

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**

**Diseño y construcción de un generador de aire caliente con residuos  
de palma africana.**

**Diego Iván Céleri Calle**

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de Ingeniero Químico

Quito, Septiembre de 2008

**Universidad San Francisco de Quito  
Politécnico**

**HOJA DE APROBACION DE TESIS**

**Diseño y construcción de un generador de aire caliente con residuos de  
palma africana**

**Diego Iván Célleri Calle**

Dr.-Ing. Daniela Almeida  
Directora de tesis

---

Ing. Cesar León  
Miembro del Comité de Tesis

---

Ing. Marcelo Albuja, MSc.  
Miembro del Comité de Tesis

---

Dr. Fernando Romo, MSc.  
Decano del Politécnico

---

©Derechos de autor (Copyright)

Diego Iván Célleri Calle

2008

## **Resumen**

El objetivo de este trabajo es la construcción de un prototipo de laboratorio para generación de aire caliente partiendo de la utilización de biomasa, cuescos de palma africana, como combustible.

Este estudio inició con la investigación de las bases teóricas para el diseñar del equipo y el dimensionamiento de sus componentes. Durante el diseño se tuvo que considerar aparte de la combustión y el intercambio de calor, las posibilidades mecánicas para el ensamblado y desmontado cada vez que sea necesario, ya sea para mantenimiento o para mejorar su desempeño y durante la construcción.

El siguiente paso después de la construcción del equipo es la puesta en prueba y la determinación de sus características de operación, las cuales pueden ser mejoradas en siguientes investigaciones ya que el equipo permanecerá en la universidad. Se deberá buscar alternativas para disminuir las perdidas de calor, las presiones de trabajo, las emisiones al ambiente, mejorar la relación costo-beneficio, etc.

## **Abstract**

The objective of this thesis is the construction of a laboratory prototype for the generation of hot air through the combustion of biomass (palm oil shells).

The first step during this study was the research of the basic theory for the design and dimensioning of the equipment and its components. Besides the combustion and the heat exchange considerations of the design, the mechanical facility to be assembled and disassembled every time of usage for maintenance or further improvement and for construction is crucial for the prototype.

After the hot air generator has been assembled. The next step was the testing of the prototype to determine the operational characteristics which must be improved on further studies. The equipment will be kept at the University campus for further investigations with the aim to decrease the heat losses, working pressures, environmental emissions and increase benefit-cost relation, etc.





## **1 Introducción**

El presente trabajo nace de la identificación de la necesidad de aunar los esfuerzos que se requiere para disminuir la dependencia energética de los combustibles fósiles. La comodidad de nuestra civilización sostenida en la ilimitada gama de posibilidades que nos ofrece el petróleo, y el acercamiento hacia el conocimiento de fuentes alternativas de energía, han despertado la inquietud de buscar aplicaciones a los recursos renovables que disponemos.

Adicionalmente de las oportunidades de negocios que se van a presentar en el futuro para sistemas de energía sustentables, la gran cantidad de residuos orgánicos presentes en los campos agrícolas del Ecuador, impulsaron a conocer más sobre procesos de generación de energía con biomasa en este trabajo.

Ante la situación presentada se tomó la decisión de diseñar y fabricar un prototipo de generador de aire caliente partiendo de la combustión de cuescos de palma africana, para que forme parte de los laboratorios de nuestra universidad.

En este trabajo se va a presentar el desarrollo para el diseño de un generador de aire caliente, como son los fundamentos teóricos y los cálculos pertinentes. A continuación se muestra el desarrollo de la construcción y los resultados obtenidos después de su puesta en marcha.

## **2 Fundamentos Teóricos**

Un generador de aire caliente es un equipo que libera energía y mediante intercambiadores de calor transfiere dicha energía al aire, elevando su temperatura. El aire caliente es requerido en procesos de secado y calefacción.

El generador de aire caliente básicamente libera energía mediante la combustión de combustibles como coque, gas natural, bunker, diesel, GLP, biomasa entre otros.

Un generador de aire tiene los siguientes componentes:

- Intercambiadores de calor
- Quemador
- Sistema de alimentación

- Sistema de ventilación
- Sistema de control

Los intercambiadores de calor son el lugar donde se transfiere el calor de combustión al aire a ser calentado.

El quemador es la cámara donde se quema el combustible alimentado. Es necesario asegurar el ingreso de aire para tener combustión.

El sistema de alimentación dosifica el ingreso de combustible al quemador.

Los sistemas de ventilación que se requieren son dos: uno para ingresar el aire de combustión al quemador y el segundo para generar el aire que circula por los intercambiadores de calor.

El sistema de control permite obtener la temperatura requerida del aire caliente.

## 2.1 Bases del diseño

Para el funcionamiento del generador de aire caliente diseñado en este trabajo se utiliza cuesco de palma africana como combustible.

La combustión es un proceso rápido de oxidación, el cual está dado por la combinación del oxígeno con cualquier material capaz de ser oxidado. Este proceso está acompañado por la difusión de calor y luz (Graham, Guide five 1845).

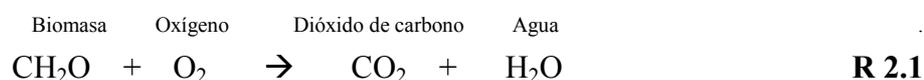
En este caso el proceso de combustión de biomasa, es el que interesa al proyecto.

Biomasa es materia formada por un proceso de fotosíntesis. Esto incluye madera, plantas verdes o materia animal (excrementos de animales), que pueda ser quemada directamente o ser transformada a otros combustibles. También se considera como biomasa a productos derivados del material biológico. Este es el caso de la caña de azúcar, de la cual se puede elaborar etanol, el cual mezclado con gasolina puede funcionar para combustible de vehículos (Fanchi, 395).

El combustible que se va a utilizar en el funcionamiento del generador de aire caliente, es el cuesco de palma africana, al cual se lo puede definir como biomasa.

El cuesco de palma africana es un residuo en el proceso de extracción de aceite y torta de palmiste.

La reacción química a llevarse a cabo es la que se muestra en la reacción R 2.1.



La reacción R 2.1, se da en el caso de una combustión completa.

Una combustión completa se da cuando el combustible reacciona con la mayor cantidad de oxígeno posible. Durante esta reacción un átomo de carbono con dos átomos de oxígeno para formar CO<sub>2</sub>. Como lo ilustra la reacción R 2.2 (Graham, Guide five 1857).



La combustión incompleta sucede cuando no hay suficiente oxígeno disponible para los átomos de carbono presentes en el combustible. Se mezcla un solo átomo de carbono con uno de oxígeno formando monóxido de carbono CO. Como se ilustra en la reacción R2.3.



El interés es de siempre tener una combustión completa por las siguientes razones:

- El calor de combustión brindado por la reacción de combustión completa R 2.2 es de  $3.4 \times 10^7 \frac{J}{kg}$ , mientras el calor de combustión brindado por la reacción de combustión incompleta R 2.3 es de  $1.0 \times 10^7 \frac{J}{kg}$ . La combustión completa produce 3.4 veces más calor (Fanchi, 397).
- El CO es un gas que produce mayor efecto invernadero que el CO<sub>2</sub>, debido a que tiene una mayor absorción de la radiación emitida en la región del infrarrojo (Spiro, 161).

En la práctica es necesario introducir aire de combustión en exceso, para asegurar la combustión completa. Se recomienda usar un El exceso de aire entre 40 y 60%. Con un exceso del 40% hay riesgo que no se complete totalmente la combustión del cuesco de palma africana. Por otro lado con un exceso mayor del 60% el interior del equipo se comienza a enfriar demasiado (Graham, Guide five 1921).

El cálculo del aire en exceso forma parte fundamental de los cálculos de diseño ya que va a indicar el tamaño del blower requerido, obviamente en base al tamaño del equipo y la alimentación de combustible por hora.

Los cálculos y consideraciones requeridos para el diseño se presentan a continuación. El diseño inicia con la definición de las suposiciones y la base para los cálculos iniciales, seguido por el cálculo de aire de combustión requerido y la selección del equipo de ventilación necesario.

Se continúa con el diseño de la parrilla, la cámara de combustión y la alimentación.

Seguido por los cálculos de transferencia de calor.

### 2.1.1 Suposiciones iniciales

- El combustible se quemará fácilmente en la parrilla del quemador al ingresar suficiente aire de combustión.
- El aire que circulará dentro de los intercambiadores de calor irá disminuyendo la velocidad debido a los efectos de fricción.
- La cámara de combustión debe soportar las temperaturas alcanzadas por la flama.
- El aire intercambia calor con las superficies calientes de los intercambiadores de calor.

### 2.1.2 Calculo teórico del aire de combustión requerido

La reacción de combustión completa de biomasa ya se ilustró en R 2.1.



Para realizar los cálculos necesarios para el dimensionamiento de los ventiladores, se debe determinar los pesos moleculares de los reactivos.

$$\text{Peso molecular de la biomasa (CH}_2\text{O)} = 30 \frac{\text{kg}}{\text{kgmol}}$$

$$\text{Peso molecular del oxígeno (O)}_2 = 32 \frac{\text{kg}}{\text{kgmol}}$$

En la relación estequiométrica 1 kgmol de biomasa necesita para llevar a cabo una reacción completa 1 kgmol de oxígeno.

Cabe recalcar que el aire de la atmósfera está compuesto por 22% de oxígeno, 78% de nitrógeno, trazas de CO<sub>2</sub> y otros compuestos. (Spiro, 21).

En la ecuación Eq. 2.1 se realiza el cálculo para la reacción de 1kgmol de biomasa y 1 kgmol de oxígeno, tomando en cuenta la cantidad real de oxígeno presente en el aire.

$$30 \text{ kg biomasa} \rightarrow 32 \text{ kg O}_2 * \frac{1 \text{ kg}_{\text{aire}}}{0.22 \text{ kg}_{\text{O}_2}} = 145.45 \text{ kg}_{\text{aire}} \quad \text{Eq. 2.1}$$

Por cada 30 kg de biomasa se requiere 145.45 kg de aire.

Para encontrar la cantidad de aire por kilogramo de biomasa simplemente se efectúa la división de la ecuación Eq. 2.2.

$$\text{Relación teórica aire/combustible} = \frac{145.45 \text{ kg}_{\text{aire}}}{30 \text{ kg}_{\text{biomasa}}} \quad \text{Eq. 2.2}$$

La relación teórica aire/combustible es de 4.85 kg de aire por uno de biomasa.

La capacidad de un ventilador o blower indicada por los fabricantes, está dada por el volumen de aire desplazado en un tiempo determinado. Las unidades más utilizadas son metros cúbicos hora ( $\frac{m^3}{h}$ ) y pies cúbicos por minuto (CFM).

Por lo tanto se calculará el volumen de aire requerido para combustionar un kilogramo de biomasa. Se trabajará con una densidad del aire de  $1.1614 \frac{kg}{m^3}$  (300K y 1 atmósfera). En la ecuación Eq. 2.3 se realizará la conversión para obtener el volumen de aire.

$$\text{Relación teórica aire/combustible} = 4.85 \frac{kg_{\text{aire}}}{kg_{\text{biomasa}}} * \frac{m^3_{\text{aire}}}{1.1614 kg_{\text{aire}}} \quad \text{Eq. 2.3}$$

La relación teórica en volumen de aire/combustible es de 4.17 metros cúbicos de aire por cada kilogramo de aire necesario en la combustión.

Sabiendo el consumo de aire teórico de combustión en un equipo determinado, su alimentación, el porcentaje en exceso de aire recomendado y el tamaño del equipo, se puede dimensionar el blower o ventilador que se requiere.

### 2.1.3 Equipos de ventilación

Al momento de escoger un ventilador es necesario tener en cuenta los siguientes factores:

- Flujo de aire de salida del ventilador
- Presión de salida del aire
- Limitaciones de temperatura
- Tipo de sellado
- Lubricación
- Consumo de energía
- Tipo de uso
- Costo

En este proyecto se va a utilizar ventiladores y blowers o sopladores, ya que un compresor se aplica cuando se requiere presiones de salida muy altas. La diferencia entre ventiladores y blowers o sopladores se presenta a continuación.

Ventiladores:

Los ventiladores aceptan gases con una presión cercana a la presión atmosférica y pueden elevar esa presión aproximadamente en un 3% o 12 pulgadas de agua (Couper, 137).

Sus aplicaciones principales son en trabajos de ventilación, para mover grandes flujos de aire que atraviesan ductos, en secadores, entre otras.

Blowers o sopladores:

Son maquinas que elevan la presión del aire a un nivel intermedio, usualmente menos de 40 psig, la presión obtenida es mayor a la de los ventiladores (Couper, 137).

#### **2.1.4 Diseño de la parrilla**

El trabajo del ventilador es importante para obtener buenos resultados de combustión, pero otro factor importante es el diseño de la parrilla porque de esta también depende la cantidad de aire que ingresa a la cámara de combustión y la distribución del combustible.

La parrilla es el lugar donde se asienta el material a ser combustionado. En este caso el cuesco de palma africana. La parrilla tiene que tener unos orificios donde pueda caer la ceniza e ingresar el aire de combustión.

Si la parrilla está mal diseñada, se puede tener el siguiente problema:

Si la forma de la parrilla no permite una correcta distribución del combustible, este se puede acumular en ciertos lugares impidiendo el paso del aire o la creación de canales de aire, el cual a su paso no encuentra combustible y ayuda a enfriar la cámara de combustión.

Por esta razón la parrilla debe tener suficientes orificios para permitir ingresar al aire correctamente.

Forma de la parrilla:

Es importante para determinar la forma de la parrilla de combustión de un equipo, asegurar una distribución uniforme del material a ser utilizado. La mayoría de la superficie de la parrilla tiene que estar accesible al momento de alimentar la parrilla.

Las formas más utilizadas para parrillas, son circulares, rectangulares y cuadradas.

##### a) Parrilla circular

La distribución del material es muy buena, porque no tiene esquinas que permita la acumulación excesiva de combustible o residuos. A diferencia de la parrilla rectangular no tiene lugares difíciles de acceder, facilitando la alimentación y

limpieza en la cámara de combustión. Es la única parrilla que por su forma puede rotar con algún dispositivo mecánico.

Es muy recomendable su utilización, sin embargo, depende del diseño y la forma del equipo a construir.

#### b) Parrilla rectangular

No es recomendada porque la distribución del combustible no es uniforme alrededor de toda la parrilla. Adicionalmente siempre existe un lado muy alejado, complicado de acceder, restringiendo así una correcta alimentación del combustible en la cámara de combustión. Su limitada accesibilidad complica también al momento de retirar algún residuo sin combustionar, que obstruye el área útil de la parrilla (Graham, Guide five 1975).

#### c) Parrilla cuadrangular

Esta parrilla tiene una buena distribución del combustible, no tiene lugares inaccesibles a diferencia de la parrilla rectangular. No puede rotar con dispositivos mecánicos (Graham, Guide five 1975).

Con esta información se deberá ver la forma más conveniente, que permita una buena combustión, facilidad al momento de la construcción y que no se convierta en una limitación de la máxima capacidad del equipo.

#### Orificios de la parrilla:

Se recomienda que los orificios o espacios libres para el ingreso del aire ocupen de un 30 al 50% de su área total (Graham, Guide Six 2443).

Al seleccionar el material de la parrilla se debe buscar un material que resista las altas temperaturas y los orificios no deben debilitar su estructura general.

#### Dimensiones de la parrilla:

La parrilla es el único lugar donde se quema el combustible. Su restricción es el espacio disponible para la combustión, por lo tanto es determinante en la capacidad de un equipo de intercambio de calor.

La alimentación máxima o capacidad permitida en un equipo está dada por el tamaño de parrilla, el tipo de combustible a utilizar y el control que se aplique al equipo. No todos los materiales tienen la misma forma, ni se demoran el mismo tiempo para quemarse completamente y dependen de la cantidad de aire de combustión en exceso ingresado al momento de operar el equipo.

El tamaño de la parrilla es proporcional con el tamaño del equipo. Su tamaño deber ser óptimo, para que permita una operación eficiente y económicamente rentable.

### **2.1.5 Alimentación del combustible**

Al adquirir un equipo de generación de aire caliente, es importante asegurar el suministro de combustible para su correcta operación. Si se lo va a utilizar durante las 24 horas del día, entonces debe haber un almacenamiento de reserva para evitar paradas. Para el correcto funcionamiento y operación, la alimentación tiene que ser constante y controlada. Para tener un eficiente control de temperatura del aire de salida, la alimentación de combustible debe ser constante.

No es recomendable sobredimensionar o utilizar una cantidad reducida de la capacidad de los equipos, porque conlleva a gastos innecesarios, problemas de logística y operación. Es por eso que en el caso de un generador de aire caliente, para su alimentación, se debe pensar en el diferencial de temperatura deseado para el aire caliente, la cantidad de aire a calentarse y el diseño del secador a ser utilizado. Obviamente todo esto va dado por los requerimientos del producto o del proceso en el cual el aire caliente va a ser utilizado.

### **2.1.6 Transferencia de calor**

Energía liberada por el equipo

Lo ideal fuera que un equipo lograra transferir toda la energía liberada por la combustión del equipo al aire a ser calentado. Lamentablemente esto no sucede así, ya que hay pérdidas en las paredes de los intercambiadores de calor y chimenea. Existen mecanismos que ayudan a disminuir sustancialmente estas pérdidas. Estos son los aislamientos externos y una adecuada área de transferencia de calor.

Es importante seleccionar adecuadamente el tipo de material de aislamiento, primero que soporte las altas temperaturas de las paredes de un horno o en este caso de un generador de aire caliente, segundo para mejorar la eficiencia del equipo al reducir las pérdidas y, por último, una buena relación beneficio costo. Hay que llegar a un equilibrio entre la

eficiencia del equipo y la inversión realizada en el aislante. Un ahorro en los costos de operación del equipo debe ser superior a la inversión realizada en el aislante.

En los equipos de intercambio de calor hay que aprovechar al máximo el espacio para colocar intercambiadores de calor. Una mayor área superficial de los intercambiadores, mejora mucho la transferencia de calor. Esto no quiere decir poner infinito número de intercambiadores, sino un equilibrio entre el calor generado de combustión y el costo del equipo. Un aumento en el área de transferencia de calor genera más fricción en el aire, lo cual implica un equipo de ventilador más potente y mayores costos en materiales. Al igual que los aislantes, una eficiencia que sea económicamente sustentable.

#### Transferencia de calor

De acuerdo con bibliografía del 20 al 40% de la energía total generada en hornos sale por la chimenea sin intercambiar calor (Graham, Guide Six 2617).

Al momento de iniciar con el diseño es conveniente trabajar con las condiciones de operación más críticas. Porque existe menos posibilidades de fracasar con el diseño y holgura al momento de obtener resultados. Es preferible sobredimensionar un poco al equipo antes que obtener una capacidad inferior a la esperada.

Básicamente un generador de aire caliente funciona con dos formas de transferencia de calor: radiación y convección.

“La radiación térmica es la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita. Esta puede ser emitida por superficies sólidas, líquidos y gases. La energía de la radiación es transportada por ondas electromagnéticas y fotones” (Incropera, 8). No existe la necesidad de un fluido para que transporte la energía, como es el caso de convección. La radiación puede funcionar en un vacío completo.

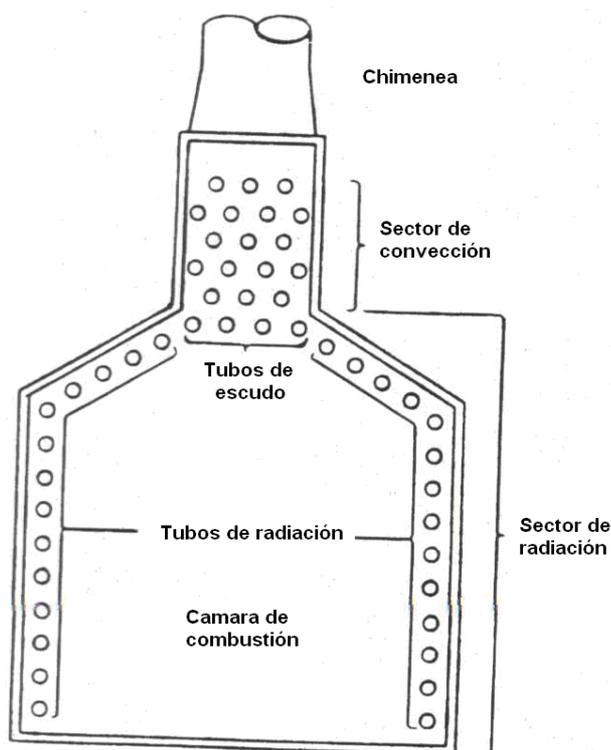
“La convección utiliza el movimiento global o macroscópico de un fluido para transferir calor. Este movimiento de moléculas tiene que estar acompañado por un gradiente de temperatura entre las partes que van a intercambiar calor” (Incropera, 5). Si las temperaturas de un fluido y un objeto tienen la misma temperatura, puede existir movimiento del fluido, pero no hay intercambio de calor.

En el caso del generador de aire caliente, el cuesco de palma se va a quemar y va generar una flama y gases de combustión. Las superficies del equipo cercanas a la flama, aprovecharán principalmente la radiación. Las partes más alejadas aprovecharan

principalmente la energía de los gases de combustión. Esto no quiere decir, que no puedan existir las dos simultáneamente en partes cercanas y alejadas de la flama. Los diferentes gases de combustión y el hollín producido, emiten radiación. Pero estos no son tan representativos al compararlos con la radiación emitida por la superficie del cuesco combustionado. En convección sucede lo mismo, su aprovechamiento en los hornos de combustión, se realiza básicamente con los gases en las partes superiores de los hornos. Es importante separarlas para simplificar cálculos posteriores previos al diseño, como se indica en la figura 2.1.

De acuerdo a bibliografía el 75% de la transferencia de calor, tiene que darse por radiación (Couper, 208).

Esta información va a ser crucial al momento de determinar el área de las superficies de convección y radiación que tenga el generador de aire caliente.



**Figura 2.1 Intercambiador de calor tipo caja con secciones de convección y radiación.**

Es complicado al momento de diseñar hornos, con métodos simultáneos de transferencia de calor como: convección, conducción y radiación. Porque se desconoce las temperaturas exactas de cada punto en el interior del horno, las concentraciones exactas de los gases de

combustión y el comportamiento de la flama generada por el cuesco de palma. Por esta razón se va a seguir el modelo teórico de diseño de hornos del texto de Perry (10-45), donde se simplifican los cálculos y se hacen algunas asunciones.

#### Asunciones del modelo teórico

- Perdidas externas de las paredes del refractario, igual a la convección generada desde la flama al refractario.
- La flama es gris y tiene una emisividad  $\epsilon_F$ .
- Todas las superficies refractarias tienen una temperatura común promedio, pero desconocida.
- Una temperatura media  $T_F$  es asignada a la temperatura de flama y sus productos de combustión en el interior del horno.
- El material frío a calentarse tiene una temperatura uniforme  $T_C$  y es gris.

Hablando de forma practica, una superficie gris emite y absorbe radiación sin importar su longitud de onda ( $\lambda$ ). Sin embargo esta sigue dependiendo de la temperatura.

El modelo matemático está definido por las ecuaciones 2.4, 2.5, 2.6 y 2.7.

$$\begin{array}{l} \text{Radiación} \qquad \qquad \text{Convección} \qquad \text{Pérdidas externas} \qquad \qquad \cdot \\ q_F = \sigma(T_F^4 - T_C^4)A_C F_{CF} + h_c * A_C (T_F - T_C) + U_R A_R (T_F - T_0) \end{array} \quad \text{Eq. 2.4}$$

$$F_{CF} = \frac{1}{\frac{1}{F_{CF_0}} + \frac{1}{\epsilon_C} - 1} \quad \text{Eq. 2.5}$$

$$F_{CF_0} = \epsilon_F \left( 1 + \frac{\frac{A_R}{A_C}}{1 + \frac{\epsilon_F}{1 - \epsilon_F} * \frac{1}{F_{RC}}} \right) \quad \text{Eq. 2.6}$$

$$U_R = \frac{1}{\frac{1}{h_R} + \frac{x_w}{k} + \frac{1}{h_0}} \quad \text{Eq. 2.7}$$

Donde:

$q_F$ = tasa de calor transferido	[W]
$s$ =Constante de Stefan Boltzmann	$[5.67 * 10^8 \frac{W}{m^2 K^4}]$
$T_F$ =temperatura media de flama y sus productos de combustión en el interior del horno.	[K]
$T_C$ = temperatura media del material frío a calentarse.	[K]
$A_C$ = área de transferencia por radiación	$[m^2]$
$A_C'$ = área de transferencia por convección	$[m^2]$
$A_R$ = área de transferencia de perdidas de calor externas.	$[m^2]$
$F_{CF}$ = factores de forma para transferencia de calor.	[-]
$h_C$ = coeficiente de convección dentro del horno.	$[\frac{W}{m^2 * K}]$
$h_R$ = coeficiente de convección dentro del refractario.	$[\frac{W}{m^2 * K}]$
$h_0$ = coeficiente de convección del exterior	$[\frac{W}{m^2 * K}]$
$T_0$ = temperatura del exterior.	[K]

Debido a que el refractario y las superficies frías del horno no están completamente separadas y adicionalmente el horno tiene debido a su diseño áreas de transferencia planas, se utilizará de una forma simplificada la formula anterior. La formula simplificada es la ecuación 2.8.

$$q_F = \sigma(T_F^4 - T_C^4)A_C * \left[ \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_C} + \frac{A_C}{A_C + A_R} * (\frac{1}{\epsilon_F} - 1)} \right] + h_c * A_C'(T_F - T_C) + U_R A_R (T_F - T_0) \quad \text{Eq. 2.8}$$

Las paredes y partes de intercambio solo podrán utilizar el 40% de perdidas de calor generado, ya que se deben descontar las perdidas que se van por la chimenea. Con esto se puede determinar el calor aprovechable. De este calor el 75% tiene que ser disponible en la

sección de radiación. Reemplazando todos los datos de la ecuación 2.8, se puede encontrar el área de radiación.

Adicionalmente en bibliografía se encontró que el área de transferencia para calderos verticales pequeños, tiene que ser el área de la parrilla multiplicada por 20. (Graham, Guide 5 1977). Con el área determinada de parrilla multiplicada por veinte, descontando el área determinada para la radiación, se puede determinar el área requerida para convección.

#### Temperatura de flama

La temperatura de flama es la temperatura máxima que se puede alcanzar con la combustión del cuesco de palma africana. Para lograr obtener este dato experimentalmente se necesita de un pirómetro especial de alta temperatura. No se dispone de un pirómetro que llegue a esa temperatura, por esto se utilizará un modelo teórico para determinar esta temperatura, que es requerida en la ecuación 2.8.

Para obtener esta temperatura, se asumirán las siguientes condiciones en el modelo teórico (Smith, 151).

- La combustión se da en forma adiabática ( $Q = 0$ )
- Los cambios en energía cinética y potencial serán despreciables
- El balance energético total del proceso es  $\Delta H = 0$ .

Básicamente hay que encontrar la energía desprendida por la reacción, esta se la puede determinar teóricamente. Al asumir que toda la energía se transformará en calor y no en energía cinética ni potencial, se puede decir que toda la energía se transferirá en forma de calor hacia los productos de la reacción, como lo indica la ecuación 2.9.

$$\Delta H_{298}^{\circ} + \Delta H_p^{\circ} = \Delta H^{\circ} = 0 \quad \text{Eq. 2.9}$$

Donde:

$\Delta H_{298}^{\circ}$ : Entalpía de formación de los reactivos a 298 K.

$\Delta H_p^{\circ}$ : Calor generado en la reacción

$\Delta H^{\circ}$ : Cambio de la entalpía estándar de la reacción.

Entonces la capacidad calórica de los productos multiplicada por la temperatura máxima alcanzable por la reacción, tiene que ser igual a la energía liberada en la reacción, representada en la ecuación 2.10.

$$\Delta H_p^{\circ} = C_{pH} * (T - 298.15) \quad \text{Eq. 2.10}$$

La reacción de combustión esta dada por la ecuación R 2.4.

La entalpía de combustión del biocombustible a 25 °C o 298 K ( $\Delta H^\circ_{298}$ ) es de  $-450 \frac{KJ}{mol}$ .

(Spiro, 19). Esto quiere decir que por cada mol de biomasa combustionada completamente, se producirá 450 kJ. El signo negativo indica que es una reacción exotérmica o que la reacción libera calor.

En realidad por cada mol de biomasa, no va a ingresar un mol de oxígeno. Como se mencionó anteriormente, es necesario un exceso de aire del 40 al 60% para garantizar una combustión completa. En este caso se tomará un valor medio, es decir un exceso del 50%. También cabe recalcar, que el 79% de las moles de aire que ingresan es nitrógeno. A continuación se detalla el ingreso en moles del aire de combustión por cada mol de biomasa.

$$\text{Moles de O}_2 \text{ requeridas} = 1 \text{ mol}$$

$$\text{Moles en exceso de O}_2 = (0.5)*(1) = 0.5 \text{ moles}$$

$$\text{Moles que entran de N}_2 = (1.5)*\left(\frac{79}{21}\right) = 5.64 \text{ moles}$$

Los gases que salen de la combustión tienen 1 mol de CO<sub>2</sub>, 1 mol de H<sub>2</sub>O (g), 0.5 moles de O<sub>2</sub> y 5.64 moles de N<sub>2</sub>. Esto se debe a que se asume que el nitrógeno no interviene en la reacción y que solo se consume el oxígeno exacto que requiere la reacción y la combustión es completa.

En esta parte se detallan las constantes de la ecuación de capacidad calórica de los productos de combustión. Las constantes deben ser reemplazadas en la ecuación 2.11.

$$\frac{C_p^{ig}}{R} = A + BT + CT^2 + DT^{-2} \quad \text{Eq. 2.11}$$

$$Cp_{CO_2} \quad A = 5.457 \quad B = 1.045*10^{-3} \quad D = -1.157*10^5$$

$$Cp_{H_2O} \quad A = 3.470 \quad B = 1.450*10^{-3} \quad D = 0.121*10^5$$

$$Cp_{O_2} \quad A = 3.639 \quad B = 0.506*10^{-3} \quad D = -0.227*10^5$$

$$Cp_{N_2} \quad A = 3.280 \quad B = 0.593*10^{-3} \quad D = 0.040*10^5$$

Las moles de la salida de los diferentes productos son diferentes, por esta razón hay que sacar la fracción molar que le corresponde a cada producto y con eso multiplicarlo por su capacidad calórica como está en la ecuación 2.12. Esta es una forma de ponderar el resultado y saber exactamente los requerimientos o aporte de cada producto.

$$(Cp)_H = \sum n_i (Cp_i)_H \quad \text{Eq. 2.12}$$

A continuación se reemplazan los diferentes valores y se obtienen las constantes ponderadas para reemplazar en la ecuación 2.11.

$$A = \sum n_i A_i = (1) (5.457) + (1) (3.470) + (0.5) (3.639) + (5.64) (3.280)$$

$$A = 29.246 \frac{J}{K}$$

$$B = \sum n_i B_i = (1) (1.045) + (1) (1.450) + (0.5) (0.506) + (5.64) (0.593)$$

$$B = 0.006093 \frac{J}{K}$$

$$C = 0$$

$$D = \sum n_i D_i = (1) (-1.157) + (1) (0.121) + (0.5) (-0.227) + (5.64) (0.040)$$

$$D = -92390 \frac{J}{K}$$

Con todos estos datos, se tiene que llegar a una igualdad variando la temperatura de las ecuaciones 2.9 y 2.10. Esta igualdad tiene que ser resuelta por un método iterativo. Se elaboró un programa en Matlab, con el método iterativo de convergencia. Las dos ecuaciones que tiene que resolver el programa son ecuaciones Eq. 2.9 y Eq 2.10 reemplazadas los datos obtenidos.

$$\Delta H_p^\circ + 450\,000 \frac{J}{mol} = 0 \quad \text{Eq. 2.9}$$

$$\Delta H_p^\circ = 8.314 * (29.246 \frac{J}{K} + 0.006093 \frac{J}{K} T - 92390 \frac{J}{K} T^{-2}) * (T - 298.15) \quad \text{Eq. 2.10}$$

Se tiene que dar una igualdad de la temperatura en las dos ecuaciones, dicha temperatura será la temperatura de flama.

El programa se encuentra en el anexo 3 de la tesis.

Con el programa se determinó que la temperatura de flama de la biomasa es igual a 1821 K o 1548°C.

Se ha determinado experimentalmente, que La temperatura de los gases de combustión en diferentes hornos es 300 °F (148.89 °C.) inferiores a la temperatura de flama obtenida anteriormente. Por esta razón la temperatura inicial de los gases de combustión en el horno será de 1399 °C. (Perry, 10-46).

La temperatura de flama y la de los gases de combustión sirven para ser reemplazados en la ecuación Eq. 2.8 de los cálculos de transferencia de calor.

## 2.2 Propiedades del biocombustible

El combustible a ser utilizado por el generador de aire caliente, es el cuesco de palma africana. Este combustible es un residuo de las plantas extractoras de aceite de palmiste.

La torta de palmiste (utilizado como alimento animal) y el aceite de palmiste (utilizado en la formulación de aceites comestibles), se obtienen a partir de la almendra de la semilla del fruto de palma africana. Como residuo de este proceso queda el cuesco vacío, el cual es a veces utilizado por las mismas fabricas en sus calderos, para producción de carbón o antes como sustituto del lastre en algunos caminos vecinales.

Algunas plantas de palmiste le dan uso completo a todos los residuos (cuesco) generados, como es el caso de la planta de aceite de palmiste TYSAI S.A., que produce briquetas de carbón de nombre comercial Pakemar. No venden a terceros su producción.

Existen otras plantas, las cuales pueden cobrar por la tonelada de cuesco recogida o simplemente la persona interesada en el cuesco tiene que correr con los gastos de levantada y transporte a destino deseado.

El cuesco es un combustible muy compacto, de tamaño uniforme. Es muy difícil tenerlo encendido sin un dispositivo que genere gran cantidad de aire de combustión. Es un combustible que tiene la capacidad calórica adecuada para ser utilizado en generadores de aire caliente o calderas. Su capacidad calórica ( $C_p$ ) es de  $11932 \frac{KJ}{Kg}$ . Este dato se obtuvo

de análisis realizados por la fábrica cementos Guapán (Guapán).



Figura 2.2 Cuesco de palma africana almacenada en un silo

## 2.3 Análisis comparativo de equipos del mercado

### 2.3.1 Generador de aire caliente Siscafrin

Siscafrin es un fabricante argentino de equipos de generación de aire caliente utilizando biomasa. Puede quemar aserrín, cáscara de confieras, hueso de melocotón, cáscara de almendra, orujillo de uva y aceituna, entre otros materiales.



**Figura 2.3 Generador de aire caliente móvil Siscafrin con silo de combustible y cuarto de control incorporado.**

Los elementos principales en el generador de aire caliente de la empresa Siscafrin son:

- Generador: Es robusto para aguantar el trajín del trabajo, acero inoxidable para los tubos de intercambio de calor y lana de vidrio enchapada en acero como aislante térmico.



**Figura 2.4 Intercambiador de calor del generador de aire caliente Siscafrin**

Quemador: la cámara de combustión es de ladrillo refractario, puede soportar temperaturas hasta 1700 °C, la alimentación es realizada por un tornillo sinfín por la parte inferior de la cámara de combustión y el aire de combustión ingresa por un blower en diferentes puntos de la cámara de combustión.



**Figura 2.5 Quemador forrado de ladrillo refractario del generador de aire caliente Siscafrin**



**Figura 2.6 Quemador en funcionamiento del generador de aire caliente Siscafrin**

- Sistema de alimentación: el sistema de alimentación consta de un tornillo de alimentación conectado a un motor, en el cual se puede controlar la velocidad de giro. Este tornillo va desde el silo de almacenamiento del combustible, hasta la parte inferior de la cámara de combustión.



**Figura 2.7 Base del quemador del generador de aire caliente Siscafrin**

- Sistema de seguridad: consta con un dispositivo que inyecta agua dentro de la cámara del tornillo sinfín, si la temperatura de esta cámara es de 50°C o superior. Adicionalmente corta el suministro eléctrico del equipo. Esto es para evitar el retroceso de la llama al silo de almacenamiento.
- Sistema de control: las variables de control son la alimentación del combustible y el ingreso de aire de combustión. La variable de salida es la temperatura de salida del aire caliente. Tiene adicionalmente alarmas, que evitan que el equipo trabaje a temperaturas o condiciones peligrosas para el equipo.

Consideraciones para la operación del generador de aire caliente:

- Limpieza: es necesario quitar la ceniza formada por el equipo entre una semana y un mes dependiendo el funcionamiento. Es fundamental limpiar los intercambiadores de calor por lo menos una vez cada año.
- Encendido: se lo puede realizar manualmente o automáticamente con una resistencia eléctrica.

Es un equipo que tiene el 85% de eficiencia y al trabajar con altas temperaturas en el interior de la cámara de combustión, este garantiza una combustión completa, mayor aprovechamiento del combustible y poca generación de ceniza.

### 2.3.2 Generador de aire caliente Súper Brix

Súper Brix es un fabricante colombiano de equipos de generación de aire caliente utilizando cascarilla de arroz como combustible. El aire caliente se lo utiliza directamente en el proceso de secado del arroz.

Tiene un tamaño compacto, permitiendo la ubicación de varios equipos en áreas reducidas, como lo indica la figura 2.8.



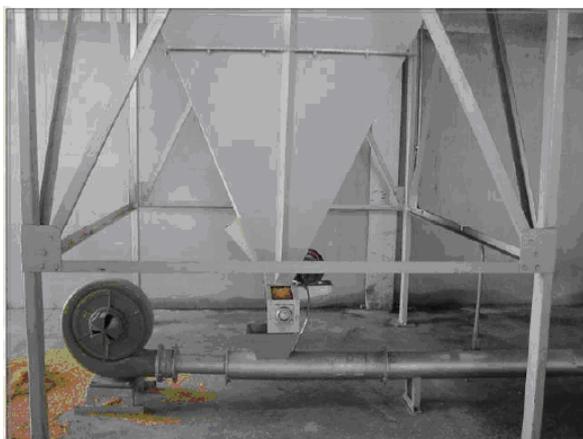
Figura 2.8 Isometría y vistas del generador de aire caliente Súper Brix

Los elementos principales del generador de aire caliente Súper Brix son:

- **Generador:** las zonas de intercambio están hechas de acero resistente a las altas temperaturas. La cámara de combustión está fabricada completamente de material refractario, el cual puede garantizar el funcionamiento 24 horas al día y 365 días al año.
- **Quemador:** la cámara de combustión trabaja a temperaturas de 1000 °C, para evitar la formación de dioxinas y furanos en los gases de salida. Estos son compuestos clorados que se pueden presentar en la incineración o combustión de residuos peligrosos, por ejemplo residuos hospitalarios. En los seres humanos bajas concentraciones pueden causar cáncer y problemas en la reproducción.
- **Sistema de alimentación:** el sistema de alimentación es neumático. Es decir tiene un ventilador, con el cual arrastra la cascarilla de arroz desde un silo de almacenamiento al quemador, como se indica en las figuras 2.9 y 2.10.

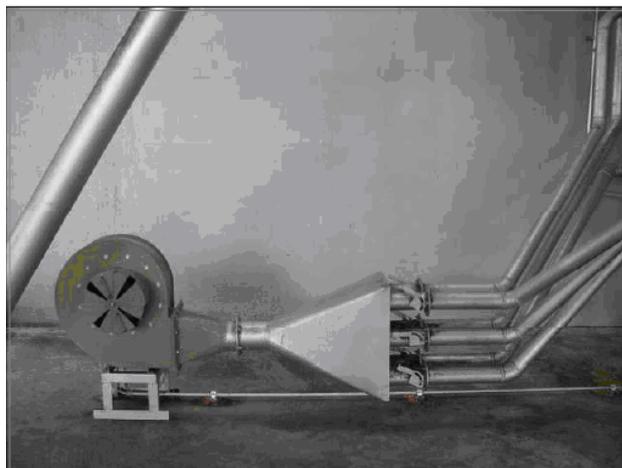


**Figura 2.9** Tolva de depósito del generador de aire caliente Súper Brix.



**Figura 2.10** Sistema neumático de alimentación de la biomasa en el generador de aire caliente Súper Brix.

- Sistema de ventilación: tiene dos equipos de ventilación, el uno para generar aire de combustión que se indica en la figura 2.11 y el otro para que circule por los intercambiadores de calor.



**Figura 2.11** Soplador que controla la combustión del generador de aire caliente Súper Brix.

- Sistema de control: las variables de entrada son la alimentación de combustible y el aire de combustión. El motor del sistema de alimentación de cascarilla de arroz, está conectado a un variador de velocidad con control PID. Lo que asegura una alimentación constante de combustible y por ende calor constante. La variable de salida es la temperatura de aire generado. El aire se puede mantener a una temperatura de  $\pm 1$  °C de la temperatura fijada o set point.

Consideraciones para la operación del generador de aire caliente:

- Limpieza: es poco frecuente por la calidad del acero y su material refractario que permite al equipo trabajar a altas temperaturas.

Es un equipo con bajos costos de mantenimiento, logra tener el aire caliente con un diferencial de temperatura de 100°C.

### 3 Diseño del generador de aire caliente

#### 3.1 Experiencias con el generador de aire existente en la fábrica de guantes de caucho Céleri

La fabrica de guantes de caucho Céleri, necesita un generador de aire caliente, para el proceso de secado de los guantes de caucho. Actualmente cuentan con dos generadores de aire caliente, el uno funciona con cuesco de palma africana y el segundo con gas (GLP). El de gas funciona únicamente en caso de falla del otro equipo.

El aire caliente es recirculado en el secador, con esto se logra tener una temperatura de salida de aire de 240 °C y una temperatura promedio en el secador de 120 ° C que requiere el producto.

El generador de aire caliente funciona las 24 horas del día, por eso se requiere de una volqueta de 6 toneladas de cuesco de palma africana para abastecer al quemador, cada 96 horas. Adicionalmente un material que resista esta operación continua. La alimentación es automática, evitando tener una persona solamente dedicada al control del horno.

##### 3.1.1 Datos importantes sobre el diseño del generador de guantes de caucho Céleri.

Combustible utilizado:

Cuesco de palma africana.

Dimensiones de la parrilla:

Parrilla en forma circular, diámetro de 0.4 m y área de 0.126 m<sup>2</sup>

La parrilla tiene un dispositivo mecánico que le permite rotar continuamente.

Blowers utilizados:

Blower de aire de combustión:

Blower centrífugo de 1 hp, 1750 rpm.

Blower de aire para calentar:

Blower centrífugo de 5hp, 1465 rpm, 3864 m<sup>3</sup>/h, 4487 kg aire / h.

Consumo de combustible

El consumo es de  $62 \frac{Kg}{h}$  de cuesco de palma africana.

Diferencial de temperatura:

El diferencial de temperatura generado es de 120 °C, con la alimentación indicada anteriormente y una cantidad determinada de aire en exceso, que se indicara en el punto 3.1.7.

### 3.1.2 Eficiencia energética del equipo de guantes de caucho Céleri.

Para determinar la eficiencia es importante primero determinar la cantidad de energía liberada, dada por la cantidad de cuesco combustionada por hora.

Consumo de cuesco palma africana:

$$62 \frac{kg}{h}$$

Calor específico del aire a presión constante y a 300 K:

$$C_p = 1.007 \frac{kJ}{kg * K}$$

Calor de combustión grueso cuesco de palma (Cemento Guapán):

$$C_{cg} = 11932 \text{ kJ/kg} \cdot \frac{kJ}{kg}$$

Calor producido al combustionar 62 kg de cuesco de palma africana por hora.

Esto se puede determinar con la ecuación 3.1.1.

$$Q_c = m_{cuesco} * C_{cg} \quad \text{Eq. 3.1.1}$$

Donde:

$$Q_c = \text{Calor generado por la combustión} \quad \left[ \frac{kJ}{h} \right]$$

$$C_{cg} = \text{Calor de combustión grueso cuesco de palma.} \quad \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

$$m_{cuesco} = \text{masa de cuesco a combustionarse.} \quad \left[ \frac{kg}{h} \right]$$

A continuación se reemplazarán los valores de alimentación y el poder calórico del combustible en la ecuación 3.1.1.

$$Q_c = 62 \frac{kg}{h} * 11932 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_c = 739\,660 \frac{kJ}{h}$$

El calor liberado por el generador de aire caliente es 739 660 kJ por hora.

Para obtener la eficiencia es necesario saber la energía necesaria para calentar el aire generado por el blower. El blower entrega 4487 kg de aire por hora, se requiere para el proceso un diferencial de temperatura de 120 °C.

Por lo tanto el calor necesario para calentar 4487 kg. de aire por hora, con un  $\Delta T$  de 120°C o 120 K. Se calcula utilizando la ecuación 3.1.2.

$$Q = m_{\text{cuesco}} * \nabla T * C_{p_{\text{aire}}} \quad \text{Eq. 3.1.2}$$

Donde:

$$Q = \text{calor necesario para calentar el aire} \quad \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{h}} \right]$$

Con esto reemplazando la cantidad de aire que se requiere calentar, el diferencial de temperatura y calor específico del aire en la ecuación 3.1.2 se obtiene la energía necesaria para calentar 4487 kg de aire por hora, con un diferencial de temperatura de 120 °C, la cual es 542 209 kJ por hora.

$$Q = 4487 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 120\text{K} * 1.007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}}$$

$$Q = 542\,209 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{h}} \right]$$

La eficiencia del generador de aire caliente (GAC) de la fábrica de guantes de caucho Célleri está dada por la división de, el calor necesario para calentar el aire (Q) para el calor generado por la combustión del cuesco de palma africana ( $Q_c$ ). Como lo indica la ecuación 3.1.3.

$$\eta = \frac{Q}{Q_c} \quad \text{Eq. 3.1.3}$$

Donde:

$$\eta = \text{eficiencia.} \quad [-]$$

Reemplazando los datos obtenidos anteriormente en la ecuación 3.1.3, se obtiene que la eficiencia del equipo es de 73.3%, es decir solo ese porcentaje de energía generada por el combustible, es transferida al aire en el intercambio de calor.

### 3.1.3 Relación entre combustible y aire de combustión

Como se determinó en la ecuación 2.3, la relación teórica aire / combustible es de 4.17

$\frac{m^3_{aire}}{kg_{biomasa}}$ . Con la comparación entre el aire teórico necesario para la combustión y el

utilizado en la práctica, saldrá el porcentaje de aire en exceso introducido.

El equipo utilizado en la fábrica de guantes de caucho Céleri utiliza el 70% de la capacidad de un blower de salida de 3", con 3000-3600 rpm.

El caudal máximo medido experimentalmente entregado por el blower como aire de combustión  $V_{Ac}$  (real), es de  $377.4 \frac{m^3_{aire}}{h}$ .

Esta es la cantidad de aire introducida a la cámara de combustión.

La cantidad teórica de aire de combustión necesaria se puede determinar con la alimentación por hora de cuesco de palma y la cantidad teórica de aire que requiere 1 kg de biomasa para quemarse completamente. Esto se indica en la ecuación 3.1.4.

$$V_{Ateo} = m_{cuesco} * \text{relación teórica aire/combustible} \quad \text{Eq. 3.1.4}$$

Donde:

$m_{cuesco}$  = flujo másico de cuesco a combustionarse

$$m_{cuesco} = 62 \frac{kg_{cuesco}}{h}$$

$V_{Ateo}$ : Volumen de aire teórico requerido

Reemplazando los valores en la ecuación 3.1.4 se sacará el aire teórico requerido del equipo de la fábrica de guantes de caucho Céleri.

$$V_{Ateo} = 62 \frac{kg_{cuesco}}{h} * 4.17 \frac{m^3_{aire}}{kg_{cuesco}}$$

$$V_{Ateo} = 258.54 \frac{m^3_{aire}}{h}$$

El aire teórico de combustión requerido es de  $258.54 \frac{m^3_{aire}}{h}$ , pero en la práctica todos los

equipos funcionan con un porcentaje en exceso. Este porcentaje se obtiene en la ecuación 3.1.5, mediante la división del aire de combustión real ingresado ( $V_{Ac}$ ) para el aire teórico requerido  $V_{Ateo}$ .

$$\text{Aire de combustión en exceso} = \frac{377.41 \frac{m^3}{h}}{258.54 \frac{m^3}{h}} = 1.45 \quad \text{Eq. 3.1.5}$$

El exceso de aire de combustión introducido es del 45%. Recordando que en la teoría se recomendaba un exceso de aire del 40 al 60%, se puede ver que el exceso de aire está dentro del rango adecuado.

### 3.1.4 Utilización del equipo

El caliente GAC de la fábrica de guante de caucho Céleri, abastece a un horno de un volumen aproximado de 24 m<sup>3</sup>, 4487 kg de aire caliente por hora, manteniéndolo a una temperatura promedio de 120 ° C.

### 3.1.5 Recomendaciones

A partir de las experiencias obtenidas en el GAC de la fábrica de guantes de caucho Céleri se observó que toda parte que este en contacto directo con el fuego producido por la combustión del cuesco de palma, debe ser de acero inoxidable, para evitar severos problemas de corrosión. A continuación se puede observar en la figura 3.1 el estado de varias partes del equipo, afectadas por la corrosión, después de un mes de funcionamiento durante 24 horas al día.



**Figura3.1 Corrosión de las partes del generador de aire caliente de la fábrica de guantes Céleri**

- La parrilla debe ser perforada en un 50% de su área, para permitir la entrada del aire de combustión al equipo.
- El equipo debe ser de fácil limpieza, especialmente las paredes donde va a existir intercambio de calor. En la superficie de los intercambiadores se forma una especie de costra refractaria, que impide el calentamiento del aire para utilizar en el proceso de secado.
- Es importante realizar limpiezas del equipo regularmente, para conservar la eficiencia del equipo.
- Es conveniente que la parrilla sea desmontable, para poder limpiar los agujeros por donde ingresa el aire de combustión y conservar una alimentación de aire uniforme.
- En la parte superior de la parrilla, hay partes del cuesco que no se combustionan, restando espacio útil a la parrilla e impidiendo el ingreso de aire de combustión, hay la necesidad de crear una herramienta para retirar estos residuos. A continuación se presenta en la figura 0.1 un residuo formado en la superficie de la parrilla.



Figura 0.1 Residuos que no se queman del cuesco de palma africana.

### 3.2 Diseño teórico

A continuación se desarrollarán las dimensiones y los criterios utilizados para el diseño del generador de aire caliente. Este está constituido por las siguientes partes:

Generador: consta de un quemador e intercambiadores de calor que intentarán aprovechar al máximo la transferencia de calor por convección y radiación.

Quemador: va a tener un quemador con una parrilla donde se asienta el combustible. La parrilla tiene que tener la suficiente área libre para el ingreso de aire de combustión. Este aire ingresará por la parte inferior del quemador.

Sistema de ventilación: tiene dos, uno para el aire que circula dentro de los intercambiadores de calor y el otro para combustión.

Sistema de control: el ingreso del aire va a estar controlado manualmente y la alimentación se la realizará manualmente también. La variable de salida es la temperatura de salida del aire caliente.

Consideraciones para la operación del generador de aire caliente:

- Limpieza: poco frecuente y fácil de realizarla.
- Diferencial de temperatura: tratar de llegar a obtener un diferencial de 100 ° C.
- Alimentación: que sea lo más sencilla y segura de hacerlo.
- Facilidad de ensamblaje mecánico del equipo.

### 3.2.1 Diseño de la parrilla

La forma de la parrilla va a estar determinada por la forma de la cámara de combustión, la cual es cuadrada. Con esta geometría la biomasa se puede distribuir en forma regular como se mencionó en el capítulo 2. No se escogió una geometría redonda por facilidad al momento de construir el equipo.

Las dimensiones definidas para la parrilla son:

Largo:  $L = 0.25 \text{ m}$

Profundidad:  $P = 0.25 \text{ m}$

Área:  $A = 0.0625 \text{ m}^2$

Justificaciones para el tamaño de parrilla.

- Con una cámara de combustión de esas dimensiones se tiene una alimentación de 20 a 30 kg de cuesco de palma por hora. Esta cantidad es manejable por una persona en el laboratorio.
- El equipo tiene una buena estabilidad mecánica.
- Es una cámara de combustión en la cual se pueden utilizar otros materiales de mayor tamaño como briquetas de carbón.

### 3.2.2 Alimentación de cuesco requerida

Haciendo una relación directa con el GAC de la fábrica de guantes de caucho Céleri, el consumo de ese equipo es de  $62 \frac{kg_{cuesco}}{h}$ , en una parrilla de área de  $0.126 m^2$ .

Bajo esta experiencia se puede decir que el equipo con un área de parrilla de  $0.0625 m^2$ , podría quemar un máximo de  $30 \frac{kg_{cuesco}}{h}$ .

Tres factores pueden alterar la alimentación de cuesco:

- La parrilla del equipo de GAC es circular y no tiene esquinas, las cuales pueden ser difícil de completar en la parrilla cuadrada.
- La parrilla de ese equipo rota, permitiendo una mejor distribución del cuesco.
- La alimentación es automática desde un silo al equipo y trabaja 24 horas al día sin parar.

Por esta razón se asumirá un factor de seguridad y se tomará que el equipo funcionara con el 70% del área total de la parrilla, es decir necesita una alimentación de 20 kg. de cuesco por hora. Obviamente los blowers tienen que estar calculados para trabajar con la capacidad máxima de alimentación que aguanta la parrilla.

### 3.2.3 Energía liberada por el equipo

Debido a las limitaciones explicadas en el punto anterior, se calculará una cantidad de energía máxima capaz de obtener con el diseño del equipo y una calculada con un factor de seguridad del 70% de su capacidad, para evitar inconvenientes posteriores de diseño.

La energía liberada a la máxima capacidad de operación de  $30 \frac{kg_{cuesco}}{h}$  se puede obtener utilizando la ecuación 3.1.1.

Con esto se determina que el calor generado por la combustión ( $Q_c$ ) es de  $357\ 960 \frac{kJ}{h}$ .

Para obtener la energía liberada al 70% de la capacidad de operación es necesario hacer una modificación de la ecuación 3.1.1. La ecuación 3.2.1 calcula el calor generado por la combustión, tomando en cuenta un 70% de la capacidad de operación del equipo.

$$Q_c = m_{cuesco} * C_{cg} * 0.7 \quad \text{Eq. 3.2.1}$$

Donde:

$Q_c$  = Calor generado por la combustión

$C_{cg}$  = Calor de combustión grueso cuesco de palma.

$m_{cuesco}$  = masa de cuesco a combustionarse.

En la parte siguiente, se reemplaza los datos en la ecuación 3.2.1.

$$Q_c = 20 \frac{kg}{h} * 11932 \frac{kJ}{kg} * 0.7$$

$$Q_c = 238\ 640 \frac{kJ}{h}$$

La energía capaz de liberar el equipo usando el 70% de su capacidad para ser alimentado,

es de  $238\ 640 \frac{kJ}{h}$ .

### 3.2.4 Eficiencia estimada del equipo

Como se mencionó en el capítulo 2, entre el 20 y el 40% de la energía se pierde por la chimenea sin realizar intercambio de calor alguno. Esto se pudo confirmar en base a la experiencia del generador de aire caliente de GAC, la mayor pérdida de calor del equipo se produce por la chimenea. Por esta razón en el diseño del equipo por seguridad, se va a trabajar con la mayor pérdida que es del 40% del total del calor generado. Las pérdidas generadas por las paredes del equipo, se las va a incluir en este 40%, porque son pérdidas pequeñas comparadas con la pérdida en la chimenea.

La energía aprovechable por el equipo es del 60% de la energía generada. Es decir una eficiencia del equipo del 60%. La ecuación 3.2.2 calcula el calor aprovechable generado por el equipo.

$$Q_a = Q_c * E \quad \text{Eq. 3.2.2}$$

Donde:

$Q_a$  = Calor aprovechable

E = eficiencia del equipo

$Q_c$  = Calor generado por la combustión

Debido a que se está trabajando con un factor de seguridad en la alimentación del equipo, se harán dos cálculos, uno con alimentación máxima y otro con el 70% de alimentación.

La energía aprovechable con alimentación máxima se obtiene reemplazando los valores en la ecuación 3.2.2:

$$Q_a = 357\,960 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} * 60\%$$

$$Q_a = 214\,776 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

La energía máxima capaz de aprovechar el equipo es de  $214\,776 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$ .

La energía aprovechable con el 70% de alimentación máxima es de  $143\,184 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$ .

### 3.2.5 Diferencial de temperatura propuesto para el equipo

El objetivo es llegar a tener una temperatura máxima de salida del aire de 120 °C. En promedio la ciudad de Quito tiene una temperatura entre 13 y 20 °C, que es el lugar de funcionamiento del equipo. Por esta razón se va a trabajar con un diferencial de temperatura ( $\Delta T$ ) de 100 °C.

### 3.2.6 Determinación del equipo de ventilación para el aire de combustión.

La cantidad de aire teórico requerido para la combustión con la máxima alimentación se determinó en la sección 2. La relación teórica aire / combustible es de  $4.17 \frac{\text{m}^3_{\text{aire}}}{\text{kg}_{\text{biomasa}}}$ , esto multiplicando por la cantidad de combustible alimentado por hora, da la cantidad teórica de aire de combustión requerida. Al igual que en los pasos anteriores, se calculará el aire necesario para la capacidad máxima del equipo y el cálculo con el 70% de factor de seguridad.

En la tabla 3.1 se presenta la cantidad de aire de combustión requerido en este equipo en su máxima capacidad de alimentación y para una alimentación del 70%.

**Tabla 3.1 Requerimiento de aire de combustión teórico con alimentación máxima y del 70%.**

	Máxima alimentación	70% alimentación
$V_{Ateo} \left( \frac{m^3}{h} \right)$	125.1	83.4

Como se explicó en la sección 2, se debe usar de un 40 a 60% de aire en exceso. Para la selección adecuada del equipo de ventilación, se tomará la condición más crítica, esta es el funcionamiento del equipo a la máxima alimentación y el exceso máximo de aire permitido. Con este criterio de diseño es posible disminuir la cantidad de aire si la alimentación disminuye y se puede operar a las condiciones máximas.

En la ecuación 3.2.5 calcula el mayor requerimiento que el equipo puede requerir de aire de combustión.

$$V_{Ac} = V_{teo} * E_{max} \quad \text{Eq. 3.2.5}$$

Donde:

$E_{max}$  = exceso de aire de combustión máximo.

A continuación se trabajará con el requerimiento de aire de combustión teórico máximo obtenido en la ecuación 3.2.3. y un 60% de aire de combustión en exceso.

$$V_{Amax} = 125.1 \frac{m^3_{aire}}{h} + \left( 125.1 \frac{m^3_{aire}}{h} * 60\% \right)$$

$$V_{Amax} = 200 \frac{m^3_{aire}}{h}$$

Donde:

$V_{Amax}$  = volumen de aire de combustión máximo  $\left[ \frac{m^3}{h} \right]$ .

Para el diseño y la selección se requiere un equipo de ventilación capaz de suministrar 200

$\frac{m^3_{aire}}{h}$  para la combustión del cuesco.

### 3.2.7 Determinación del equipo de ventilación para el aire de combustión

Por la necesidad de que el aire de combustión atraviese los orificios de la parrilla y se distribuya uniformemente en todo el cuesco, se escogerá un blower o soplador, ya que este proporciona mayor presión para vencer obstáculos que el aire pudiera enfrentar a su ingreso.

En el mercado existen sopladores chinos, estos carecen de información importante para una adecuada selección. El fabricante no especifica el caudal de salida de los sopladores. Por esta razón hubo la necesidad de calcular la velocidad de salida de cada uno, con un anemómetro digital, como se ilustra en la figura 3.2.



**Figura3.2 Determinación con un anemómetro la velocidad de salida del soplador**

Se tomo la medida del diámetro de salida de cada soplador, calculando el área y esta multiplicada por la velocidad de salida, se obtuvo el caudal de aire en unidad de tiempo. Este cálculo se representa en la ecuación 3.2.6.

$$C_a = v * A$$

**Eq. 3.2.6**

Donde:

$C_a$  = caudal de aire de salida del soplador por hora

$v$  = velocidad de salida del aire del soplador

$A_s$  = área de salida del soplador

Reemplazando datos de algunos sopladores disponibles en el mercado en la ecuación 3.2.6, se pudo obtener la tabla 3.2.

**Tabla 3.2 Caudales de salida de sopladores de 5, 4, 3 y 2.5 pulgadas de diámetro de salida.**

Tipo/ Marca	Fases	Voltaje	RPM	Diámetro Salida (in.)	Área salida (m <sup>2</sup> )	Velocidad		Caudal	
						Max (m/s)	Min. (m/s)	Max. (m <sup>3</sup> /h)	Min. (m <sup>3</sup> /h)
Centrífugo	1	110	3000 / 3600	5	0.013	20.8		973	
Centrífugo	1	110	3000 / 3600	4	0.008	30	8	875	233.4
Centrífugo	1	110	3000 / 3600	3	0.005	23	12	377	196.9
Centrífugo	1	110	3000 / 3600	2.5	0.003	20	10	228	114

Comparando los valores para el caudal máximo y mínimo se escogerá el blower de 2.5 pulgadas de diámetro de salida, con un caudal máximo de  $227.9 \frac{m^3_{aire}}{h}$ . La capacidad está 13.5% sobredimensionada, pero es la más cercana a los requerimiento del equipo y brinda un factor de seguridad adicional para el exceso de aire requerido para la combustión completa del cuesco de palma.

En base a los cálculos de la sección 3.1.2, se requiere un soplador que genere  $1200 \frac{m^3_{aire}}{h}$  en el interior de los intercambiadores de calor. Esto es tomando en cuenta el factor de seguridad del 70% del espacio de la parrilla y el 60% de eficiencia energética propuesto para el equipo.

### 3.2.8 Temperatura teórica de flama

Como se determinó en la sección 2, la temperatura de flama de la biomasa calculada es igual a 1821 K o 1548 °C.

La temperatura inicial de los gases de combustión en el horno será de 1399 °C. Porque experimentalmente se ha determinado que los gases en la mayoría de hornos son 300 °F menores a la temperatura de flama.

### 3.2.9 Transferencia de calor por radiación

Las paredes y partes de intercambio solo podrán utilizar el 60% del calor generado por combustión ya que se debe considerar el 40% de pérdidas de calor que se va por la chimenea.

Como se indicó en la sección 3.2.5, el calor aprovechable por el equipo, es de 143 184  $\frac{kJ}{h}$  para su máxima alimentación de cuesco.

Es necesario encontrar la potencia del equipo para poder realizar los cálculos posteriores, en la ecuación 3.2.7 se convierte la energía aprovechable de  $\frac{kJ}{h}$  a watts.

$$Q_a = 143184 \frac{kJ}{h} * \frac{1000J}{1KJ} * \frac{1h}{3600s} = 39773.3W \quad \text{Eq. 3.2.7}$$

De acuerdo a lo indicado anteriormente, el 75% de la transferencia de calor tiene que darse por radiación. Por esta razón en la ecuación 3.2.8 se calculará el calor que deberá ser transferido por radiación.

$$q_{rad} = 39773.3W * 0.75 \quad \text{Eq. 3.2.8}$$

$$q_{rad} = 29830W$$

Donde:

$q_{rad}$  = tasa de calor transferido por radiación.

El calor transferido por radiación en el equipo tiene que ser 29830 W.

En esta parte lo que interesa es poder determinar el área necesaria para que el 75% del calor transferido sea por radiación. Por eso se va a utilizar la parte de radiación de la ecuación 2.8.

$$q_{rad} = \sigma(T_F^4 - T_C^4)A_C * \left[ \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_c} + \frac{A_C}{A_C + A_R} * \left(\frac{1}{\epsilon_F} - 1\right)} \right] \quad \text{Eq. 2.8}$$

Donde:

- $T_F = 1399\text{ }^\circ\text{C} = 1672\text{ K}$

Temperatura de inicio de los gases de combustión calculada en la sección 2.

- $T_C = 850\text{ }^\circ\text{C} = 1123\text{ K}$

De acuerdo al constructor colombiano Súper Brix de hornos industriales para combustionar cascarilla de arroz, las temperaturas constantes al interior del horno pueden superar los  $850\text{ }^\circ\text{C}$ . En este caso se utilizará  $850\text{ }^\circ\text{C}$  o  $1123\text{ K}$  como temperatura de referencia interna del horno.

- $s =$  Constante de Stefan Boltzmann ( $5.67 * 10^8 \frac{W}{m^2 K^4}$ )
- $\epsilon_c = 0.3$

El valor de emisividad para el acero está entre 0.1 para un acero ligeramente oxidado y un valor de 0.5 para una forma fuertemente oxidada. (Inkropera, 659).

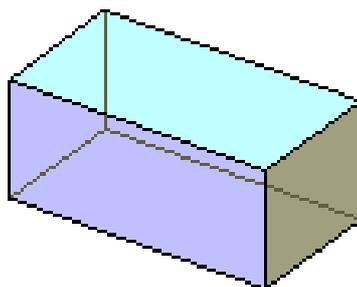
Se trabajara con un valor medio de  $\epsilon_c = 0.3$ , porque el acero con el uso y la temperatura tiende a oxidarse.

- $\epsilon_F = 0.9$

La flama tiene una emisividad  $\epsilon_F = 0.9$ . En bibliografía se obtiene que materiales con celulosa tienen una emisividad de 0.9 al ser combustionados. Se asume que la emisividad generada por el cuesco de palma se comporta como el de la celulosa (Krasny, 24).

- $A_R = 1.125\text{ m}^2$ .

Para determinar el área de transferencia de perdidas de calor externas ( $A_R$ ), se asumió que el horno tiene una forma de un paralelepípedo de la forma que se muestra en la siguiente figura 3.3.



**Figura 3.3** Forma de paralelepípedo asumida para el horno.

Donde las bases con los lados más pequeños representan la parrilla y la chimenea en la parte superior. Se tomó esta forma porque la parrilla ya está diseñada, el largo y ancho es de 0.25m.

La altura del equipo se estimó de 1 m, teniendo en cuenta el espacio requerido para ubicar los intercambiadores de calor.

Se asume que el calor se pierde de igual manera en el cuerpo por sus 4 lados y 2 caras.

En la ecuación 3.2.9 se calcula el área externa de las caras del paralelepípedo.

$$A_R = 2 * (0.25m * 0.25m) + 4 * (1m * 0.25) \quad \text{Eq 3.2.9}$$

$$A_R = 1.125 \text{ m}^2.$$

El área de transferencia de pérdidas de calor externas es de 1.125 m<sup>2</sup>.

A continuación se reemplazaran los datos obtenidos en la ecuación 2.8.

El reemplazo parcial de los tres primeros datos de la ecuación 2.8, deja las siguientes expresiones:

$$29830W = 5.67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} (1672K^4 - 1123K^4) A_C * \left[ \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_c} + \frac{A_C}{A_C + A_R} * \left(\frac{1}{\epsilon_f} - 1\right)} \right]$$

$$A_C * \left[ \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_c} + \frac{A_C}{A_C + A_R} * \left(\frac{1}{\epsilon_f} - 1\right)} \right] = \frac{29830W}{352949 \frac{W}{m^2}} \quad \text{Eq.2.8}$$

A<sub>c</sub>: área de transferencia por radiación.

Finalmente se realiza el reemplazo de los últimos tres datos de la ecuación 2.8 y queda la siguiente expresión:

$$A_c * \left[ \frac{1}{\frac{1}{0.3} + \frac{A_c}{A_c + 1.125m^2} * \left(\frac{1}{0.9} - 1\right)} \right] = \frac{29830W}{352949W} \quad \text{Eq.2.8}$$

Resolviendo la ecuación 2.8, con todos los datos queda un área necesaria para transferir calor por radiación de 0.284 m<sup>2</sup>.

La siguientes partes de la ecuación 2.8 no se calculará, porque es muy complicado obtener mas información sobre factores de forma de la cámara de combustión, coeficientes de convección en el interior del horno y refractario. Pero para el diseño, se tiene suficiente información para determinar el área de radiación que debe tener el horno, para un funcionamiento eficiente y requerido. Se sabe teóricamente que se necesita 0.284m<sup>2</sup> de área en contacto directo con la radiación del fuego.

Adicionalmente en bibliografía se encontró que el área de transferencia para calderos verticales pequeños, tiene que ser el área de la parrilla multiplicada por 20 (Graham, Guide five 1977).

En la ecuación 3.2.10 se calculará el área total de transferencia del equipo.

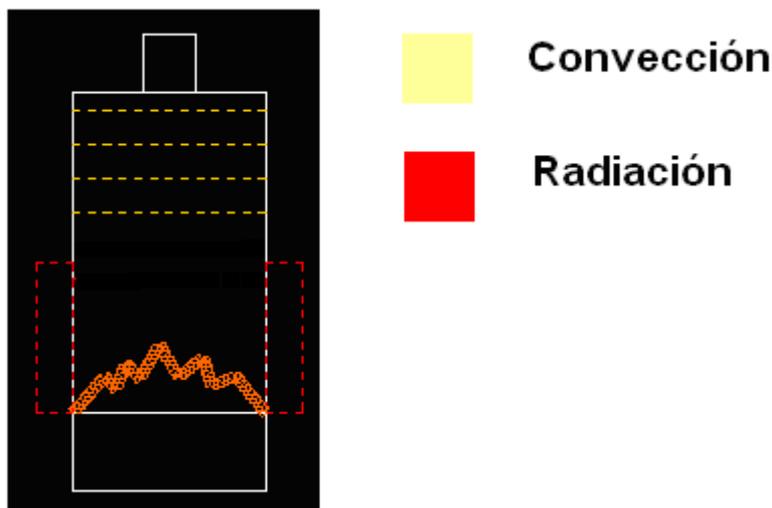
$$A_T = A_p * 20 \quad \text{Eq. 3.2.10}$$

Donde:

A<sub>p</sub>: Área parrilla= 0.0625 m<sup>2</sup>.

A<sub>T</sub>: El área total de transferencia de calor del equipo= 1.25 m<sup>2</sup>.

Se puede sobredimensionar el área de radiación como factor de seguridad, el área restante se utilizará para calcular el área de convección. El diseño va a tratar de aprovechar el calor de radiación básicamente de las paredes de la cámara de combustión del horno como se ilustra en la figura 3.4.



**Figura3.4 Zonas propuestas de radiación y convección del generador de aire caliente**

Con la figura 3.4 se puede ver que la intención es de aprovechar con cámaras externas el calor generado en la cámara de combustión, esta sería la zona de radiación. En la parte superior se colocarán tubos atravesados, para aprovechar la energía de los gases calientes de combustión. Esta vendría a ser la zona de convección.

Las dimensiones para el área de radiación se determinan de la siguiente manera.

Las paredes aprovechables de la cámara de combustión son solamente 3, porque la otra tiene que ser usada como puerta para la alimentación de combustible al horno.

Si se toma una altura de la cámara de combustión de 0.4 m, se alcanza perfectamente al área requerida para la transferencia de calor por radiación. La ecuación 3.2.11 indica el área generada por las 3 paredes de la cámara de combustión.

$$A_{cr} = b * h * N \quad \text{Eq. 3.2.11}$$

$$A_{cr} = 0.25 \text{ m} * 0.4 * 3$$

$$A_{cr} = 0.3 \text{ m}^2$$

Donde:

$$A_{cr} = \text{área de radiación real} \quad [\text{m}^2]$$

$$b = \text{base (lado parrilla)} \quad [\text{m}]$$

$$h = \text{altura cámara de combustión} \quad [\text{m}]$$

$$N = \text{numero de paredes} \quad [-]$$

Con esa altura se obtiene 0.3m<sup>2</sup> de área disponible para transferir calor por radiación. Lo requerido únicamente es de 0.284 m<sup>2</sup>. Está sobredimensionado un poco, pero es una altura de la cámara de combustión que brinda espacio necesario para la alimentación de combustible.

### 3.2.10 Transferencia de calor por convección

El área de convección esta dada por la diferencia entre el área total de transferencia ( $A_T$ ) y el área utilizada para la transferencia por radiación. El área requerida para convección se calculará en la ecuación 3.2.12.

$$A_c = A_T - A_{cr} \quad \text{Eq. 3.2.12}$$

Área de convección:  $A_c = 1.25 \text{ m}^2 - 0.3 \text{ m}^2$

$$A_c = 0.95 \text{ m}^2$$

La zona de convección será aprovechada por tubos que pasan por la parte superior del horno.

La forma recomendada para los tubos, por bibliografía es redonda. Pero por experiencia en el generador de aire caliente de la fábrica de guantes Céleri, el aspecto más crítico del mantenimiento es la limpieza exterior de los tubos o superficies de intercambio. Con el uso se forma una costra que impide la transferencia de calor y no tendrían razón para estar presentes en el generador de aire caliente. Los tubos van a ser cuadrados porque su superficie plana permite una mejor limpieza externa. Las caras planas, una buena separación y acomodación de los tubos permitirán una fácil limpieza. La figura 3.5 indica la distribución de los tubos.

Los tubos serán cuadrados con ancho de 1 pulgada porque para procesos de intercambio se recomiendan tubos de diámetro de 1 pulgada o 0.75 pulgadas. Se escogió de 1 pulgada porque al momento de soldarlos su manejo será mucho más fácil (Couper, 191).

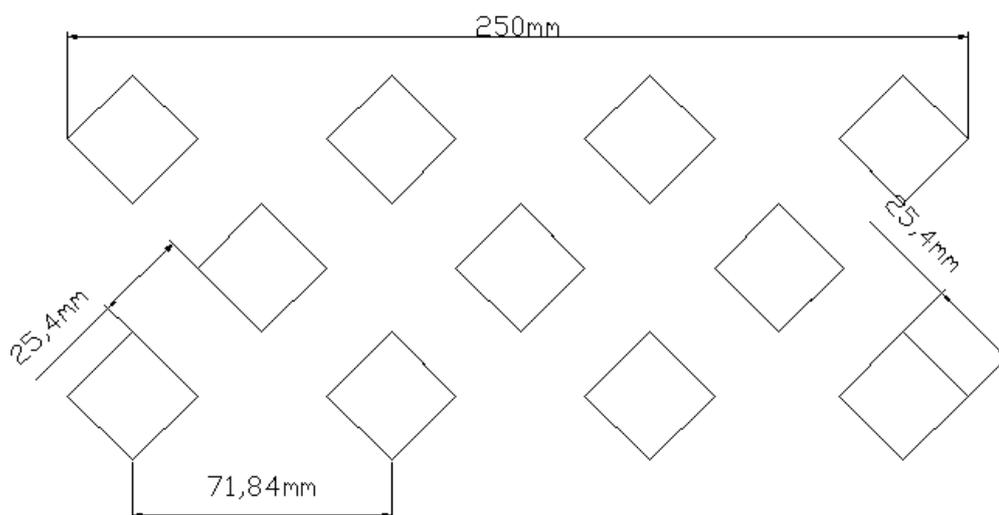


Figura 3.5 Distribución y dimensiones de los tubos de convección.

En la figura 3.5 también se puede observar que un arreglo consta de 11 tubos cuadrados de 1 pulgada, un largo de 0.25 m y una área superficial de 0.0254 m<sup>2</sup>., La razón es que si hubiera más tubos por arreglo, acceder para limpiar los tubos del centro sería imposible. Además caben 11, porque hay que respetar los 0.25 metros de ancho de la cámara de combustión dada por la dimensión de la parrilla.

Después se va a determinar el número de arreglos que deben estar presentes para cumplir el área requerida de convección.

El espacio dejado entre tubos permite el ingreso de herramientas para raspar y limpiar las superficies externas de los tubos. La ubicación de los tubos genera acceso recto donde ingresan tranquilamente herramientas de limpieza. La ubicación también forma una especie de laberinto, la cual aumentara el tiempo de residencia de los gases en el arreglo de tubos y mejorará la transferencia de calor.

El número de arreglos necesarios se obtiene al calcular el área superficial total de todos los tubos del arreglo. (Ecuación 3.2.13)

$$\begin{aligned} A_a &= N_T * A_{\text{Tubo}} & \text{Eq.3.2.13} \\ A_a &= 11 * 0.0254\text{m}^2 \\ A_a &= 0.28 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Donde:

$N_T$  = numero de tubos

$A_{\text{tubo}}$  = área superficial de cada tubo

$A_a$  = área superficial de 1 arreglo de tubos

Cada arreglo de tubos tiene 0.28 m<sup>2</sup> de área superficial. Se requieren 0.95 m<sup>2</sup> de área de convección. En la ecuación 3.2.14 se calculará el número de arreglos requeridos.

$$\begin{aligned} N_a &= \frac{A_{\text{conv}}}{A_a} \\ N_a &= \frac{0.95\text{m}^2}{0.28\text{m}^2} \\ N_a &= 3.4 \end{aligned}$$

Donde:

$N_a$  = numero de arreglos de tubos

$A_c$  = 0.95 m<sup>2</sup>.

Se requieren 3.4 arreglos de tubos para completar el área requerida. Se trabajara solamente con 3 arreglos de tubos porque no causa una gran disminución del área de intercambio y porque al momento de construir, es más fácil hacer y acoplar piezas iguales.

Una condición para el diseño es que los arreglos sean separables y se los pueda limpiar de mejor manera.

Con todos estos cálculos se trata de asegurar un diferencial de temperatura de 100 °C. Es muy complicado calcular las temperaturas de cada superficie y el tiempo de residencia del aire en los diferentes puntos del equipo. Lo que se ha hecho únicamente es asegurar que el aire de calentamiento circule por áreas que poseen el calor necesario para subir la temperatura del caudal de aire fijado. Adicionalmente el equipo trabajara con áreas de intercambio justas, que permitirán obtener una buena eficiencia en relación al consumo de combustible. Si la temperatura del aire de calentamiento es mayor, se puede controlar y obtener la temperatura deseada.

## 4 Construcción del generador de aire caliente

Con las dimensiones y consideraciones obtenidas en el diseño teórico, se procedió a elaborar un diseño en tres dimensiones (3D) del generador de aire caliente. En base al modelo 3D, se obtenían los planos con isometrías y vistas de las diferentes piezas que componen el equipo.

Todos los diseños de 3D, isometrías y vistas se las realizó en el programa Autocad.

### 4.1 Diseño Autocad

Todos los diseños de 3D, isometrías y vistas se las realizó en el programa Autocad.

Antes de iniciar la construcción todos los planos fueron revisados y analizados en base a los requerimientos para el generador de aire caliente. Se realizaron dos diseños antes de empezar la construcción y dos cambios del diseño durante la etapa de construcción.

#### Primer diseño

El primer diseño trata de aprovechar la energía de radiación con una cámara que rodea al quemador y la energía de convección mediante la colocación de tubos en la parte superior. Adicionalmente el equipo tiene que ser desmontable para poder realizar limpiezas de los intercambiadores de calor. Estas dos consideraciones se mantuvieron en todos los diseños y modificaciones realizadas.

La isometría del primer diseño del equipo se ilustra en la figura 4.1.

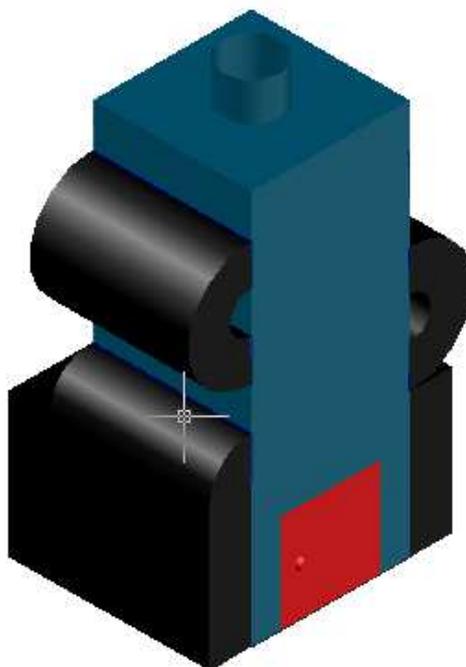


Figura 4.1 Isometría del primer diseño del generador de aire caliente

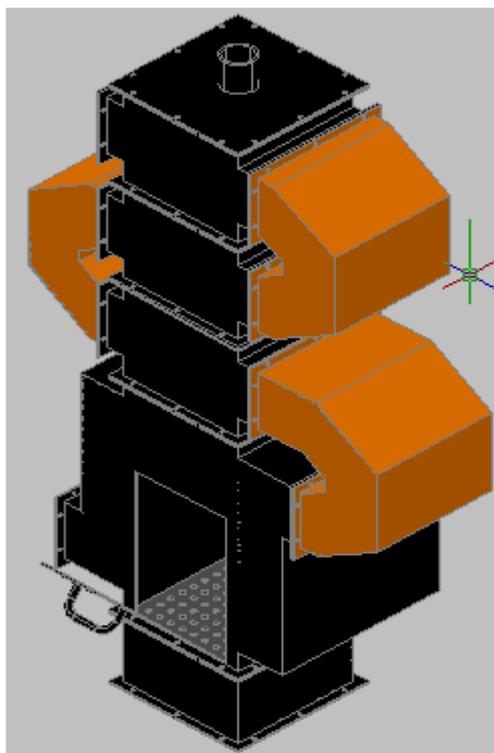
#### Defectos del primer diseño

- No se tuvo en cuenta el ajuste mecánico de las diferentes piezas.
- No existe un lugar donde caiga y se almacene la ceniza.
- Los intercambiadores de calor inaccesibles al momento de realizar limpiezas.

Con estas bases se prosiguió hacer las modificaciones para el segundo diseño.

#### Segundo diseño

En este diseño se tomó en cuenta el ajuste mecánico de las diferentes piezas del equipo con el fin de lograr un equipo totalmente desmontable, para poder limpiar todos los intercambiadores de calor. Además se creó una cámara de almacenamiento de ceniza. La figura 4.2 ilustra la isometría del segundo diseño.



**Figura 4.2 Isometría del segundo diseño del generador de aire caliente.**

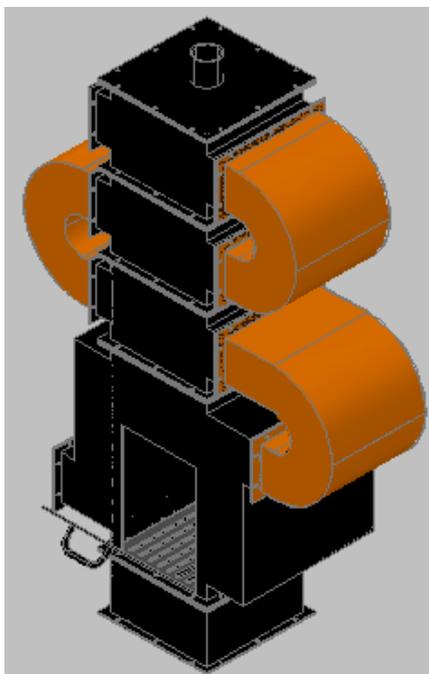
#### Defectos del segundo diseño

- Los ductos que unen las secciones de convección (Piezas de color naranja) no tienen espacio para el acceso de las herramientas de ajuste.
- Las paredes planas de los ductos generan mucha resistencia en la circulación del aire a ser calentado.

A partir del segundo diseño de Autocad se empezó la construcción de todo el equipo. En base a este diseño se realizaron modificaciones durante la fabricación.

#### Primera modificación del segundo diseño

Básicamente lo que se tomo en cuenta en esta modificación fue crear accesos suficientes para el ingreso de herramientas de ajuste en todas las partes del equipo. Se redondeo a los ductos para disminuir la fricción existente entre el aire a ser calentado y los ductos de circulación. La isometría de la primera modificación del segundo diseño se ilustra en la figura 4.3.

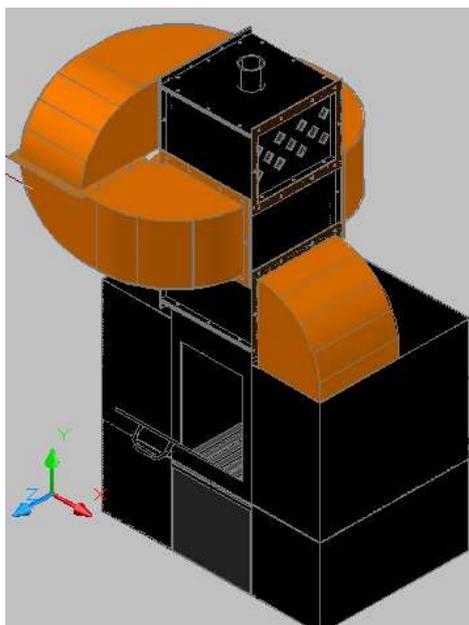


**Figura 4.3 Isometría de la primera modificación del segundo diseño del generador de aire caliente**

Esta modificación no tenía defectos, pero se consideró que había forma de lograr mejorar la transferencia de calor por convección en los tubos ubicados en la parte superior del equipo. Debido a que todos los arreglos de los tubos están orientados en la misma dirección, se podían formar caminos preferenciales de circulación de los gases de combustión. Si existen caminos preferenciales, significa menor tiempo de residencia de los gases de combustión al interior del equipo y por lo tanto menor transferencia de calor. Esta mejora fue tomada en cuenta en la última modificación realizada al diseño.

Ultima modificación al segundo diseño

En esta última modificación se cambio la orientación de los arreglos de tubos de la sección de convección. Ninguna orientación de un arreglo de tubos coincidía con la orientación del siguiente arreglo de tubos. La figura 4.4 ilustra la isometría de la última modificación realizada al segundo diseño.



**Figura 4.4** Modificación definitiva al segundo diseño del generador de aire caliente

La figura 4.4 muestra el generador de aire caliente exactamente como fue construido en este proyecto de tesis.

#### **4.1.1 Isometrías de las partes que conforman el quemador e intercambiadores de calor del equipo**

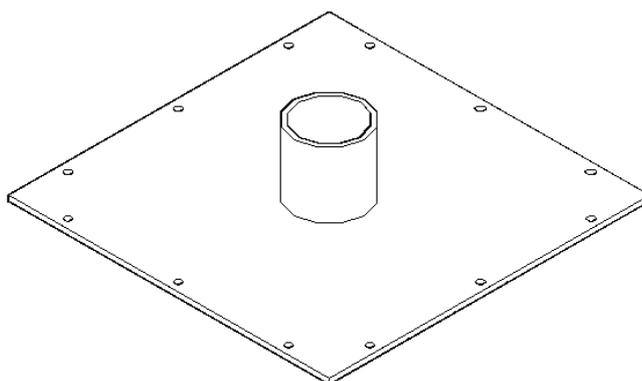
A continuación se presenta las isometrías de todas las partes que conforman el quemador y los intercambiadores de calor. Todas estas partes son esenciales al momento de ensamblar y funcionamiento del equipo.

Parrilla



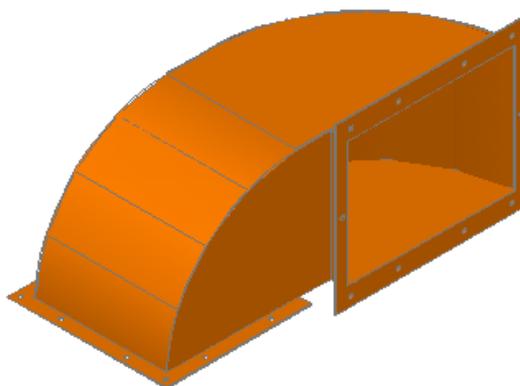
**Figura 4.5 Isometría de la parrilla del generador de aire caliente**

Chimenea



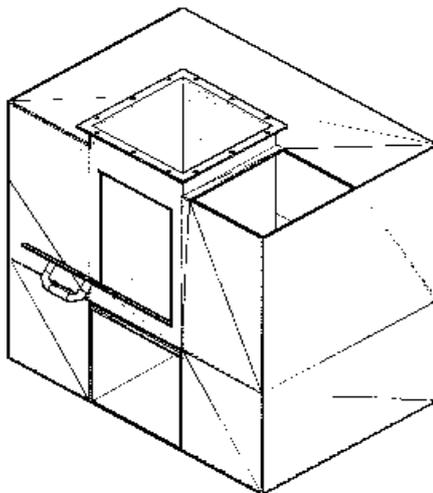
**Figura 4.6 Isometría de la chimenea del generador de aire caliente**

Ductos de enlace de las secciones de convección.



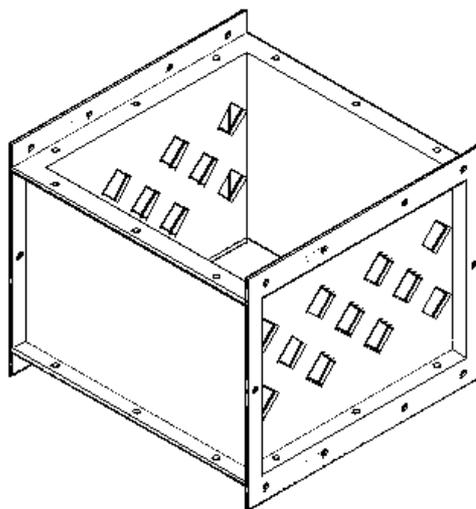
**Figura 4.7 Isometría de los ductos del generador de aire caliente**

Quemador rodeado de la cámara que aprovecha la energía de radiación.



**Figura 4.8 Isometría del quemador del generador de aire caliente**

Arreglo de tubos de la sección de convección del equipo.



**Figura 4.9 Isometría de un arreglo de tubos de la sección de convección del generador de aire caliente**

### **4.1.2 Planos y vistas del generador de aire caliente**

Todos los planos del generador de aire caliente y sus partes, se encuentran en el Anexo 4. Los planos están en hoja A3, cada uno incluye una isometría, vista lateral, superior y frontal. Están debidamente acotados para saber las dimensiones de cada parte del equipo.

## 4.2 Materiales utilizados

### 4.2.1 Material utilizado para las zonas de transferencia de calor

Debido a que es un prototipo que puede estar sometido a cambios en el futuro y no es un equipo que va a funcionar las 24 horas del día los 365 días del año, se tuvo que hacer un compromiso por los elevados costos de los materiales y se usó acero negro en lugar de usar acero inoxidable. El material no trae ningún problema de transferencia de calor, pero la corrosión si puede ser un problema. Sin embargo a un uso poco frecuente y corto en el laboratorio, el material aguantará un tiempo prudente.

El material utilizado para todas las superficies que están en contacto con el fuego y gases de combustión, está construido por acero negro de 3mm de espesor. Solamente los tubos tienen un espesor de 2 milímetros, porque en el mercado no hay tubos de 1 pulgada de espesor de 3 milímetros.



Figura 4.10 Intercambiadores de calor del sector de convección.

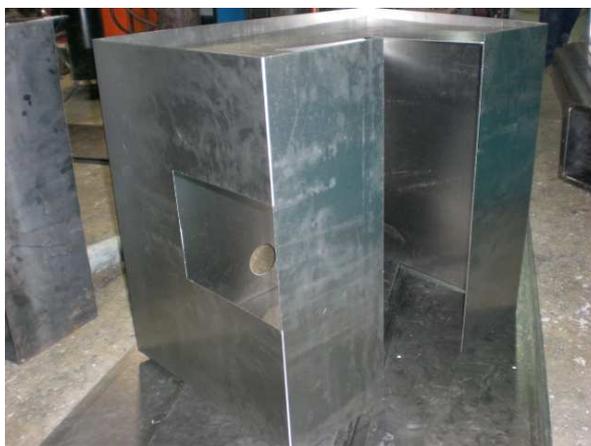
### 4.2.2 Material utilizado para ductos de aire

Los ductos de aire solamente aguantarán la circulación de aire caliente. No sufren la corrosión que soportan las superficies que intercambian calor. Por esta razón se puede trabajar con acero negro pero de un espesor menor. Se utilizó un espesor de 1 milímetro para los ductos. Adicionalmente al momento de dar forma a los ductos, es más fácil trabajar con una lámina fina.



**Figura 4.11 Ductos de aire ubicados en sección de confección.**

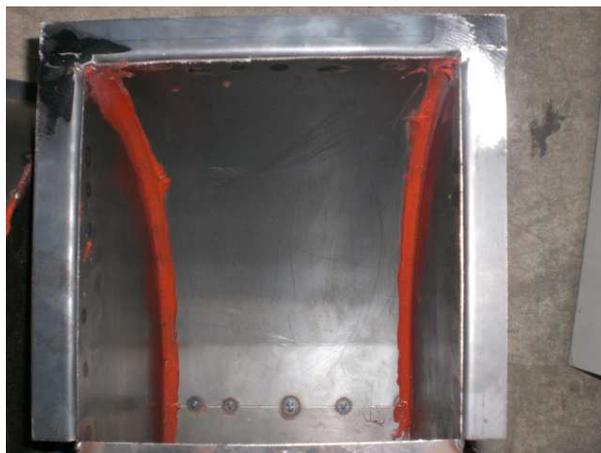
La cámara exterior donde va a circular el aire, para aprovechar la energía de radiación, tiene un espesor de 1.5 mm de acero negro. Simplemente tiene que soportar la circulación de aire en su interior.



**Figura 4.12 Cámara exterior de circulación de aire de la cámara de combustión**

### **4.2.3 Empaques y aislamientos**

Es importante que el equipo no tenga fugas. Por esta razón en los ductos se utilizó silicón de alta temperatura. En la figura 4.13 se puede apreciar donde fue colocado el silicón.



**Figura 4.13 Silicon en las uniones de los ductos**

Este silicón puede aguantar hasta 315 °C, no se espera alcanzar dicha temperatura en los ductos, ya que el aire actúa como refrigerante y la máxima temperatura del aire prevista son 120 °C.

Los empaques de zonas más calientes son de amianto (también llamado asbesto), como las uniones entre la cámara de combustión y las partes de convección. La figura 4.14 ilustra la ubicación de estos empaques. El amianto puede resistir temperaturas de 500 °C.



**Figura 4.14 Empaques de amianto puestos en las zonas de convección.**

El recubrimiento del equipo está dado por lana de vidrio con un recubrimiento de aluminio, que le brinda una mejor resistencia mecánica.

## 4.3 Procesos mecánicos utilizados

### 4.3.1 Soldadura

Es una de las partes de construcción más críticas del proceso de construcción, porque en el interior de las piezas se va a transportar gases. En unas piezas circularán gases de combustión y por otras el aire a ser calentado. El aire va a ser forzado a seguir un camino, el aire al igual que otros fluidos, prefieren ir por la ruta o el camino más fácil. Es por esta razón que las costuras de suelda no deben tener fallas o huecos por los cuales salga el aire fácilmente.

Por esta razón hay que usar buenas soldadoras y personal calificado, para que realice el trabajo.

Se utilizó soldadura tipo MIG (Metal Inert Gas). Este tipo de soldadura tiene un consumo de electrodo continuo, que es protegido por una nube de gas inerte. El gas protege a la soldadura de óxidos e impurezas externas al momento de soldar. Tiene como resultado un cordón de soldadura continuo, uniforme y libre de impurezas.



Figura 4.15 Personal de AICO soldando parte del generador de aire caliente.

### 4.3.2 Corte

Es un proceso que requiere de precisión para el posterior doblado y soldado de las piezas. El corte es la parte inicial de manufactura de las diferentes partes del equipo. Si se inició mal todos los procesos posteriores tendrán errores y problemas al momento del ensamblaje.

Los cortes rectos se realizaron en una guillotina hidráulica con control numérico, que se muestra en la figura 4.16 Control numérico significa que se ingresan las distancias de corte digitalmente y la máquina automáticamente fija la distancia ingresada, sin intervención del operario.



**Figura 4.16 Guillotina hidráulica con control numérico.**

En otras partes se requerían otras formas que no sean rectas. Por esa razón se utilizó una máquina punzonadora con control numérico, que se puede apreciar en la figura 4.17. Básicamente lo que hace esta máquina es dibujar en el metal, un plano ingresado en la computadora. La máquina se ubica por las distancias ingresadas en el plano y las herramientas seleccionadas para el trabajo.



**Figura 4.17 Operario utilizando máquina punzonadora con control numérico.**

El resultado obtenido, son piezas de gran precisión para ser ensambladas. Por ejemplo los ductos requerían de formas bastante particulares y con mucha precisión, para que coincidan exactamente y no se formen fugas de aire. Estas piezas se ilustran en la figura 4.18.



**Figura 4.18** Partes de los ductos punzonadas.

### **4.3.3 Doblado**

Otra máquina utilizada es la plegadora para doblar láminas de la forma requerida. Como el generador de aire caliente tiene una forma cuadrada, se requirieron de muchos dobleces de 90 grados. Para esto se utilizó una plegadora con control numérico mostrada en la figura 4.19.



**Figura 4.19** Operario ocupando la plegadora de control automático.

En el proceso del doblado es importante tomar en cuenta si las medidas del plano se requieren internas o externas. A lo que se refiere con internas o externas, es que al momento de doblar las medidas pueden variar porque el espesor del material influye. Si no se toma en cuenta el espesor del material unas piezas pueden quedar más grandes o pequeñas de lo previsto.

#### 4.4 Correcciones mecánicas

Por más que se realizaron 5 modelos en 3 dimensiones en Autocad, las piezas en la realidad no cuadran como está previsto debido a un error humano, el doblado hace que las piezas tengan mayor tamaño externo y la soldadura ocupa un espacio que poco se lo toma en cuenta al momento de realizar el dibujo en Autocad. Por eso algunas partes se las movió un poco, siempre respetando el área indispensable para intercambio y una buena circulación del aire. Por ejemplo en las partes donde se aprovecha la convección de los gases de combustión, se tuvo que reubicar los tubos porque no existía espacio para las soldaduras de los tubos y de las partes laterales de las piezas, como se aprecia en las figuras 4.20 (a) y (b).

a)



b)

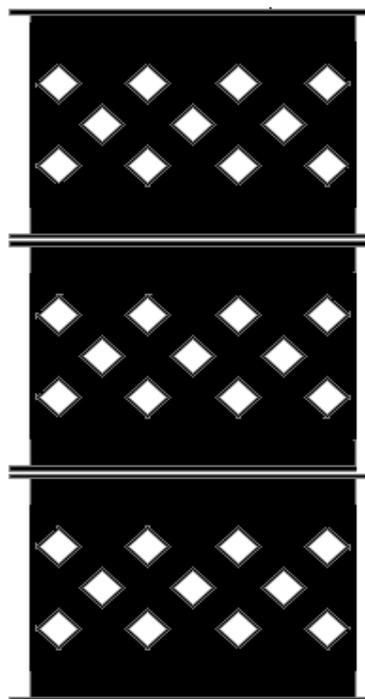


Figura 4.20 Vista lateral secciones de convección. (a)Construida. (b)Diseñada en Autocad.

Hubo piezas ya fabricadas en metal, las cuales fallaron y tuvieron que ser repetidas. Se utilizó aparte de los dibujos en 3 dimensiones y planos, cartón para fabricar ciertas piezas y tener una mejor idea de su acople. Por ejemplo, los ductos sufrieron muchos cambios, hasta lograr un acople sin fugas y que no restrinja la circulación del aire. Se hicieron los ductos de cartón, como se ilustra en la figura 4.21.



**Figura 4.21 Ductos de cartón elaborado previa a la construcción en metal**

Siempre ocurren fallas y existe la necesidad de repetir, pero hay que tratar de visualizar las piezas previas a la construcción para luego no tener problemas con su ensamblaje.

#### **4.4.1 Facilidad de ensamblaje del equipo**

Las piezas pueden tener el mejor diseño, funcionar perfecto, pero estas tienen que ser acoplables con el resto del equipo y funcionar bien en conjunto. En este equipo las partes tienen facilidad de acoplarse, calzan unas con otras, entran los empaques y lo más importante entran herramientas de ajuste, las cuales permiten un buen armado robusto y sin fugas del equipo.

#### **4.4.2 Construcción de piezas con la disponibilidad de herramientas del taller.**

Todas las partes del equipo fueron elaboradas y ensambladas en el taller de la empresa AICO. Las formas de las piezas, los espesores y el tipo de material utilizado, influyen directamente en las herramientas requeridas. La punzonadora llega a trabajar con planchas metálicas de un espesor máximo de 6 milímetros. En este caso no hubo inconvenientes,

porque las planchas utilizadas más gruesas no superaron los 3 milímetros. Pero al momento de realizar la parrilla que tiene un espesor mayor a 6 mm, se prefirió utilizar varillas ya que se hubiera tenido problemas al perforar la plancha.

Las formas de las piezas dependieron de la disponibilidad de los punzones existentes en la empresa. Los punzones son los elementos que perforan la plancha y de ellos depende la forma obtenida en la plancha.

En cuestión de soldadura, se prefirió trabajar con un solo material, en este caso acero negro. Soldar materiales diferentes no siempre se puede por compatibilidad de metales o lleva mucho tiempo el hacerlo.

## **5 Diseño del sistema de control del generador de aire caliente**

El generador de aire caliente debe calentar aire a una temperatura determinada, definida por el requerimiento de los materiales a secar. Para obtener la temperatura deseada se debe variar ciertas condiciones en el funcionamiento del equipo.

### **5.1 Identificación de variables de control**

Es importante al momento de controlar un proceso, determinar primero cuales son las variables de salida y de entrada de un proceso.

Variables de entrada son todas las que independientemente de otras pueden modificar las condiciones internas del proceso. Por otro lado las variables de salida ayudan a obtener información del estado interno del proceso. En el caso del generador de aire caliente, la variable de salida es la temperatura del aire de salida. Brinda información si se está dando una correcta combustión, poca o demasiada alimentación de cuesco de palma y si se está suministrando la correcta cantidad de aire de combustión.

Las variables de entrada se pueden dividir en dos: las que se pueden controlar y las que no se pueden controlar. En este caso la alimentación del cuesco de palma africana y la cantidad de aire de combustión, son las únicas variables controlables. La cantidad de aire a ser calentado, es siempre la misma y no varía, por lo tanto, no se la puede controlar. Así mismo la temperatura del aire de entrada y la humedad ambiental son variables no controlables.

Con este análisis básico, se ha logrado obtener la información necesaria para controlar el sistema. Las únicas variables internas capaces de modificar nuestro proceso son el aire de combustión y la alimentación de cuesco de palma africana. Modificando éstas se puede llegar a obtener las condiciones de operación, las cuales van a permitir fijar la temperatura deseada del aire de salida.

#### **5.1.1 Alimentación combustible**

Se puede entender fácilmente que la alimentación de combustible altera al proceso interno, ya que mientras mayor sea la alimentación, más energía se libera y está disponible a ser intercambiada con el aire. Cabe recordar que el equipo está previsto para una alimentación máxima de 30 kg de cuesco por hora. Puede funcionar con una alimentación menor.

Simplemente liberará menos energía, para una cantidad fija de aire a ser calentado y la temperatura de salida del aire será menor a la obtenida con máxima alimentación.

### **5.1.2 Aire de combustión**

En este caso el aire de combustión y la alimentación están estrechamente interrelacionadas, porque mientras más alimentación, mayor requerimiento de aire se necesitará para alcanzar una combustión completa. El suministro de aire de combustión es proporcional a la alimentación, respetando el exceso de aire de combustión recomendado. Si ingresa demasiado aire se enfría la cámara de combustión. Una menor cantidad de aire genera combustión incompleta. Se recomienda una alimentación e ingreso de aire constante, para tener temperatura de salida del aire constante y una buena combustión.

## **5.2 Sistema de control**

Debido a que es un equipo pequeño, con una cámara de combustión de reducido tamaño, es muy complicado alimentarlo automáticamente. El soplador de aire de combustión es pequeño y de una sola fase, lo cual complica la instalación de un variador de velocidad. Para que exista un sistema de control manejado automáticamente, las variables internas deben ser controladas automáticamente también. Por estas razones el control de temperatura va ser totalmente manual.

La configuración del sistema de control es de retroalimentación. Una configuración de retroalimentación significa, que la variable de salida indica si debe hacer un cambio de las variables de entrada que son controlables. Es decir la temperatura del aire de salida indicará si se debe aumentar o disminuir la cantidad que se envía a la cámara de combustión. La cantidad de aire de combustión se mantendrá constante. Si se quiere aumentar la temperatura, se debe aumentar la alimentación. Si se quiere disminuir la temperatura hay que hacer lo contrario.

### **5.2.1 Alimentación manual**

La alimentación manual hay que realizarla pesando el queso antes del ingreso a la cámara de combustión. Tomar un registro del tiempo, para saber la frecuencia de la alimentación y conservar una combustión uniforme.

Al momento de alimentar, se debe procurar que todo el material quede regado uniformemente en la parrilla.

### **5.2.2 Control manual de ingreso de aire de combustión**

El soplador de aire de combustión en su parte lateral tiene un regulador de flujo de aire. Este regulador está marcado y se sabe la cantidad de aire que ingresa a la cámara de combustión.

Se determinará un caudal de aire lo suficientemente alto para conseguir una combustión completa del cuesco de palma para la alimentación máxima. Esto se realiza al observar que los gases de combustión no generen exceso de hollín y partículas. Una vez determinado el caudal de aire máximo se lo mantendrá constante y únicamente variará la alimentación de cuesco de palma africana.

## 6 Resultados

### 6.1 Operación del generador de aire caliente

El generador de aire caliente logra encender y combustionar al cuesco de palma africana. Como se ilustra en la figura 6.1 el aire que circula dentro de los intercambiadores de calor alcanza a circular por todos los intercambiadores de calor. A la salida el aire de calentamiento tiene una mayor temperatura.



Figura 6.1 Quemador del generador de aire caliente en operación.

#### 6.1.1 Puesta en marcha el equipo

Antes de iniciar la operación del equipo, hay que revisar los siguientes aspectos:

- Conectar los ventiladores al toma corriente.
- Verificar que la parrilla este limpia, con todos sus orificios libres.
- Recoger toda la ceniza existente en la parte inferior de la parrilla.

Tomando en cuenta los puntos anteriores se puede proceder al encendido del cuesco de palma africana.

### **6.1.2 Encendido**

El encendido del generador de aire caliente es complicada porque el cuesco de palma africana es bastante duro y se demora en prender. Por esto al inicio se debe usar bastante papel y diesel o aceite para encenderlo.

No es recomendable usar hidrocarburos muy volátiles como gasolina, kerosene o alcohol, porque pueden causar explosiones y se queman muy rápidamente. El cuesco para encenderse requiere que el hidrocarburo demore en su combustión.

Solamente cuando una buena cantidad de cuesco esté combustionado en la parrilla, se puede iniciar con el ingreso de aire de combustión. Si el aire ingresa anticipadamente puede apagar todo el cuesco de la parrilla.

### **6.1.3 Accionamiento de ventiladores**

Como se mencionó en el punto anterior, hay que prender al soplador de combustión cuando el cuesco de palma ya este encendido.

El soplador del aire que circula por los intercambiadores, debe prenderse cuando la combustión ya esté estable. Cuando existe combustión en el quemador del equipo, este soplador obligatoriamente debe estar encendido. Porque este refrigera a los intercambiadores de calor y la cámara de combustión. Sin el funcionamiento de este, el equipo puede llegar a temperaturas que superen las temperaturas permitidas de sus materiales de fabricación.

### **6.1.4 Almacenamiento adecuado de combustible**

El cuesco de palma africana debe estar seco antes de ingresar al quemador. Si es que el material está mojado, puede causar problemas al momento de encender y en una mala combustión.

### **6.1.5 Operación y control del generador de aire**

La parte fundamental en la operación del equipo es el control de la combustión del cuesco de palma. Hay que alimentar constantemente y en cantidades iguales al quemador. Retirar todos los residuos que impidan el paso del aire de combustión. El cuesco debe ser esparcido de manera uniforme en toda la parrilla, como se ilustra en la figura 6.2.



**Figura 6.2 Operario distribuyendo el cuesco de palma africana en la parrilla.**

Adicionalmente hay cosas que se realizan con menos frecuencia, como, ver el correcto funcionamiento de los ventiladores, chequear el desempeño de los diferentes materiales del equipo y corregir cualquier fuga de aire caliente que exista.

### **6.1.6 Control de la temperatura del aire caliente**

Si se requiere mayor temperatura, hay que incrementar la alimentación del equipo y proporcionalmente si existe la necesidad de bajar la temperatura del aire de salida, se debe hacer lo contrario.

## **6.2 Límites mínimo y máximo de operación**

### **6.2.1 Máxima y mínima capacidad de alimentación requerida**

El equipo tiene una alimentación máxima de 25 kg de cuesco de palma por hora.

Con una alimentación de 0.5 kg por minuto, existe demasiada acumulación de combustible en el quemador y se apaga la llama.

Se debe observar la llama en el interior del quemador constantemente, porque si existe solo la brasa del cuesco quemado, esta no es suficiente para mantener al equipo prendido.

## 6.2.2 Temperatura máxima de salida del aire caliente

La temperatura del aire de entrada fue de 18 °C y la temperatura máxima del aire caliente de salida fue de 118 °C. Se obtuvo un diferencial de temperatura de 100 °C.

## 6.2.3 Caudal y velocidad máxima de salida de aire caliente

Velocidad del aire de calentamiento

- Velocidad del aire de entrada: 20.8 m/s
- Velocidad del aire de salida en los etapas de convección:
  - 1ra etapa : 16.5 m/s
  - 2da etapa : 16.2 m/s
- Velocidad del aire de salida después de la cámara de radiación:
  - 8.7 m/s

El caudal máximo de salida son  $400 \frac{m^3}{h}$  de aire caliente, con una velocidad de  $8.7 \frac{m}{s}$ .

Los ductos e intercambiadores en la zona de convección presentaron pocas perdidas en la velocidad y caudal de aire. El problema del poco caudal de aire caliente a la salida del equipo, está en un mal diseño de la cámara de radiación. Aquí se generan la mayoría de perdidas en el caudal y velocidad del aire caliente de salida.

## 6.2.4 Eficiencia energética del equipo

El equipo tiene una eficiencia energética del 20%. Con el 60% de eficiencia energética y el 70% de utilización de la parrilla, se esperaba calentar  $1200 \frac{m^3_{aire}}{h}$  con un diferencial de temperatura de 100°C. Lo que se obtuvo realmente fueron  $400 \frac{m^3_{aire}}{h}$  caliente con un diferencial de temperatura de 100°C.

## 6.3 Observaciones

### 6.3.1 Facilidad de ensamblaje

Todos las partes del equipo son fáciles para ensamblar, pero debido a la gran cantidad de tornillos, tuercas y arandelas de presión, su ensamblaje toma aproximadamente 8 horas. Por esta razón es conveniente hacerlo entre dos o tres personas y tomar en cuenta el tiempo de ensamblaje para cualquier actividad.

### 6.3.2 Comportamiento de los materiales del equipo

Las partes del equipo en su mayoría resistieron bastante bien a las altas temperaturas del equipo. En la figura 6.3 se ilustra la única falla, el silicón de alta temperatura se quemó debido al contacto con la llama. No estaba prevista la salida de llama por el visor de la puerta del quemador.



**Figura 6.3 Silicón quemado por la llama que sale por el visor de la puerta.**

Se corrigió el problema, cambiando la posición del deflector del aire de combustión y evitando que la llama pase a través del visor de la puerta.

El acero negro tiene problemas de corrosión con las altas temperaturas, pero como se mencionó anteriormente por costos de fabricación y cambios posteriores, no se lo fabricó de acero inoxidable. En la figura 6.4 se observa los problemas de corrosión presentados en la puerta del quemador.



**Figura 6.4 Corrosión originada la puerta del quemador**

### 6.3.3 Residuos

Es importante tener limpia la parrilla, existe la formación de un material que no se quema, impide el paso del aire de combustión y quita espacio útil de parrilla.

En la figura 6.5 se ilustra la forma de retirar los residuos formados en la parte superior de la parrilla.



**Figura 6.5** Procedimiento para retirar los residuos de la parte superior de la parrilla.

### 6.3.4 Limpieza

La suciedad en la superficie de los intercambiadores de calor es un factor crítico, el equipo es desmontable y se puede limpiar todos los intercambiadores de calor. En la figura 6.6 se puede observar la limpieza de los tubos en la zona de convección.



**Figura 6.6** Limpieza de los tubos de la zona de convección.

## 7 Conclusiones y Recomendaciones

- El equipo logró el requerimiento de diferencial de temperatura propuesto en el inicio de la tesis. Se logró obtener un diferencial de 100 °C en la temperatura de salida del aire caliente.
- Todas las partes del equipo son desmontables, permiten realizar limpieza y no perder superficie de transferencia de calor.
- El equipo permite un buen acople entre sus piezas minimizando fugas de aire caliente.
- Los materiales resisten las temperaturas de trabajo.
- Los ductos de las zonas de convección tienen mínimas pérdidas de velocidad del aire, porque los ductos no tienen esquinas que generen remolinos o mayor fricción.
- La pérdida en velocidad y caudal de aire caliente se encuentra en la cámara que rodea al quemador. Esta cámara debe ser modificada, es demasiado ancha y requiere deflectores en el interior de esta, para evitar una disminución del caudal de aire hacia flujo laminar.
- El acero negro con las altas temperaturas de operación tiene problemas con la corrosión. El equipo debe ser elaborado en acero inoxidable para contrarrestar los severos efectos de corrosión.
- La eficiencia del equipo es del 20% sin aislamiento exterior. Se debe continuar con este proyecto, modificando las equivocaciones del primer prototipo, se espera que la eficiencia mejore notablemente.
- El control de temperatura del aire de salida se lo realiza únicamente modificando la alimentación de cuesco de palma. Es posible hacerlo automático con la implementación de un tornillo sinfin en la alimentación, variador de velocidad en el soplador de aire de combustión y un controlador automático.
- El soplador escogido para el aire de combustión, tiene la capacidad suficiente para abastecer a una alimentación máxima del equipo.
- El tamaño de la parrilla es justo para la alimentación planificada en el comienzo. Se logró quemar hasta 25 kg de cuesco de palma africana por hora.
- El cuesco de palma africana produce una excelente combustión y es un combustible recomendado para ser quemado en cualquier equipo.

- El soplador de aire para ingresar a los intercambiadores de calor, debe ser reemplazando utilizando cálculos experimentales de fricción y pérdidas del equipo.
- El generador de aire caliente requiere de una chimenea más alta para evitar que los gases de combustión molesten a las personas cercanas al equipo.

## 8 Bibliografía

Couper, James R., W R. Penney, James R. Fair, y Stanley M. Walas. Chemical Process Equipment Selection and design. 2da ed. Estados Unidos: Elsevier, 2005.

Fanchi, John R. Energy Technology and Directions for the Future. Estados Unidos: Elsevier, 2004.

Graham, Frank D. Audels Engineers and Mechanics. 10 vols. Nueva York: The O. Audel & Co, 1928.

Himmelblau, David M. Principios Básicos y Cálculos en Ingeniería Química. 6ta ed. México D.F: Pearson Education, 1997.

Incropera, Frank P., y David P. DeWitt. Fundamentos de Transferencia de Calor. 4ta ed. México D.F: Prentice Hall, 1999.

Krasny, John F., William J. Parker, y Vytenis Babrauskas. Fire behavior of Uphostered Furniture and Mattresses. Estados Unidos: William Andrew, 2001.

Lockhart, Shawna. A Tutorial Guide to AutoCad 2002. Estados Unidos: Prentice Hall, 2003.

McCabe, Warren L., Julian C. Smith, y Peter Harriot. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. 6ta ed. México D.F: McGraw-Hill, 2001.

Ogunnaike, Babatunde A., y W H. Ray. Process, Dynamics and Control. Nueva York: Oxford University Press, 1994.

Perry, John H. Chemical Engineers Handbook. 4ta ed. Japón: McGraw-Hill, 1963.

Smith, J M., H C. Van Ness, y M M. Abbott. Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química. 6ta ed. México D.F: McGraw-Hill, 2001.

Spiro, Thomas G., y William M. Stigliani. Chemestry of the Enviroment. 2da ed. Estados Unidos: Prentice Hall, 2003.

Welty, James R., Charles E. Wicks, y Robert E. Wilson. Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa. México D.F: Limusa, 1998.

\* La capacidad calórica del cuesco de palma se obtuvo del gerente de planta de Cementos Guapán.