultados de la simulación



Los sitios que soportan mayores esfuerzos son precisamente los agujeros de los tornillos, los cuales actúan como concentradores de esfuerzos, allí el esfuerzo es de 100MPa, en el resto de la geometría de la pieza es capaz de soportar esta presión máxima a la que se ajusta la válvula de alivio. El factor de seguridad para esta pieza es de 3.5, teniendo en cuenta que el esfuerzo de fluencia es de 350 MPa.

5.3 DISEÑO DE DETALLE

Este tipo de diseño hace referencia a las características específicas de los componentes utilizados para lograr el funcionamiento del equipo.

En este aparte del proyecto se especifican características como dimensiones y parámetros de selección.

5.3.1 Empaque Cámara de Vapor

La arquitectura final del producto muestra que la zona de combustión y la zona de transferencia de calor se ensamblan con bridas o *flanges*, éstas van atornilladas, y entre ellas se debe colocar un empaque.

La selección del empaque es muy importante porque de este depende el óptimo funcionamiento del equipo. El sello tiene la función de eliminar las fugas de los fluidos presentes, en este punto se deben tener en cuenta varios factores para determinar que sello adquirir. La presión y la temperatura son los principales criterios para seleccionarlo, luego viene el costo del mismo.

El empaque seleccionado para la caldera es de asbesto, material que posee muy buena resistencia a la presión y a altas temperaturas.

Ilustración 24. Propiedades del Asbesto

| Propiedades del Asbesto | | |
|---|----------|-----------|
| De excelente calidad, diseñada para servicio industrial. Soporta vapor, aire, gases, petróleo, aguas, álcalis, amoníaco y otros productos medianamente agresivos bajo condiciones ligeramente pesadas. Las fibras son aglutinadas con SBR. Color: Negro | | |
| Temperatura Máxima | 450°C | ASTM F104 |
| | | ASTM F146 |
| | | ASTM F36 |
| Presión Máxima | 1450 PSI | DIN 52910 |
| | | DIN 52911 |
| | | DIN 52913 |

(SEALCO@, 2010)

A pesar de todas las buenas propiedades que el asbesto tiene, puede provocar cáncer en las personas que lo manipulen, aunque actualmente es usado en muchas aplicaciones.

5.3.2 Datos de entrada

El modelo de cálculo parte de la suposición de un dimensionamiento ideal de las variables involucradas en el mismo. Algunas de estas variables son; el tipo de combustible, la potencia útil de la caldera, el número de tubos de calor y la geometría del equipo. Esto quiere decir que es necesario partir de la información teórica, además de asumir algunas características del comportamiento del equipo.

Desde este panorama es necesario realizar un proceso iterativo de obtención de resultados el cual converja a las características físicas y técnicas de diseño.

Tabla 7. Variables de entrada

| Parámetros de diseño | | |
|---|--------|----------------------|
| Potencia útil de la caldera (Pu) | 1 | kW |
| Poder Calorífico Inferior (PCI) | 14900 | kJ/kg |
| Poder Calorífico Superior (PCS) | 16300 | kJ/kg |
| Eficiencia estimada del quemador (n) | 60% | % |
| Exceso de Aire (e) | 20% | % |
| Numero de tubos de calor (N) | 19 | und |
| Diámetro tubos de calor (D) | 5/8 | in |
| Temperatura superficial del agua en la cámara de vapor (Ta) | 120 | °C |
| Temperatura de los gases de combustión (Tg) | 300 | °C |
| Coefficiente de transferencia de convección en los gases (hg) | 25 | W/m ² *°C |
| Coefficiente de transferencia de convección en el agua (ha) | 1000 | W/m ² *°C |
| Diámetro de la carcasa interior (Di) | 8 | in |
| | 0.2065 | m |
| Longitud del tubo de calor en los gases de combustión (L2) | 0.25 | m |
| Entalpia de evaporización @Ta (Hfg) | 2174 | kJ/kg |

5.3.3 Resultados

El desarrollo del modelo de cálculo caracteriza el equipo, allí se detallan las dimensiones mínimas con las cuales debe ser dimensionada la caldera.

A continuación, se expone una tabla con los resultados obtenidos a partir del modelo de cálculo y después de realizar el proceso de iteración.

Tabla 8. Resultados

| Tabla de Resultados | | |
|---|----------|--------------------------------|
| Flujo másico de combustible | 1.12E-04 | kg/s |
| | 0.403 | kg/h |
| Relación aire - combustible teórica | 5.09 | Kg de aire / kg de combustible |
| Relación aire - combustible real | 6.11 | Kg de aire / kg de combustible |
| Flujo másico de aire | 2.46 | kg/h |
| Flujo volumétrico de aire | 2.18 | m ³ /h |
| | 1.21 | cfm |
| Volumen del hogar (V) | 7.05E-03 | m ³ |
| Área del hogar | 3.35E-02 | m ² |
| Altura del hogar | 2.10E-01 | m |
| Volumen cámara de vapor | 1.66E-03 | m ³ |
| Altura cámara de vapor | 4.94E-02 | m |
| Calor transferido por radiación (Q _r) | 716.95 | W |
| Longitud tubo de calor en el gas (L ₂) | 1.33E-01 | m |
| Calor transferido por un tubo de calor (Q _{in}) | 14.90 | W / tubo |
| Longitud tubo de calor en el agua (L ₁) | 3.32E-03 | m |

6 CONSTRUCCION

6.1 PROVEEDORES Y LISTA DE MATERIALES

Los planos realizados en la etapa de diseño sirvieron para definir tanto los componentes comerciales como los elementos a diseñar. En la tabla se detallan todos los proveedores y los elementos adquiridos con cada uno de ellos.

Tabla 9. Componentes comerciales y materia prima

| CANTIDAD | UNIDAD | DESCRIPCIÓN | PROVEEDOR |
|----------|--------|---|-------------------------------|
| 6 | M | Tubería rígida de cobre Tipo L ϕ_n 1/2" | Ferrovalvulas |
| 20 | U | Racores media macho ϕ 5/8" | Ferrovalvulas |
| 20 | U | Tapones ϕ 5/8" | Ferrovalvulas |
| 1 | U | Tubería Schedule 40 ϕ 8" X 13cm | Chatarrería Hermanos Ochoa |
| 1 | U | Platina Calibre 3/8" | Chatarrería Hermanos Ochoa |
| 1 | U | Tubería Schedule 40 ϕ 8" X 57cm | Chatarrería Hermanos Ochoa |
| 1 | U | Nivel caldera | Piheza Metálicas S.A |
| 1 | U | Platina Calibre 5/8" para tubos de calor | Chatarrería Hermanos Ochoa |
| 10 | U | Juego Tornillo (Tornillo+Tuerca+Arandela) | Gilcol |

Tabla 9. (Continuación)

| CANTIDAD | UNIDAD | DESCRIPCIÓN | PROVEEDOR |
|----------|--------|--|------------------------------|
| 6 | M | Tubo negro de 1/2" | Ferrosvel |
| 1 | U | Pistón (Eje calibrado de 2" L=230mm) | Mapa |
| 1 | U | Vástago (Eje Calibrado de 1/2" L=200mm) | Gilcol |
| 1.5 | M | Tubería Schedule 40 ϕ 1 1/2" X 1.5m | Ferrovalvulas |
| 2 | U | Bridas de 1 1/2" Schedule 40 | Ferrovalvulas |
| 1 | U | Codo 1 1/2" Schedule 40 | Ferrovalvulas |
| 1 | U | Tapa 1 1/2" Schedule 40 | Ferrovalvulas |
| 1 | U | Válvula cheque ϕ n 1/2" | Piheza Metálicas S.A |
| 2 | U | Válvula de bola ϕ n 1/2" | Piheza Metálicas S.A |
| 1 | U | Manómetro | Piheza Metálicas S.A |
| 1 | U | Válvula de globo ϕ n 1/2" (Salida Vapor) | Ferrovalvulas |
| 1 | U | Empaque asbesto | Empaquetaduras y Empaques |
| 1 | U | Sellador de Teflón | Empaquetaduras y Empaques |
| 3 | U | Niple de acero de 1/2" X 100 mm | Ferrovalvulas |
| 2 | U | Niple de acero de 1/4" X 100 mm | Ferrovalvulas |
| 2 | U | Acople hembra de 1/4" | Ferrovalvulas |
| 1 | U | Racor hembra 1/2" de Bronce | Ferrovalvulas |
| 19 | U | Anillo retención de 1/8" | Piheza Metálicas S.A |
| 1 | U | Cola de marrano de 1/4" | Ferrovalvulas |

Tabla 9. (Continuación)

| CANTIDAD | UNIDAD | DESCRIPCIÓN | PROVEEDOR |
|----------|--------|-----------------------------------|------------------------------|
| 10 | U | Tuerca Sello refrigeración 1/8" | Piheza Metálicas S.A |
| 1 | U | Tornillo de 1/2" Longitud 25cm | Mapa |
| 1 | M | Cañuela Fibra de Vidrio ϕ 8" | Cielotek |
| 1 | U | Empaque TEF SEAL | Empaquetaduras y Empaques |
| 1 | U | Nivel caldera comercial 150 PSI | DistriValvulas |
| 1 | U | Pintura en polvo | Servicios Horneables |

6.2 MANUFACTURA TUBOS DE CALOR

La manufactura de los tubos de calor es uno de los procesos que requiere más atención y cuidado en la fabricación del prototipo de caldera.

Ilustración 25. Diagrama de flujo manufactura de tubos de calor



El procedimiento que se lleva a cabo en la manufactura de los tubos de calor es el siguiente:

1. Corte de tubos: El primer paso consiste en cortar los tubos de calor

según los resultados arrojados por los cálculos, en este caso lo mínimo para los tubos es una longitud de 14cm, sin embargo, con las pérdidas de energía que se pueden presentar en el equipo se decide cortar con una longitud de 30 cm de largo, teniendo en cuenta que 25 cm de estos están en contacto con los gases de la combustión.

2. Ensamble racor y tubo: Los tubos de calor de la caldera van atornillados a una placa de acero dimensionada para soporte presiones de más de 150psi, para ensamblar los tubos en la placa, a estos se les debe soldar un racor.

Ilustración 26. Corte y limpieza de los tubos de calor



3. Lavado de los tubos, capilares y tapones: Los tubos de calor deben ser muy bien lavados para garantizar que su funcionamiento sea el más adecuado, para ellos los tubos deben ser lavado inicialmente con ácido clorhídrico (HCl) y con soda caustica. El procedimiento de lavado es simple se ponen de los tubos en un concentración de agua con ácido clorhídrico (proporción 1500 de ml H₂O y 300 ml de HCl) durante 10 minutos, para eliminar óxidos depositados en la superficie interna. Luego, se enjuagan los tubos con abundante agua. El siguiente paso consiste en sumergir los tubos en una solución de soda cáustica (1000 ml de H₂O con 100 gr NaOH) durante 10 minutos, para eliminar grasas.

Finalmente, se enjuagan los tubos con abundante agua y se dejan secar en un ambiente limpio. Este proceso se repite con capilares y tapones también.

Ilustración 27. Lavado de los tubos de calor



4. Ensamble tubos: Una vez lavados los tubos se sueldan los capilares y tapones a los tubos. Es importante que después de ser lavados los tubos, el proceso de soldadura debe ser de inmediato para evitar que se engrasen de nuevo.

Ilustración 28. Tubo de calor ensamblado



5. Carga de tubos: El procedimiento consiste básicamente en sacar todo el aire del tubo de calor generando vacío y se cargan con 3.2 gramos de agua destilada. Una vez cargada la masa de agua se comprueba su funcionamiento, si el tubo funciona relativamente bien, se sella del todo, o sino debe ser purgado, y sellado finalmente. El procedimiento de carga de los tubos de calor se encuentra como archivo anexo al

documento. El montaje para cargar los tubos de calor se ilustra a continuación, los elementos necesarios se describen en el procedimiento de carga.

Ilustración 29. Estación de carga



Para garantizar la trazabilidad del proceso de carga es conveniente llenar la tabla de carga de los tubos, donde básicamente se toman datos durante el proceso de carga como la masa de los tubos, la masa de los tubos con accesorios, la masa después de cargado, entre otros.

Tabla 10. Resumen carga de los tubos

| Proyecto de grado: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE CALDERA QUE USA COMO COMBUSTIBLE CÁSCARA DE JATROPHA CURCA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Tubo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| Peso sin valvula (g) | 168 | 169 | 168 | 168 | 168 | 168 | 169 | 169 | 168 | 168 | 170 | 169 | 168 | 170 | 169 | 169 | 169 | 168 | 169 |
| Peso inicial con valvula (g) | 263 | 242 | 266 | 241 | 241 | 239 | 264 | 242 | 264 | 239 | 241 | 241 | 265 | 265 | 241 | 265 | 240 | 241 | 241 |
| Volumen cargado (ml) | 3.3 | 3.2 | 3.2 | 3.2 | 3.2 | 3.2 | 3.1 | 3.2 | 3.2 | 3.2 | 3.2 | 3.2 | 3.2 | 3.2 | 3.2 | 3.2 | 3.1 | 3.2 | 3.2 |
| Peso sin drenado (g) | 266 | 245 | 269 | 245 | 243 | 242 | 267 | 245 | 267 | 242 | 245 | 244 | 268 | 268 | 244 | 268 | 243 | 244 | 244 |
| Peso despues de drenado (g) | 266 | 245 | 268 | 244 | 243 | 242 | 267 | 245 | 267 | 242 | 245 | 244 | 268 | 268 | 244 | 268 | 243 | 244 | 244 |
| Peso con purga (g) | 266 | 245 | 268 | 244 | 243 | 242 | 267 | 245 | 267 | 242 | 244 | 244 | 267 | 268 | 244 | 268 | 243 | 243 | 244 |
| Masa cargada (g) | 3.2 | 3.1 | 2.5 | 3 | 2.1 | 2.9 | 2.8 | 3.3 | 2.9 | 2.9 | 2.8 | 2.8 | 2.1 | 3.1 | 3.2 | 3 | 2.5 | 2.7 | 3.4 |

6.3 COSTOS FINALES DEL PROYECTO

Los costos del proyecto incluyen los costos de la materia prima para los componentes que fueron fabricados, los componentes comerciales adquiridos y la mano de obra necesaria para la manufactura de las piezas que componen la caldera.

Tabla 11. Costos totales

| COMPONENTES COMERCIALES | | | | |
|-------------------------|--------|--|--------------|-----------------|
| CANTIDAD | UNIDAD | DESCRIPCION | VALOR UNIDAD | TOTAL (CON IVA) |
| 6 | M | Tubería rígida de cobre Tipo L ϕ n 1/2" | \$ 9,500 | \$ 66,120 |
| 20 | U | Racores media macho ϕ 5/8" | \$ 3,000 | \$ 69,600 |
| 20 | U | Tapones ϕ 5/8" | \$ 600 | \$ 13,920 |
| 1 | U | Tubería Schedule 40 ϕ 8" X 13cm | \$ 15,690 | \$ 18,200 |
| 1 | U | Platina Calibre 3/8" | \$ 8,800 | \$10,208 |
| 1 | U | Tubería Schedule 40 ϕ 8" X 57cm | \$ 47,069 | \$ 54,600 |
| 1 | U | Nivel caldera | \$ 28,448 | \$ 33,000 |
| 1 | U | Platina Calibre 5/8" para tubos de calor | \$ 21,552 | \$ 25,000 |
| 10 | U | Juego Tornillo (Tornillo+Tuerca+Arandela) | \$ 776 | \$ 8,999 |
| 6 | M | Tubo negro de 1/2" | \$ 2,235 | \$ 15,552 |
| 1 | U | Pistón (Eje calibrado de 2" L=230mm) | \$ 15,456 | \$ 17,929 |
| 1 | U | Vástago (Eje Calibrado de 1/2" L=200mm) | \$ 720 | \$ 835 |
| 1.5 | M | Tubería Schedule 40 ϕ 1 1/2" X 1.5m | \$ 15,000 | \$ 26,100 |
| 2 | U | Bridas de 1 1/2" Schedule 40 | \$ 10,500 | \$ 24,360 |
| 1 | U | Codo 1 1/2" Schedule 40 | \$ 3,800 | \$ 4,408 |
| 1 | U | Tapa 1 1/2" Schedule 40 | \$ 3,500 | \$ 4,060 |
| 1 | U | Válvula cheque ϕ n 1/2" | \$ 18,000 | \$ 20,880 |
| 2 | U | Válvula de bola ϕ n 1/2" | \$ 10,000 | \$ 23,200 |
| 1 | U | Manómetro | \$ 10,000 | \$ 11,600 |

Tabla 11. (Continuación)

| CANTIDAD | UNIDAD | DESCRIPCION | VALOR UNIDAD | TOTAL (CON IVA) |
|--------------------|--------|---|--------------|-------------------------|
| 1 | U | Válvula de globo ϕ n 1/2" (Salida Vapor) | \$ 18,000 | \$ 20,880 |
| 1 | U | Empaque asbesto | \$ 15,000 | \$ 17,400 |
| 1 | U | Sellador de Teflón | \$ 28,000 | \$ 32,480 |
| 3 | U | Niple de acero de 1/2" X 100 mm | \$ 2,000 | \$ 6,960 |
| 2 | U | Niple de acero de 1/4" X 100 mm | \$ 1,500 | \$ 3,480 |
| 2 | U | Acople hembra de 1/4" | \$ 600 | \$ 1,392 |
| 1 | U | Racor hembra 1/2" de Bronce | \$ 7,000 | \$ 8,120 |
| 19 | U | Anillo retención de 1/8" | \$ 300 | \$ 6,612 |
| 1 | U | Cola de marrano de 1/4" | \$ 6,000 | \$ 6,960 |
| 10 | U | Tuerca Sello refrigeración 1/8" | \$ 1,000 | \$ 11,600 |
| 1 | U | Tornillo de 1/2" Longitud 25cm | \$ 2,900 | \$ 3,364 |
| 1 | M | Cañuela Fibra de Vidrio ϕ 8" | \$ 72,000 | \$ 83,520 |
| 1 | U | Empaque TEF SEAL | \$ 108,000 | \$ 125,280 |
| 1 | U | Nivel caldera comercial 150 PSI | \$ 38,000 | \$ 44,080 |
| 1 | U | Pintura en polvo | \$ 30,000 | \$ 34,800 |
| | | | SUBTOTAL | \$ 776,620 |
| MANO DE OBRA | | | | |
| 8 | H | SOLDADOR | \$ 6,000 | \$ 48,000 |
| 6 | H | COLABORADOR | \$ 4,500 | \$ 27,000 |
| 6 | H | TORNERO | \$ 5,000 | \$ 30,000 |
| TOTAL MANO DE OBRA | | | | \$ 105,000 |
| COSTO TOTAL EQUIPO | | | | \$ 881,620 (USD 481) |

7 PRUEBAS DE OPERACIÓN BÁSICA

7.1 PRUEBAS DE ESTANQUIEDAD

La prueba de estanqueidad es la primera prueba a la cual se debe someter este equipo. Esta prueba consiste en mirar que en todas las uniones soldadas y en las conexiones de accesorios no se presenten fugas, esto se puede lograr presurizando todo el sistema ensamblado con aire comprimido.

En la primera verificación de fugas se utilizó un empaque de asbesto entre la cámara de vapor y la placa de los tubos, debido a la rigidez del empaque asbesto y las imperfecciones de las bridas y la placa de los tubos, se presentaron bastantes fugas de agua. Por lo anterior, se decide cambiar por un empaque más flexible y que permita acomodarse a las imperfecciones de las bridas.

Ilustración 30. Ensamble con empaque de asbesto



El teflón por sus excelentes propiedades a condiciones de alta presión y temperatura, puede ser usado en estas aplicaciones. Por tal motivo, se adquiere un empaque de teflón expandido (TEFSEAL), cuyas propiedades se ilustran a continuación.

Ilustración 31. Propiedades del TEFSEAL

| PROPIEDADES DEL TEFSEAL | |
|---|----------|
| Posee excelente flexibilidad, Soporta químicos agresivos, Rellena imperfecciones de la superficie, Fácil de instalar, Requiere bajo torque de apriete | |
| Presión Máxima | 3000 PSI |
| Temperatura Máxima | 300°C |

La adquisición de teflón expandido solucionó los problemas de fugas que se presentaban en las bridas. Sin embargo, se empezaron a presentar problemas en el medidor de nivel de caldera. El nivel fue reemplazado por uno comercial, el cual soporta presiones y temperaturas más altas en comparación con el nivel anterior.

Ilustración 32. Pruebas de estanqueidad



7.2 DESEMPEÑO TERMICO DE UN TUBO DE CALOR

La prueba de desempeño térmico de un tubo de calor permite conocer las características de operación de un tubo de calor. Con esta prueba se pretende

medir la resistencia equivalente del tubo, oposición del tubo para transmitir el calor del evaporador al condensador. La prueba consiste en simular el funcionamiento real del tubo con un intercambiador de calor, una fuente eléctrica, y diferentes elementos de medición.

7.2.1 Elementos necesarios

Los elementos usados para desarrollar esta prueba son:

- PLC²
- Fuente eléctrica con transformador para generar un voltaje hasta de 220V
- Termocuplas
- Dos multímetros
- Bomba centrífuga
- Tanque de agua
- Calentador de agua
- Control de temperatura
- Intercambiador de calor
- Resistencias eléctricas
- Accesorios de tubería
- Aislamiento térmico
- Sistema de transformación de datos

² Controlador Lógico Programable

7.2.2 Procedimiento

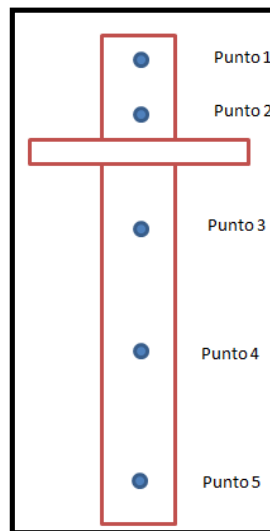
En la prueba es muy importante simular la operación del tubo similar a como opera en realidad el tubo en la caldera.

- Montaje del tubo de calor

Antes de iniciar el montaje es necesario tener algún sistema de sujeción de todo el sistema.

1. Al tubo de calor se le pegan dos termocupas en la zona del condensador, y tres termocupas en la zona del evaporador, idealmente deben estar equidistantes.

Ilustración 33. Ubicación de las termocupas en el tubo de calor



2. El condensador se introduce dentro del intercambiador de calor, y se ajusta de tal manera que no hayan fugas en esta conexión.
3. Simulando los gases calientes de la combustión de la cáscara de Jatropha, el evaporador se pone en contacto con una resistencia

eléctrica, la cual está conectada a una fuente eléctrica que permite variar el voltaje desde 0 hasta 220V.

4. Verificar que el sistema no tenga fugas de agua porque podría afectar las mediciones de temperatura.

Ilustración 34. Montaje prueba



5. Para evitar pérdidas de calor con el ambiente, se aísla tanto el intercambiador de calor como las resistencias eléctricas. Con esta medida se garantiza que todo el calor transferido por las resistencias se transfiere al agua que pasa por el intercambiador, por medio del tubo de calor.

7.2.3 Realización de la prueba

La adquisición de datos involucra el registro de variables tales como caudales, temperaturas y voltajes. Además, que con ayuda de un sistema de adquisición de

datos, se puede conocer la variación de la temperatura del tubo de calor con respecto al tiempo.

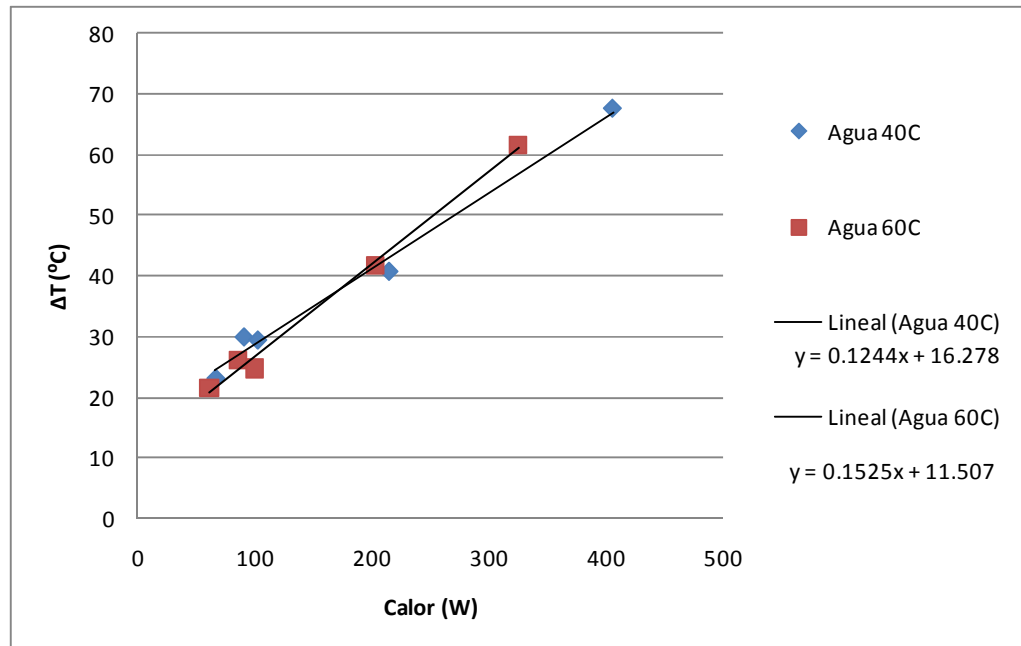
1. Una vez montado el tubo de calor, se debe purgar la bomba, y alistar todo el sistema de tuberías y accesorios por donde fluye el agua.
2. Ubicar una termocupla para la salida de agua y otra para la entrada de esta.
3. Prender el calentador de agua, y el control que mantiene la temperatura de este a 40°C
4. Conectar todas las termocuplas al PLC, teniendo en cuenta el número que estas tienen, y el lugar donde son ubicadas. El PLC debe ser conectado a una fuente eléctrica y al computador por el puerto USB.
5. Inicialmente, se debe esperar que el agua ascienda a la temperatura deseada, para este caso las primeras pruebas son 40°C, y posteriormente con 60°C.
6. Cuando el control del calentador marque una temperatura de 40°C, se manipulan las resistencias, conectando la fuente eléctrica a 110V y variando la cantidad de potencia transferida al tubo de calor.
7. Registrar manualmente con los multímetros, un cronómetro, y un contador de agua las variables de voltaje, corriente eléctrica y caudal.
8. La potencia eléctrica entregada puede ser variada desde 0 a 220V, en intervalos de a 10%. Seleccionar 5 o 6 variaciones. Las variaciones para medir el desempeño de los tubos de calor son 60% y 100% de 110V, y de 20%, 50% y 80% de 220V.
9. Registrar el comportamiento del tubo de calor cuando la resistencia está entregando el 60% de 110V, el registro de estos datos lo lleva un computador, el cual está conectado al PLC. El programa grafica y almacena los datos adquiridos por el PLC.
10. Esperar a que todas las termocuplas muestren en pantalla una línea relativamente estable o convergente a un valor. Cuando esto ocurra guardar los datos, y variar el porcentaje a 100% de 110V.
11. Repetir este proceso hasta adquirir todos los datos.

12. Cuando el proceso de adquisición de datos ha terminado, se debe variar la temperatura del calentador a 60°C, y se repite el proceso desde el numeral 7.

7.2.4 Resultados

La pendiente de la recta indica la resistencia que opone el tubo a pasar el calor de la zona del evaporador al condensador, en ese sentido se puede decir que la resistencia equivalente del tubo es de 0.138 K/W aproximadamente.

Ilustración 35. Resistencia equivalente de un tubo de calor



Teniendo en cuenta, únicamente, el calor transferido por convección, el calor que cada tubo de calor debe transferir del evaporador al condensador es de 52W. Ajustando los datos se obtiene una línea con ecuación $y = 0.1244 * x + 16.278$ para el caso en el que la temperatura del agua a la entrada del intercambiador de calor es de 40°C, y $y = 0.1525 * x + 11.507$, cuando el agua del sistema esta a 60°C.

7.3 DESEMPEÑO TÉRMICO DE LA CALDERA

La evaluación del desempeño térmico de la caldera es el paso más importante para conocer el funcionamiento en condiciones normales del equipo, y para conocer el producto final entregado por este.

La prueba permite conocer la calidad del vapor, la eficiencia del equipo, la tasa de generación de vapor y la potencia útil del equipo, igualmente se pueden comprobar la validez de los cálculos.

7.3.1 Elementos necesarios

- Condensador
- Termocuplas
- PLC
- Computador
- Cáscara de Jatropha
- Pipeta de gas
- Medidor de flujo de gas
- Tres manómetros
- Quemador
- Calorímetro

7.3.2 Procedimiento

Los pasos necesarios para medir el desempeño térmico de la caldera son:

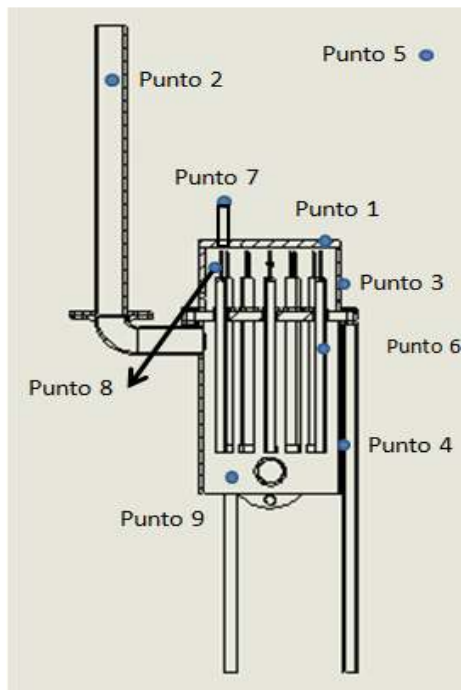
1. Ubicar las termocuplas en el prototipo. Para estas pruebas se ubicaron 9

termocuplas para medir la temperatura de:

- La superficie de la cámara de vapor (Punto 1)
- Los gases de combustión a la salida de la chimenea (Punto 2)
- Los aislamientos térmicos tanto de la cámara de vapor como la de la cámara de combustión, las termocuplas se ubicaron en las superficies de los aislamientos. (Punto 3 y 4)
- La temperatura ambiente (Punto 5)
- La superficie del tubo de calor (Punto 6)
- El vapor producido por la caldera (Punto 7)
- El agua de la caldera (Punto 8)
- La superficie de la cámara de combustión (Punto 9)

La ilustración muestra la ubicación de las termocuplas para llevar a cabo la prueba del desempeño térmico de la caldera.

Ilustración 36. Ubicación de las termocuplas en el prototipo



2. Cerrar todas las válvulas del equipo, exceptuando la válvula de alimentación.
3. Cargar la caldera con 2500 gramos de agua destilada, y cerciorarse del funcionamiento del indicador de nivel de la caldera. Una vez el equipo este cargado, se cierra la válvula de alimentación.
4. Las termocuplas deben ser conectadas al PLC. Verificar que todas las termocuplas estén funcionando adecuadamente. Se debe iniciar el software de adquisición de datos.
5. Conectar el condensador a la salida de vapor de la caldera, y ponerlo en marcha.
6. Encender el quemador de gas y estabilizar el suministro de gas del equipo.
7. Crear un archivo de Excel donde se registren valores como la presión del gas propano, cantidad de combustible consumido, masa de condensados, presión de la caldera y la hora de inicio de la prueba. Estos datos deben ser registrados con cierta periodicidad.
8. Se debe estar pendiente de los condensados, estos se deben medir con cierta periodicidad, cuando el agua de la caldera este en la fase de vapor.
9. Se debe esperar hasta que el valor de presión indicado por el manómetro de la caldera se estabilice.
10. Una vez hayan terminado las mediciones, se debe evacuar todo el vapor de la caldera, dejando abierto la válvula de purga del equipo.

7.3.3 Adquisición de datos

Los datos del comportamiento del equipo son almacenados por el PLC, el cual convierte una diferencia de voltaje a valores de temperatura. Estos se van ilustrando gráficamente en un programa de computador, para su monitoreo.

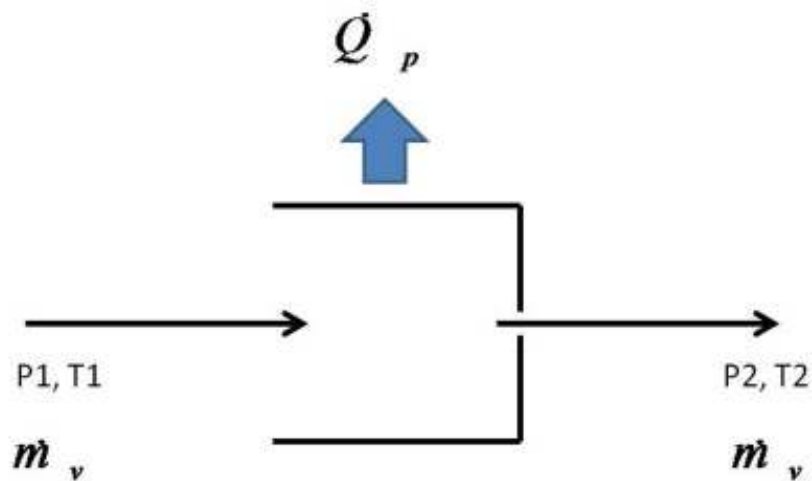
7.3.4 Resultados

Los parámetros que se pretenden medir con las pruebas son la calidad de vapor, la rata generación de vapor de la caldera, la eficiencia y las pérdidas.

7.3.4.1 Calidad del vapor

El instrumento usado para medir la calidad del vapor es el calorímetro. En este dispositivo se genera una caída abrupta de presión, para que este se expanda y pase a la fase de vapor sobrecalentado.

Ilustración 37. Calorímetro



La calidad de vapor puede ser medida teniendo en cuenta la primera ley de la termodinámica.

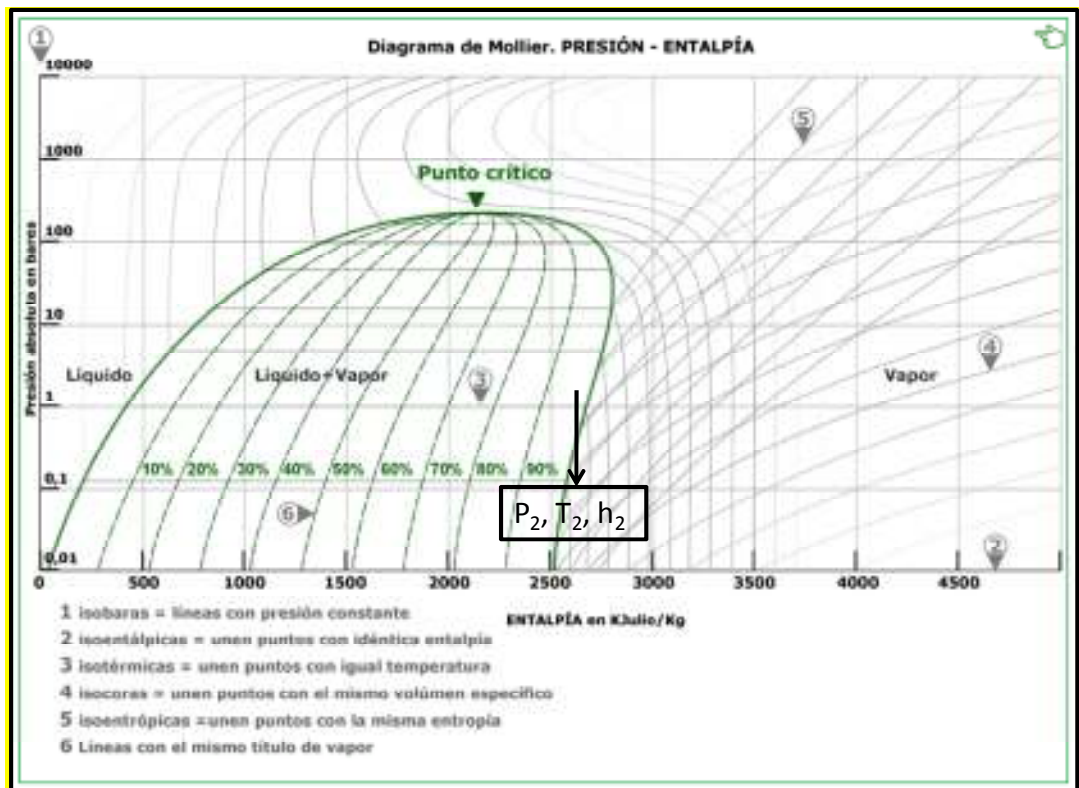
Ecuación 8. Primera ley de termodinámica

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}_v(h_2 - h_1)$$

De la ecuación anterior los términos de calor y trabajo son cero porque el calorímetro está totalmente aislado y no hay realización de trabajo, por lo tanto $h_1 = h_2$.

El calorímetro genera una caída de presión en el vapor de salida de la caldera, con la presión a la cual cae el vapor y la temperatura del vapor después del estrangulamiento del calorímetro se encuentra la calidad, el diagrama de este proceso se ilustra a continuación.

Ilustración 38. Diagrama P-h



(CAURIUM-SISTEMAS@, 2010)

La calidad de vapor es entonces:

$$x = \frac{h_1 - h_{f@T_1}}{h_{fg@T_1}}$$

Donde:

x : Calidad [%]

h_f : Entalpia del fluido [kJ/kg]

h_1 : Entalpia a la salida del calorímetro [kJ/kg]

Los datos de temperatura y presión se pueden determinar una vez se haya alcanzado el estado estacionario en la caldera, con ellos se puede encontrar la entalpia del vapor, y con ello se encuentra la calidad del vapor.

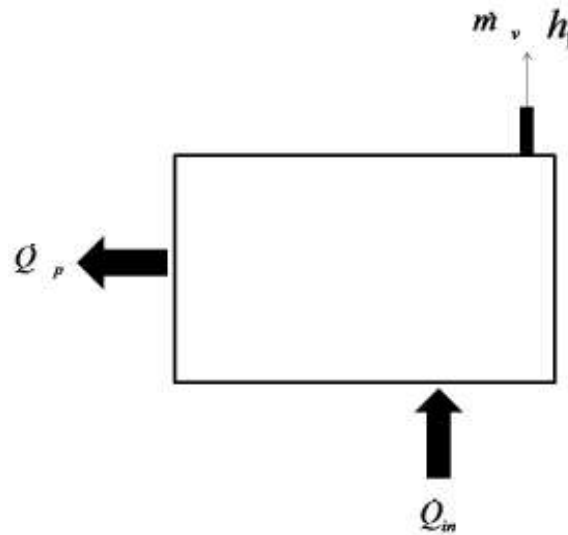
Tabla 12. Resultados obtenidos

| PARAMETRO | VALOR | UNIDADES |
|------------------------------------|---------|----------|
| Temperatura salida del calorímetro | 100 | °C |
| Presión salida del calorímetro | 0.085 | MPa |
| Entalpia salida del calorímetro | 2678.09 | kJ/kg |
| Temperatura en la cámara de vapor | 125 | °C |
| Entalpia del fluido @125°C | 525 | kJ/kg |
| Entalpia de evaporización @125°C | 2188.4 | kJ/kg |
| Calidad del vapor | 98.39 | % |

7.3.4.2 Balance de energía sin cambio de fase

La eficiencia de la caldera y las pérdidas de la misma se pueden calcular haciendo el balance de energía en la cámara de vapor.

Ilustración 39. Balance de energía en la cámara de vapor



Para el balance de energía es necesario partir de la siguiente ecuación, en la cual se incluye, la energía que ingresa al sistema, la energía que se genera, la energía que sale y la energía que se acumula.

$$\dot{E} + \dot{G} = \dot{S} + \dot{A}$$

$$\dot{Q} + \sum_{in} \dot{m} h + W = \sum_{out} \dot{m} h + \frac{dE}{dt}$$

El sistema no realiza ni recibe trabajo y solo presenta cambios en la energía interna. Además, la prueba se realiza sin alimentación de agua, entonces solo se tiene la salida de masa del vapor. Los flujos de calor considerados son el calor de la combustión y el calor de pérdida.

$$\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_p - \dot{m}_v * h_1 = \frac{d(Mu)}{dt}$$

En la primera parte de la prueba no hay cambio de fase, la masa de agua es constante, $du = C_p dT$ y $\dot{m}_v = 0$.

$$\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_p = C_p M \frac{dT}{dt}$$

Teniendo en cuenta el calor aportado por el combustible, se puede determinar la cantidad de calor que efectivamente es utilizado para calentar el agua. El resto del calor se utiliza para calentar los componentes del equipo o es disipado al ambiente.

$$\dot{Q}_p = \dot{m}_c * PCI - MC_p \frac{dT}{dt}$$

$$n = \frac{MC_p \frac{dT}{dt}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{MC_p \frac{dT}{dt}}{\dot{m}_c * PCI}$$

Donde:

\dot{Q}_{in} : Calor que entra a la cámara de vapor [W]

M : Masa total de agua alimentada a la caldera [kg]

\dot{Q}_p : Calor perdido en la cámara de vapor [W]

C_p : Calor Específico [kJ/kg.K]

$\frac{dT}{dt}$: Variación de la temperatura con respecto al tiempo [K/s]

n : Eficiencia de la caldera [%]

Se llevaron a cabo un total de 3 pruebas, en todas se utilizó gas propano, y en una de ellas se utilizó cáscara de Jatropha, inmediatamente la caldera alcanzó el estado estacionario.

Tabla 13. Gas propano consumido

| PARAMETRO | VALORES | UNIDADES |
|------------------------|-----------|-------------------|
| VOLUMEN DE GAS (USADO) | 38.5 | litros |
| | 0.0385 | m ³ |
| TIEMPO PRUEBA | 35 | min |
| | 2100 | s |
| DENSIDAD GAS | 1.58 | kg/m ³ |
| FLUJO MASICO | 2.897E-05 | kg/s |

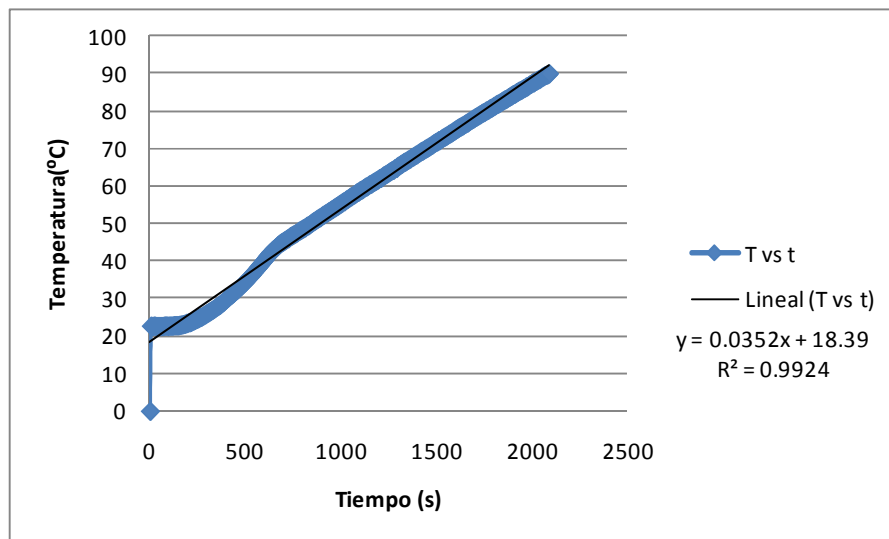
En esta primera parte de la prueba se realizaron ensayos usando como combustible el gas propano con el fin de mirar el desempeño de la caldera.

Tabla 14. Propiedades del gas propano

| PROPIEDADES DEL COMBUSTIBLE | | |
|-----------------------------|---------|-------------------|
| VARIABLE | VALORES | UNIDAD |
| MASA MOLAR | 44.097 | kg/kmol |
| DENSIDAD | 1.58 | kg/m ³ |
| PODER CALORIFICO INFERIOR | 46340 | kJ/kg |

(Cengel, et al., 2009)

Ilustración 40. Variación de la temperatura vs tiempo sin cambio de fase



La pendiente de la línea recta representa la variación de la temperatura con respecto al tiempo, esta variación es del 0.0355 K/s. La variación representa el tiempo que necesitan los tubos de calor en calentar el agua de la cámara de vapor.

Tabla 15. Resultados pérdidas de calor y eficiencia

| RESULTADOS | | |
|-----------------------------|----------|-----------|
| FLUJO MASICO DE COMBUSTIBLE | 2.90E-05 | kg/s |
| PODER CALORIFICO INFERIOR | 46340 | kJ/kg |
| MASA DE AGUA (M) | 2.5 | kg |
| CALOR ESPECIFICO DEL AGUA | 4.22 | kJ/kg * K |
| dT/dt | 3.55E-02 | K/s |
| PERDIDAS DE CALOR | 967.79 | W |
| POTENCIA UTIL | 374.525 | W |
| EFICIENCIA | 27.90 | % |

Aunque la eficiencia es considerablemente baja entre el proceso de calentamiento del agua desde temperatura ambiente hasta la temperatura limite después de la cual se inicia el cambio de fase, no se puede afirmar que el equipo es ineficiente, lo único que se puede afirmar es que es necesario un tiempo relativamente alto para lograr el cambio de fase producto del calor generado por la caldera.

7.3.4.3 Balance de energía con cambio de fase

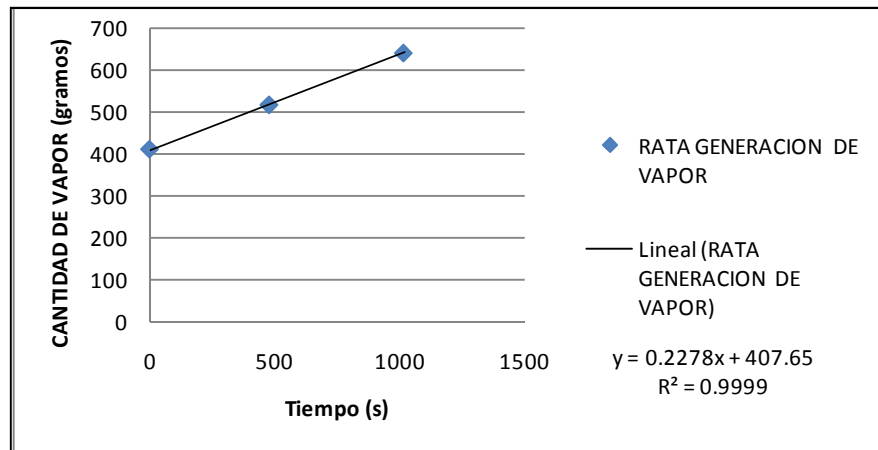
- Rata de generación de vapor usando gas propano

La rata de generación de vapor se puede medir condensando el vapor que sale de la caldera con un condensador, o con otros equipos mucho más sofisticados. En esta prueba se utilizo únicamente gas propano.

Ilustración 41. Condensador



Ilustración 42. Rata de generación de vapor con gas propano



La rata de generación de vapor de la caldera es de 0.2278 g/s (820.8 g/h).

- Conservación de energía en la cámara de vapor usando gas propano.

En la cámara de vapor hay dos etapas en las cuales hay consideraciones que afectan de manera directa las ecuaciones de energía. El fenómeno causante de

estas dos etapas es el cambio de fase. Para esta prueba se utilizó únicamente gas propano con el fin de conocer la operación de la caldera.

Para la etapa en la cual ocurre cambio de fase es necesario partir de la siguiente ecuación para la conservación de energía:

$$\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_p - \dot{m}_v h_1 = \frac{d(Mu)}{dt}$$

Sin embargo ahora se hace necesario realizar un balance de masa partiendo de la siguiente ecuación:

$$\dot{E} + \dot{G} = \dot{S} + \dot{A}$$

Donde:

\dot{E} : Masa entra que entra al sistema

\dot{G} : Masa que se genera en el sistema

\dot{S} : Masa sale del sistema

\dot{A} : Masa que se acumula en el sistema

Lo anterior se considera como flujos de masa en la cámara de vapor durante la prueba.

Pero a la cámara de vapor no le está ingresando masa y tampoco se está generando masa a interior de la cámara de vapor, razón por la cual los términos del lado izquierdo de la ecuación se hacen cero. Entonces se obtiene la siguiente ecuación:

$$0 = \dot{m}_v + \frac{dM}{dt}$$

Al despejar se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{dM}{dt} = -\dot{m}_v$$

Ahora, asumiendo que la presión y la temperatura en la cámara de vapor se estabilizan. Se puede considerar que la energía interna específica de la masa de agua en la cámara de vapor es constante e igual al valor de la energía interna del líquido a 20psi.

$$u = \text{Constante}$$

Lo cual sumado a la relación inmediatamente anterior y siendo reemplazado en la ecuación de conservación de energía, es posible obtener la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_p = \dot{Q}_{in} - \dot{m}_v h_v - u_f \frac{dM}{dt}$$

En donde al reemplazar se obtiene:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_p &= \dot{Q}_{in} - \dot{m}_v h_v + u_f \dot{m}_v \\ \dot{Q}_p &= \dot{Q}_{in} - \dot{m}_v h_v + \dot{m}_v (u_f - h_v)\end{aligned}$$

Donde:

\dot{m}_v : Flujo Masico de Vapor [kg/s]

h_v : Entalpia del vapor generado a la temperatura de estabilización [kJ/kg]

u_f : Energía interna del fluido a la temperatura de estabilización [kJ/kg]

La eficiencia térmica de la caldera se determina con la siguiente ecuación:

$$n = \frac{P_u}{\dot{Q}_{in}} \times 100\%$$

La potencia útil es realmente el calor que se está transfiriendo de la combustión a los tubos, por lo tanto:

$$n = \frac{\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_p}{\dot{Q}_{in}} \times 100\% =$$

Realizando los cálculos con las ecuaciones y consideraciones expuestas anteriormente se obtienen los resultados que se exponen en cada una de las tablas siguientes.

Tabla 16. Consumo de gas en cambio de fase

| PARAMETRO | VALORES | UNIDADES |
|------------------------|-----------|-------------------|
| VOLUMEN DE GAS (USADO) | 16 | litros |
| | 0.016 | m ³ |
| TIEMPO PRUEBA | 17 | min |
| | 1020 | s |
| DENSIDAD GAS | 1.58 | kg/m ³ |
| FLUJO MASICO | 2.478E-05 | kg/s |

En la tabla anterior se muestra la información obtenida en la etapa en la cual hay cambio de fase en cuanto al consumo de combustible desde que se inicia el proceso de evaporación al interior de la cámara de vapor, hasta que se logra llegar a un estado relativamente estacionario. Los dos primeros datos fueron datos tomados al momento de realizar los ensayos y los últimos datos corresponden a valores calculados, de acuerdo a los datos obtenidos de manera experimental.

Tabla 17. Pérdidas de calor y eficiencia en cambio de fase

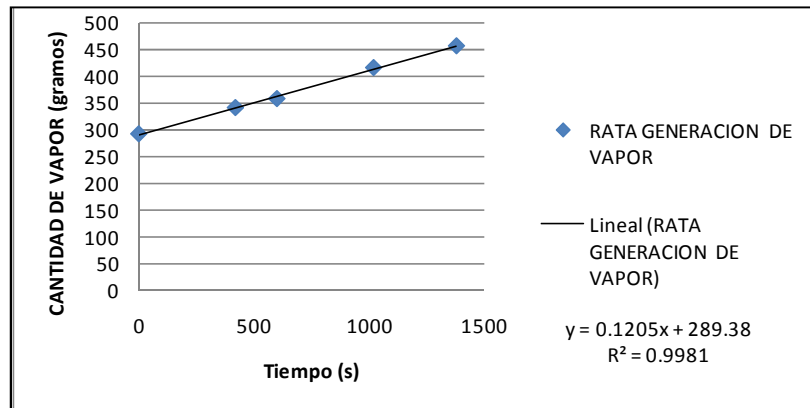
| RESULTADOS | | |
|-----------------------------|----------|-------|
| FLUJO MASICO DE COMBUSTIBLE | 2.48E-05 | kg/s |
| PODER CALORIFICO INFERIOR | 46340 | kJ/kg |
| RATA GENERACION DE VAPOR | 2.28E-04 | kg/s |
| ENERGIA INTERNA DEL FLUIDO | 503.7 | kJ/kg |
| ENTALPIA DEL VAPOR | 2706.3 | kJ/kg |
| PERDIDAS DE CALOR | 646.31 | W |
| POTENCIA UTIL | 502.19 | W |
| EFICIENCIA | 43.73 | % |

La eficiencia de la caldera en estado estacionario es baja, y la potencia efectiva apenas es de 502.19 W, lo cual quiere decir que cada tubo esta transfiriendo 26W, eso quiere decir que los tubos están trabajando al 50%.

- Rata de generación de vapor usando cáscara de Jatropha

Se utilizaron las mismas herramientas para medir la cantidad de vapor generada cuando se usa cáscara de Jatropha.

Ilustración 43. Rata de generación de vapor con cáscara de Jatropha



- Conservación de energía en la cámara de vapor usando cáscara de Jatropha

Para realizar esta prueba se realizó el procedimiento usado en las pruebas anteriores hasta lograr el cambio de fase en la cámara de vapor. A partir de este punto, se retiró la alimentación de gas a la caldera, para proceder a alimentar de manera manual cáscara de Jatropha en la parrilla ubicada en la parte inferior de la cámara de combustión.

En este punto se inicia el proceso de combustión de la cáscara de Jatropha usando como combustible el gas. El gas fue usado como iniciador de combustión, éste es retirado tiempo después, dejando como combustible de alimentación de la caldera la cáscara de Jatropha. Cabe anotar que en este punto del ensayo se utiliza un secador industrial, el cual tiene una potencia máxima aproximada de 800 W, con el objetivo de ingresar aire caliente para mantener la combustión a medida que se alimentaba la parrilla con cáscara de cáscara de Jatropha sin quemar.

Las ecuaciones para determinar las pérdidas de calor y la eficiencia de la caldera difieren un poco, porque es un balance de energía global.

En este ensayo, la cáscara de Jatropha no fue usada para realizar la etapa de calentamiento del agua en la cámara de combustión, entre la temperatura ambiente y la temperatura a la cual se logra el inicio del cambio de fase. Es decir, sólo se utilizó para la segunda etapa, con lo cual se puede obtener la eficiencia de la cáscara de caldera para continuar con el proceso de producción de vapor

Con los datos obtenidos en la prueba de operación con Jatropha se pueden realizar los siguientes cálculos que dan como resultado la eficiencia de este proceso de combustión.

Para lo cual es necesario realizar un balance de energía, representado en la siguiente ecuación:

$$Q - W + \sum_{in} mh - \sum_{out} mh = E_{final} - E_{inicial}$$

De la cual se obtiene:

$$Q_{in} - Q_p - m_v \bar{h}_v = m_{final} u_{final} - m_{inicial} u_{inicial}$$

Donde:

Q_{in} : Calor de Entrada [kJ]

Q_p : Calor Perdido [kJ]

m_v : Masa de vapor generada [kg]

\bar{h}_v : Entalpia promedio durante la prueba con cáscara de jatropa [kJ/kg]

n : Eficiencia de combustión [%]

m_{final} : Masa de agua después de finalizar el proceso de calentamiento con cáscara de Jatropa [kg]

$m_{inicial}$: Masa de agua después de finalizar el proceso de calentamiento con gas propano [kg]

u_{final} : Energía interna del fluido a la temperatura final del proceso de calentamiento con cáscara de Jatropa [kJ/kg]

$u_{inicial}$: Energía interna del fluido a la temperatura final del proceso de calentamiento con gas propano [kJ/kg]

Ahora despejando se obtiene la siguiente ecuación para el calor perdido:

$$Q_p = Q_{in} - m_v \bar{h}_v - m_{final} u_{final} + m_{inicial} u_{inicial}$$

Para resolver la ecuación anterior es necesario hallar el calor de entrada, el cual se puede hallar mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{in} = m_c PCI + \dot{W} \Delta t$$

Donde:

Q_{in} : Calor de Entrada [kJ]

m_c : Masa neta de cáscara de Jatropha [kg]

PCI : Poder Calorífico Inferior de la jatropha [kJ/kg]

\dot{W} : Potencia ingresada al sistema por el soplador industrial [W]

Δt : Intervalo de tiempo durante el cual se realizó la prueba con cáscara de Jatropha [s]

Con el calor de entrada hallado, ya se hace posible cuantificar el calor perdido y por ende la eficiencia obtenida en el proceso de combustión. Para lo cual se usa la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{Q_{in} - Q_p}{Q_{in}}$$

Los valores de masas obtenidos en la prueba de operación con cáscara de Jatropha, se observan en la tabla.

Tabla 18. Valores de masas obtenidas con Jatropha

| Descripción | Masa | Unidad |
|----------------------|------|--------|
| Carga de Agua | 2.5 | kg |
| Condensados (1) | 0.18 | kg |
| Condensados (2) | 0.54 | kg |
| Bruta de Jatropha | 0.26 | kg |
| Pérdidas Jatropha | 15 | % |
| Efectiva de Jatropha | 0.22 | kg |

Para obtener un valor de entalpia promedio del vapor durante del proceso de evaporación como causa de la combustión de la cáscara de Jatropha, es necesario realizar un promedio de temperatura en el intervalo de tiempo que se realizo la prueba.

Tabla 19. Temperatura promedio cámara de vapor

| Número | Temperatura | Unidad |
|----------------------|-------------|--------|
| Temperatura 1 | 123 | °C |
| Temperatura 2 | 124 | °C |
| Temperatura 3 | 125.1 | °C |
| Temperatura 4 | 120 | °C |
| Temperatura 5 | 118.5 | °C |
| Temperatura 6 | 110 | °C |
| Temperatura 7 | 105.9 | °C |
| Temperatura Promedio | 118.1 | °C |

Los combustibles que aportaron la energía necesaria para evaporar el agua de la cámara de vapor son la cáscara de Jatropha, y fue necesario el uso de un secador industrial, cuyos aportes energéticos se ilustran en la tabla.

Tabla 20. Datos energéticos del combustible

| DESCRIPCION | VALOR | UNIDAD |
|---------------------------|-------|--------|
| Poder Calorífico inferior | 14900 | kJ/kg |
| Delta de tiempo | 1080 | s |
| Potencia efectiva secador | 0.27 | kW |

Ilustración 44. Secador industrial



El secador industrial aporta energía al proceso de combustión, lo cual ayuda a calentar los tubos de calor, y a mantener la temperatura de la llama.

Después de realizar los cálculos basados en las ecuaciones anteriormente deducidas y en los datos obtenidos durante la prueba, se puede encontrar la eficiencia de la caldera, el calor perdido y el calor útil. Los resultados son los siguientes:

Tabla 21. Desempeño de la caldera con cáscara de Jatropha

| Descripción | Valor | Unidad |
|-------------------------|---------|--------|
| Calor de Entrada | 3531.28 | KJ |
| Masa de Vapor | 0.36 | Kg |
| Entalpía Promedio | 2706.30 | KJ/Kg |
| Masa Final de Agua | 1.96 | kg |
| Energía Interna Final | 440.00 | KJ/Kg |
| Masa Inicial de Agua | 2.32 | kg |
| Energía Interna Inicial | 503.50 | KJ/Kg |
| Calor Perdido | 2855.78 | KJ |
| Eficiencia | 19.13 | % |

La eficiencia térmica de la caldera es menor a pesar de ingresar una segunda fuente de energía al sistema, secador industrial. La ventaja del combustible sólido es la generación de un mayor calor de radiación que el gas.

- Análisis de gases

Al realizar pruebas de funcionamiento de la caldera se realizaron mediciones directas de los gases obtenidos como resultado de los procesos de combustión; con gas propano como combustible principal y con Jatropha.

Estas mediciones fueron realizadas con un equipo electrónico el cual mediante una sonda de registro, ubicada a la salida de la chimenea, daba como resultados,

entre otros, los gases producidos por el proceso de combustión, la temperatura de salida de estos gases, las partes por millón y la relación aire combustible.

Tabla 22. Análisis de gases (Gas Propano)

| | Prueba 1 | Prueba 2 | Prueba 3 |
|-------------------------------|----------|----------|----------|
| CO2 (%) | 4.5 | 5.2 | 4.5 |
| Exceso de aire | 226.2 | 175 | 190.2 |
| Temperatura de los gases (°C) | 130.6 | 123 | 120 |
| Eficiencia | 82 | 83.9 | 83.9 |
| Temperatura ambiente (°C) | 24 | 24 | 24 |
| Oxígeno (%) | 14.6 | 13.5 | 13.9 |
| CO (PPM) | 40 | 18 | 18 |

La tabla ilustra el análisis de los gases cuando el equipo estaba operando con gas propano, como se puede ver en la tabla anterior entre menor es el exceso de aire, mayor es el porcentaje de CO₂ generado y la eficiencia, pero también se puede ver que a causa del mismo fenómeno se obtiene menos oxígeno y menos partes por millón.

Tabla 23. Análisis de gases (Cáscara de Jatropha)

| | Prueba 1 | Prueba 2 | Prueba 3 |
|-------------------------------|----------|----------|----------|
| CO2 (%) | - | - | - |
| Exceso de aire | - | - | - |
| Temperatura de los gases (°C) | 77 | 110 | 88 |
| Eficiencia | - | - | - |
| Temperatura ambiente (°C) | 28 | 42 | 42 |
| Oxígeno (%) | 20 | 18 | 19 |
| CO (PPM) | 1522 | 1519 | 1519 |

Como se observa en la Tabla 23 la combustión de cáscara de Jatropha arroja al ambiente una cantidad bastante considerable de partes por millón de CO y un porcentaje levemente superior para el caso del oxígeno, en comparación con los

resultados obtenidos con la combustión con gas propano de las pruebas anteriores.

Cabe anotar que para el caso de Jatropha en las casillas que no presentan valores, corresponde a valores que el equipo muestra en comparación con las características del combustible, pero para el caso de la Jatropha el equipo no tiene un valor base con el cual pueda comparar.

Ilustración 45. Combustión cáscara de Jatropha



8 CONCLUSIONES

Se diseña, fabrica y prueba un prototipo de caldera de baja potencia que utiliza como combustible cáscara de *Jatropha Curca*, y cuyo mecanismo de transferencia de calor son los tubos de calor. Este equipo tiene la ventaja de poder utilizar distintos tipos de combustibles (sólidos y gaseosos) e inclusive otras fuentes de energía como resistencias eléctricas o gases calientes producto de otros procesos.

El diseño de un equipo parte del conocimiento del funcionamiento de este, del estado del arte y de las variaciones que de este se puedan hacer para hacerlo más eficiente. Se resalta la importancia del diseño de detalle, en aspectos como sellos, acoples y sistemas de ensamble.

Las aplicaciones del vapor en la industria son muchas, desde la generación de energía con turbinas, hasta el uso en telares (tintorería). Pero es un recurso que también puede ser aprovechado a nivel doméstico reemplazando otras fuentes energéticas. Especialmente en los casos en los que se requiera energía térmica (calentamiento, cocción y lavado)

La *Jatropha* es una planta que produce granos del cual se pueden obtener dos subproductos, el albúmen y la cáscara. El primero ya tiene una aplicación específica para la producción de biodiesel, y el segundo puede ser usado como un combustible de procesos de combustión. La decisión de cáscara de *Jatropha* como combustible para la *Jatropha* está basada básicamente en dos argumentos; el primero es la capacidad calorífica disponible en este recurso, y el segundo fue el aprovechamiento de un subproducto del ciclo productivo de este grano, con lo cual se logra añadir una ventaja económica a los procesos actuales que involucran a este grano como materia prima.

El modelo de cálculo pese a que aporta un dimensionado de la caldera, se desarrolla bajo condiciones ideales, sin tener en cuenta factores que afectan el funcionamiento del equipo. Estos cálculos se basan en temas de transferencia de calor, termodinámica y en resistencia de materiales. Desde el punto de vista del diseño el equipo puede soportar presiones de 150psi en la cámara de vapor con un factor de seguridad de 3.6. Además, las pérdidas de calor estimadas por los aislamientos son menores al 5%.

El principal parámetro para la selección del aislamiento térmico es la temperatura superficial del elemento que se desea aislar. Las cañuelas de fibra de vidrio son elementos que vienen estándar para tuberías comerciales, estas generalmente tienen espesor de 1 o de 2 pulgadas. La fibra cerámica es otro tipo de aislamiento térmico con propiedades mejores que la cañuela de fibra de vidrio y que soporta mayores temperaturas; sin embargo, esta sufre compresión durante el montaje, incrementando su conductividad térmica. Se decide utilizar fibra de vidrio para aislar la cámara de vapor y fibra cerámica para aislar la cámara de combustión.

El costo de la fabricación de una caldera puede reducirse sustancialmente si se piensa en elementos comerciales, en los cuales se puede evitar la manufactura de piezas que requieran de procesos de fabricación complejos.

Para realizar pruebas de operación de equipos que usan gases, es necesario tener sumo cuidado con el control de hermeticidad de cada uno de los componentes, uniones y sistemas, con el fin de evitar accidentes y ofrecer mejores niveles de confiabilidad en los resultados obtenidos.

Los empaques fabricados con asbesto pese a sus excelentes propiedades de resistencia a la presión y a la temperatura, pero es un material que puede generar complicaciones en la salud de los humanos. Además, que por ser un material

rígido el sello no es tan bueno. Los sellos de asbesto tan solo permiten una compresión de apenas el 7%, el *Tefseal* es más recomendado para rellenar los espacios entre bridas.

La realización de subensambles de accesorios antes de ensamblarlos al equipo es muy importante porque garantizan un correcto ajuste entre ellas. Además, que se garantiza que ambas sean apretadas con el mismo torque.

Las pinturas anticorrosivas líquidas son adecuadas para recubrir superficies metálicas, siempre y cuando, estas no estén en contacto permanente con agua. Para proteger superficies ferrosas en contacto permanente con este fluido, se recomienda pinturas en polvo horneables.

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.

La eficiencia de la caldera para la primera etapa del proceso de funcionamiento, es decir, la etapa en la cual se sube la temperatura desde la temperatura ambiente hasta obtener el cambio de fase, es baja. Pero este valor no es una dato diciente del comportamiento de la caldera, porque en esta se requiere realizar un cambio de temperatura relativamente alto del fluido. Además, es en esta etapa el calor liberado en la combustión es utilizado para aumentar la temperatura del agua, y la temperatura de las partes que componen el cuerpo de la caldera; y parte es liberado al ambiente como pérdidas térmicas.

La eficiencia térmica de la caldera se ve afectada de manera directa por las pérdidas del proceso de combustión, y ésta a su vez se ve afectada por el área disponible para la transferencia de calor y el aprovechamiento de la misma. Esto último es un punto para evaluar en trabajos futuros, porque posiblemente cambiando el quemador por otro que garantice una distribución de calor sobre toda el área disponible de transferencia de calor, se traducirá en mejoramiento de los niveles de eficiencia de la caldera.

Analizando los datos tomados por las pruebas se deduce que las pérdidas de calor por conducción a través de los aislamientos son bajas. Además, en el caso de operación con gas propano la eficiencia de combustión es alta. Sin embargo, la eficiencia global del equipo es moderada e inferior a las eficiencias esperadas de calderas comerciales. Se infiere que se están presentando pérdidas de calor importantes por radiación en la parte inferior del equipo, es decir, en el hogar. Se requiere mejorar el diseño del hogar y posiblemente implementar una placa reflectiva en la parte inferior o considerar un hogar cerrado.

Cuando se realizan ensayos con cáscara de *Jatropha* como combustible se obtienen eficiencias menores. También, se incrementa el contenido de monóxido de carbono en los gases de combustión. Esto indica que la combustión no se está realizando de manera adecuada y no se está aprovechando completamente el potencial energético del combustible.

En las pruebas con cáscara de *Jatropha* usada como combustible para la etapa en la cual ya se ha iniciado el cambio de fase se observa que la presión cae notoriamente y todas las temperaturas en el equipo se reducen. Es decir, que con este combustible la caldera tiene un régimen de operación diferente y genera vapor de más baja presión. Para obtener presiones más altas es necesario mantener temperaturas más altas en el hogar.

9 RECOMENDACIONES

Cuando se vayan a fabricar *flanges* o bridas especiales se deben maquinar estos elementos con surcos o laberintos para que cuando se instale algún tipo de empaquetadura, el sellado sea adecuado.

Es importante realizar procedimientos de ensamble que permitan garantizar el buen ajuste, la adecuada ubicación y la distribución de los componentes que hacen parte de estos equipos.

Evitar los empaques de asbesto para el sellado entre bridas, por su pobre propiedad de compresión menor al 7%, y por los problemas de salud que puede generar al ser manipulado.

Pintar las superficies metálicas en contacto permanente con el agua con pinturas en polvo hornearables. Para aquellas superficies metálicas que vayan estar en contacto con el ambiente, y de vez en cuando con agua se puede pintar con pinturas anticorrosivas líquidas.

Una caldera debe siempre llevar indicador de nivel de agua. Por tal motivo siempre que se requiera este elemento es mejor seleccionar un nivel comercial que está diseñado para soportar altas presiones de vapor y temperaturas. Además, que su montaje es mucho más sencillo que el diseño de un nivel propio. Sin embargo si se dispone de presupuesto suficiente es preferible utilizar un dispositivo de medición y control automático.

Para las calderas que utilicen combustibles sólidos, se debe seleccionar un alimentador continuo, para garantizar una combustión correcta y sostenida. Además, se debería colocar una corriente de aire caliente inducida.

Para trabajos futuros se debe pensar en mejorar la eficiencia de la caldera, usando hogares cerrados, ya que con estos se puede garantizar que el calor de radiación puede ser aprovechado para calentar los tubos de calor.

El éxito de futuros proyectos en los cuales se piense trabajar como combustible cascara de *Jatropha*, requieren de un conocimiento profundo para saber las mejores condiciones de combustión de la cascara de *Jatropha*. Se puede pensar en lecho fluidizado para la combustión de la misma.

La selección de los tornillos para los *flanges* o bridas es un paso muy importante para garantizar que al apretar los tornillos, las bridas no se pandeen, y para que la presión se distribuya uniformemente sobre todos los tornillos.

10 BIBLIOGRAFIA

ACERCAR@. 2003. Ventanilla de asistencia técnica ambiental para Mipyme. [En línea] 14 de 08 de 2003. <http://www.acercar.org.co/industria/biblioteca/eventos/docs/14082003/termica.pdf>.

—. 2007. Ventanilla de asistencia técnica ambiental para Mipyme. [En línea] Julio de 2007. [Citado el: 05 de Abril de 2010.] http://www.acercar.org.co/industria/biblioteca/memorias_2007/introduccion_generalidades.pdf.

Agua Market@. 2010. www.aguamarket.com. [En línea] 2010. [Citado el: 12 de 02 de 2010.] <http://www.aguamarket.com/diccionario/terminos.asp?Id=3050&termino=Caldera>.

ALZATE, Catalina. 2008. *Producción de Aceite para Biodiesel a partir de Jatropha Curca*. Medellín : s.n., 2008.

Babcock Power@. 2010. www.babcockpower.com. [En línea] 2010. [Citado el: 02 de 03 de 2010.] <http://www.babcockpower.com/pdf/rst-137a.pdf>.

Ballesteros, Mercedes. 2001. *La biomasa como fuente de energía: biocombustibles*. s.l. : Universidad de Salamanca, 2001.

Biocombustibles: la agricultura al servicio del automóvil. El Ecologista. Estevan, Antonio. 2008. ISSN 1575-2712, 2008, Vol. 56.

BIODISOL@. 2010. BIODISOL. [En línea] 2010. <http://www.biodisol.com/biodiesel-que-es-el-biodiesel-definicion-de-biodiesel-materias-primas-mas->

comunes/jatropha-curcas-physic-nut-pinhao-manso-tempate/100-motivos-para-plantar-jatropha-curcas-pinhao-manso/.

CAURIUM-SISTEMAS@. 2010. Curso de Instalaciones termicas. [En línea] 2010. http://www.caurium.com/clientes/rite2008/mod_002/unid_007a_000.html.

Ceballos, Aracelly Vahos. 1990. Parametros y criterios para el aseguramiento de calderas. [Tesis de grado]. Medellín : s.n., 1990. pág. 240.

CECU@. 2010. www.cecucolombiana.com. [En línea] 2010. [Citado el: 18 de 03 de 2010.] <http://www.cecucolombiana.com/campanas/medio%20ambiente/res&rue/htm/dossier/5%20biomasa.htm>.

Cengel, Yunus A y Boles, Michael A. 2009. *TERMODINAMICA*. Sexta. s.l. : Mc Graw Hill, 2009. ISBN 978 970 10 7286 8.

Cobre@. 2010. Cobre. *Información sobre el cobre*. [En línea] Septiembre de 2010. [Citado el: 21 de Septiembre de 2010.] <http://www.cobre.biz/>.

COLBIO@. 2008. Colombiana de Biocombustibles. [En línea] 2008. <http://www.colbio.com/pinon2.htm>.

Colombia Sin hambre@. 2010. www.colombiasinhambre.com. [En línea] 2010. [Citado el: 12 de 03 de 2010.] http://www.colombiasinhambre.com/proyectos_detalle.php?idb=81.

CONTROLES@. 2010. Controles. [En línea] Agosto de 2010. <http://www.controles.com.uy/espanol/Automatismos/pdf/contdenivel/CN4.pdf>.

CONUEE@. 2007. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. [En línea] Mayo de 2007. [Citado el: 5 de Abril de 2010.] <http://www.conae.gob.mx/wb/>.

ECD@. 2006. El Comercio Digital. [En línea] Mayo de 2006. <http://www.elcomerciodigital.com/pg060514/prensa/noticias/Portada/200605/14/GI-J-ACT-201.html>.

ECOCARBON. 1998. *Calderas a carbón*. Medellín : s.n., 1998. ISBN 958696017X.
FAGHRI, Amir. 1995. *Heat pipes science and technology*. Nueva York : Taylor & Francis, 1995. 1560323833.

Fernandez@, Jorge Felix. 2010. Maquinas termicas. [En línea] 2010. http://www.edutecne.utn.edu.ar/maquinas_termicas/01-poder_calorifico.pdf.

FiberGlass-Colombia@. 2010. Fiber Glass Colombia. [En línea] 2010. [Citado el: 27 de Septiembre de 2010.] <http://www.fiberglasscolombia.com/>.

GAZE@. 2010. Gestión de Ambientes Zero Emisiones. [En línea] 2010. <http://www.eafit.edu.co/eafitcn/vidaEstudiantil/gaze/index.shtm>.

Hibbeler, R. C. 2006. *Mecanica de materiales*. SEXTA EDICION. s.l. : Pearson Education, 2006. ISBN 970-26-0654-3.

Kreith, Frank y Bohn, Mark S. 2001. *Principios de transferencia de calor*. Sexta Edicion. Mexico DF : Thomson Learning, 2001. ISBN 970-686-063-0.

KWB@. 2005. KWB - Biomass Heating Systems. [En línea] 2005.

La biosfera entre la termodinámica y el juego. Margalef, Ramón. 1980. ISBN 84-282-0585-X, Barcelona : Omegas, 1980.

La-llave@. 2009. Boletín Técnico la Llave. [En línea] Junio de 2009. <http://www.leer-mas.com/lallave/news10/diagnostico.php>.

Manuel, Naredo. José. 1999. *Desarrollo económico y deterioro ecológico*. Madrid : Fundación Argentaria y Visor Distrib, 1999.

Mira, Carolina. 2007. Diseño, construcción y prueba de un prototipo de calentador solar de agua con tubos de calor. *Tesis*. 2007.

NUTEC-FIBRATEC@. 2010. Nutec - Fibratec. [En línea] Septiembre de 2010. <http://nutecfibratec.com/pdf/fibra/spunceramicfiberblanket.pdf>.

Palacio, Carlos. 2009. *Producción Biodiesel a partir de Jatropha*. [entrev.] SIETE. Medellín, Marzo de 2009.

PETERSON. 1994. *An introduction to heat pipes modeling, Testing and Applications*. Nueva York : John Wiley & Sons, 1994. ISBN 0-471-30512-X.

Potter, Merle C y Scott, Elaine P. 2006. *Termodinámica*. PRIMERA EDICION. México D.F : THOMSON, 2006. ISBN 970-686-595-9.

RAE@. 2008. Real Academia Española. [En línea] 29 de Enero de 2008. http://buscon.rae.es/draeI/SrvltConsulta?TIPO_BUS=3&LEMA=biomasa.

San José@, Ricardo García. 2001. REDENERG. [En línea] 2001. [Citado el: 5 de Abril de 2010.] <http://www.energia.inf.cu/iee-mep/SyT/CDG/Taller1BURE/QUEMADORES.PDF>.

Sanz@, Alberto de la Sen, Marcos, Salvador Galván y Lino, José Bielza. 2000. *Scribd*. [En línea] 21,22 y 23 de Noviembre de 2000.

<http://www.scribd.com/doc/24180101/Calderas-Control-Y-Seguridades-de-Calderas>.

SEALCO@. 2010. Sealco. *Juntas de Compresión*. [En línea] 2010. [Citado el: 28 de Septiembre de 2010.] <http://www.cisealco.com/contenido/archivosPDF/productos/SelladoEstatico/laminas.pdf>.

Shield, Carl D. 1982. *Calderas. Tipos, Características y sus Funciones*. s.l. : McGRAW-HILL, 1982. pág. 716.

Shigley, Joseph E. y Mischke, Charles R. 2005. *Diseño en ingeniería mecánica*. México DF : Mc Graw Hill, 2005. ISBN 970-10-3646-8.

SILVERSTEIN, calvin C. 1992. *Design and Technology of Heat Pipes for Cooling and Heat Exchange*. Nueva York : Taylor & Francis, 1992. ISBN: 0-89116-859-1.

Textos Científicos@. 2010. www.textoscientificos.com. [En línea] 2010. [Citado el: 10 de 03 de 2010.] <http://www.textoscientificos.com/energia/biomasa>.

THIBAUT. 1974. *Mecánica Aplicada*. Barcelona : s.n., 1974. págs. ISBN 84-7186-232-8.

TLV@. 2010. Compañía Especialista en Vapor. [En línea] 2010. [Citado el: 11 de Abril de 2010.] <http://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/types-of-steam.html>.

UNIVERSITAT JAUME I@. 2010. Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción. [En línea] 2010. <http://www.emc.uji.es/asignatura/obtener.php?letra=3&codigo=59&fichero=1086018838359>.

11ANEXOS