

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN HORNO PARA EL SECADO DEL COAGULO DEL  
LÁTEX DE CAUCHO NATURAL

JUAN CAMILO RODRIGUEZ MEJIA  
MANUEL ARTURO CARREÑO GONZALEZ

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA  
ESCUELA DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
BUCARAMANGA

2013

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN HORNO PARA EL SECADO DEL COAGULO DEL  
LÁTEX DE CAUCHO NATURAL

JUAN CAMILO RODRIGUEZ MEJIA  
MANUEL ARTURO CARREÑO GONZALEZ

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director:

Edwin Córdoba Tuta

Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA

ESCUELA DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA

BUCARAMANGA

2013

Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

## DEDICATORIA

La mejor forma en que he podido entender la vida ha sido a través del modelo matemático denominado la teoría del caos, que nos dice que el resultado de algo no ocurre por una sola cosa sino por la suma de varias y que la incertidumbre de cada momento es muy alta para que cambie de dirección o sentido. Y la mejor forma en que he podido entender al ser humano es por el estudio de la epi-genética que nos dice que la composición genética del ser humano en su mayoría aproximadamente un 90 % se forma por el ambiente que lo rodea.

Dicho esto tengo que decir que el “caos” se portó bien conmigo porque el ambiente que me han dado para interactuar me permitió desarrollarme, intelectual, física y emocionalmente; todo ello en su mayoría gracias a mis padres Luis Manuel Carreño Ruiz y Delcy González Durán. En otros rubros de la vida importantes tengo que decir que muchas personas durante el proceso dinámico que siempre nos somete el “caos” son importantes, como la compañía permanente de mis Hermanos: Fabián Andrés Carreño y Daniela Carreño; La Ternura, comprensión amor, sabiduría de mi novia: Ivonne María Ruiz Trujillo. Por ultimo a mi tía Zoraída y a Emilce, apoyo eterno!

(CARREÑO GONZÁLEZ, MANUEL ARTURO)



## DEDICATORIA

A mis padres María Cristina Mejía Vergara y Orlando Rodríguez Jiménez quienes han confiado en mi en el transcurso de mis estudios y desarrollo de mi tesis de grado. siendo ellos los transmisores de energía positiva en los momentos frustrantes y consejeros en la toma de las mejores decisiones.

(RODRIGUEZ MEJÍA, JUAN CAMILO)

## **AGRADECIMIENTOS**

Se agradece a la Universidad Pontificia Bolivariana por permitir la utilización de todos los instrumentos y equipos necesarios para el desarrollo del proyecto.

Inmensos agradecimientos a los ingenieros Edwin Jesús Córdoba Tuta, Javier Mauricio Castellanos Olarte, Miguel Ángel Reyes Orozco y Juan Manuel Argüello Espinosa y a todo el cuerpo de docentes de la facultad de Ingeniería mecánica por su aporte en el desarrollo formativo como ingenieros mecánicos.

También un agradecimiento muy especial al ingeniero mecánico Gerente General de Industrias Falcon Néstor Raúl Monsalve Hazbón por su apoyo incondicional, conocimiento compartido y sugerencias.

# Contenido

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>14</b>
<b>2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>15</b>
<b>3. OBJETIVOS</b>	<b>16</b>
3.1. OBJETIVO GENERAL . . . . .	16
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS . . . . .	16
<b>4. MARCO TEÓRICO</b>	<b>17</b>
4.1. Caucho natural . . . . .	17
4.1.1. Proceso de transformación del caucho natural . . . . .	17
4.1.2. Caucho natural y su clasificación por productos . . . . .	18
4.1.3. Secado del caucho natural . . . . .	19
4.2. Sopladores de Aire . . . . .	20
4.2.1. Definición . . . . .	20
4.2.2. Tipos de sopladores de aire . . . . .	20
4.2.3. Ventiladores de flujo axial . . . . .	20
4.2.4. Ventiladores de flujo radial . . . . .	21
4.2.5. Turbinas regeneradoras . . . . .	22
<b>5. DISEÑO DEL HORNO DESHIDRATADOR</b>	<b>24</b>
5.1. Parámetros de Diseño . . . . .	24
5.1.1. Calidad . . . . .	24
5.1.2. Combustible . . . . .	24
5.1.3. Cantidad de Caucho a secar . . . . .	24
5.1.4. Temperatura de Trabajo . . . . .	25
5.1.5. Norma para el diseño del horno . . . . .	25
5.2. Diseño de la cabina de secado . . . . .	26
5.2.1. Estructura Externa . . . . .	26
5.2.2. Aislamiento . . . . .	28
5.2.3. Diseño de Tubería . . . . .	30
5.2.4. Selección de la Turbina Regeneradora . . . . .	30
5.2.5. Simulación Real de la Tubería y la Turbina . . . . .	30
5.3. Diseño del quemador de Carbón . . . . .	32
5.3.1. Modo de ignición del carbón mineral . . . . .	33
5.3.2. Pruebas realizadas al carbón . . . . .	33
5.3.3. Diseño de la banda transportadora . . . . .	38
5.3.4. Selección y ubicación del moto-reductor . . . . .	39
5.3.5. Selección del Soplador y diseño del ducto del soplador . . . . .	39
<b>6. CONSTRUCCIÓN DEL HORNO DESHIDRATADOR</b>	<b>41</b>
<b>7. PRUEBAS DEL HORNO DESHIDRATADOR</b>	<b>45</b>
7.1. Pruebas Preliminares . . . . .	45
7.1.1. Prueba preliminar numero 1 . . . . .	45
7.1.2. Prueba preliminar numero 2 . . . . .	46
7.1.3. Prueba preliminar numero 3 . . . . .	47
7.1.4. Prueba preliminar numero 4 . . . . .	47
7.2. Prueba Final . . . . .	48

<b>8. RESULTADOS</b>	<b>53</b>
<b>9. OBSERVACIONES</b>	<b>56</b>
<b>10. CONCLUSIONES</b>	<b>57</b>
<b>11. RECOMENDACIONES</b>	<b>58</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>59</b>
<b>ANEXO A</b>	<b>60</b>
<b>ANEXO B</b>	<b>63</b>
<b>ANEXO C</b>	<b>65</b>

## Lista de Figuras

4.1. Porcentajes de consumo de energía eléctrica y calorífica, tomada de [3] . . . . .	18
4.2. diversificación de productos del caucho natural, tomada de [3] . . . . .	19
4.3. Gráfica de caracterización del secado del agua, tomada de [6] . . . . .	20
4.4. Impeler de alabes curvos hacia adelante, tomada de [5] . . . . .	21
4.5. Impeler de alabes curvos hacia atrás, tomada de [5] . . . . .	21
4.6. Impeler de alabes radiales rectos, tomada de [5] . . . . .	22
4.7. Curvas de potencia y eficiencia, tomada de [5] . . . . .	22
4.8. Curvas de presión estática, tomada de [5] . . . . .	23
4.9. Figura de una turbina regeneradora típica, tomada de [5] . . . . .	23
5.1. Imagen de la Tabla publicada en la norma, tomada de [4] . . . . .	26
5.2. Análisis de esfuerzos generados por carga . . . . .	28
5.3. Análisis de deformación total . . . . .	28
5.4. Análisis de factor de seguridad . . . . .	29
5.5. Gráfico del aislante aplicado entre la estructura externa y los paneles . . . . .	29
5.6. Esquema del diseño de la tubería. . . . .	31
5.7. Fotografía del montaje realizado para simular la tubería y la turbina. . . . .	31
5.8. Fotografías de visualización de flujo a través de humo marcador . . . . .	32
5.9. Fotografía del primer arreglo con un soplador manual . . . . .	37
5.10. Fotografía del segundo arreglo con dos sopladores manuales . . . . .	37
5.11. Fotografía del tercer arreglo con el soplador industrial . . . . .	37
5.12. Fotografía de la banda con sus tensores . . . . .	38
5.13. Fotografía de la banda puesta prueba con calor . . . . .	38
5.14. Gráfica de recomendaciones para ductos de descarga, tomada de [1] . . . . .	40
6.1. Fotografías del marco del horno hecho en FEMARCO Ltda. . . . .	41
6.2. Fotografía de contrucción de los páneles del horno . . . . .	41
6.3. Fotografía del marco para el quemador . . . . .	42
6.4. fotografía del conjunto del marco terminado junto con el serpentín. . . . .	42
6.5. Fotografía de las bridas del intercambiador . . . . .	42
6.6. Fotografías de la banda transportadora. . . . .	42
6.7. Fotografía del ensamble de la banda con el marco del quemador . . . . .	43
6.8. Fotografía muestra detalle de las guías de la banda transportadora. . . . .	43
6.9. Fotografía del quemador de carbón terminado . . . . .	43
6.10. Fotografía de la turbina en sitio. . . . .	44
6.11. Fotografía de la tubería fabricada . . . . .	44
6.12. Fotografía de la tubería instalada en sitio . . . . .	44
6.13. Fotografía de los paneles instalados . . . . .	44
6.14. fotografía de las puertas instaladas . . . . .	44
7.1. Fotografía de la primera prueba realizada al horno . . . . .	45
7.2. Fotografía de la segunda prueba realizada al horno . . . . .	46
7.3. Fotografía de la tercera prueba realizada al horno . . . . .	47
7.4. Fotografía de la cuarta prueba realizada al horno. . . . .	48
7.5. Fotografías del proceso de coagulación del látex de caucho natural. . . . .	49
7.6. Fotografía de la cantidad de látex ubicado en la bandeja. . . . .	49
7.7. Fotografía de bandeja perforada. . . . .	49
7.8. Fotografía de ubicación de las bandejas con látex dentro de la cabina de secado. . . . .	50
7.9. Fotografías de la primera hora de secado del caucho. . . . .	50

7.10. Fotografías de la segunda hora de secado del caucho. . . . .	50
7.11. Fotografías de la tercera hora de secado del caucho . . . . .	50
7.12. Fotografías de la cuarta hora de secado del caucho. . . . .	51
7.13. Fotografías de la quinta hora de secado del caucho . . . . .	51
7.14. Fotografías de la sexta hora de secado del caucho . . . . .	51
7.15. Temperatura registrada por la RTD1 . . . . .	51
7.16. Temperatura registrada en RTD2 . . . . .	52
8.1. Fotografía del horno realizado en el proyecto . . . . .	54
8.2. Fotografía del horno de la planta de Cimitarra . . . . .	54
8.3. Fotografía del caucho seco por el horno del proyecto. . . . .	54
8.4. Fotografía del caucho seco por el horno de Cimitarra . . . . .	54

## Lista de Tablas

5.1. Tabla de tubería utilizada . . . . .	30
5.2. Tabla con los pesos de los fragmentos del carbón . . . . .	34
5.3. Tabla de temperaturas alcanzadas con la muestra de [20g-120g] . . . . .	35
5.4. Tabla de temperaturas alcanzadas con la muestra [120g-220g] . . . . .	35
5.5. Tabla de temperaturas alcanzadas con la muestra [220g-320g] . . . . .	35
5.6. Tabla de temperaturas alcanzadas con la muestra [320g-420g] . . . . .	35

## **RESUMEN GENERAL DEL TRABAJO DE GRADO**

**TITULO:** DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO PARA EL SECADO DEL COAGULO DEL LÁTEX DE CAUCHO NATURAL

**AUTORES:** Juan Camilo Rodríguez Mejía; Manuel Arturo Carreño González

**FACULTAD:** Ingeniería Mecánica

**DIRECTOR:** Edwin Jesús Córdoba Tuta

### **RESUMEN**

El Proyecto surge como iniciativa de diseñar y construir un horno secador de caucho natural el cual logre disminuir los tiempos de secado, aumentar la calidad del polímero y ser productivos en una industria.

La idea innovadora presente en el proyecto es la utilización del carbón mineral como fuente generadora de calor. la cual es aprovechada para calentar el aire para ser dirigido a la cabina de secado. El uso del carbón mineral es debido a que se necesitan reducir los costos de producción en donde se pretende ser competitivos.

Palabras claves: Caucho natural, secado de caucho natural, horno deshidratador.



## **GENERAL SUMMARY ABOUT PROJECT GRADUATE**

**TITLE:** DESIGN AND BUILDING AN OVEN FOR DRYING CLOT FROM LATEX OF NATURAL RUBBER

**AUTHORS:** Juan Camilo Rodríguez Mejía; Manuel Arturo Carreño González

**FACULTY:** Mechanical Engineering

**DIRECTOR:** Edwin Jesús Córdoba Tuta

### **ABSTRACT**

This project comes us an initiative to design and build a dryer oven for natural rubber which achieves reduce drying times, increase the quality of the polymer and be productive in a new industry.

The innovate idea of the project is the use of coal as a source of heat, which is used to heat the air and be directed to the drying cabinet. The use of coal is needed due to reduce cost of production where it is intended be competitive.

Key words: Natural rubber, natural rubber drying, drying oven.

# 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad gran parte de los objetos que se usan a diario están fabricados por diferentes clases de polímeros, en la cual se destaca el caucho natural. Este increíble compuesto otorgado por la naturaleza ha influido de forma notable en el desarrollo de la humanidad debido a sus grandes propiedades mecánicas las cuales no pueden ser alcanzadas por cauchos sintéticos derivados del petróleo.

El proceso de transformación del látex de caucho natural demanda una amplia serie de tareas en la cual se encuentra la fase de deshidratado del coágulo. Este punto es el más importante y de mayor cuidado debido a que sus propiedades mecánicas y químicas tienden a ser muy susceptibles a variaciones causada por temperatura aplicada. Por esta razón, este trabajo se ha centrado en el diseño y construcción de un horno para el secado del polímero, con el cual se pueda garantizar una calidad apta para realizar post-procesos aplicados según lo requiera la demanda.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Colombia no es considerada actualmente como un país productor de caucho natural, a pesar de las condiciones favorables y ventajas comparativas naturales y competitivas que tiene para el fomento y desarrollo del cultivo. La producción nacional es insuficiente para abastecer la demanda interna, por lo cual se considera como un país importador neto.

En Santander, los cauchos técnicamente especificados son los más consumidos por la industria del departamento con 18 ton/mes, equivalente al 64 % del total del consumo, donde el mayor consumidor es la industria de suelas con 10 ton/mes, seguido del sector automotriz con 8 ton/mes para autopartes. Esta demanda requiere que los procedimientos de elaboración del caucho natural sean los más adecuados posibles para cumplir con los parámetros y estándares de la industria.

La fase más crítica en el procesamiento del látex para la obtención del caucho natural es el secado. Desde el descubrimiento del caucho natural hasta nuestros días, el secado se lleva realizando de forma muy rudimentaria y poco eficiente con respecto al tiempo de producción. Hoy en día existen varios métodos con los cuales se logra secar el coágulo del látex hasta obtener el caucho natural. La baja eficiencia de secado y los altos costos de los combustibles, conllevan a realizar un diseño pensado en disminuir notablemente los costos de producción.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

Diseñar y construir un horno secador para bandejas de coágulo del látex de caucho natural, basándose en las condiciones técnicas del horno ubicado en Cimitarra Santander y según norma ASTM E145-94, para montarlo en la nueva planta de procesamiento de caucho ubicada en la vereda Dos Bocas, municipio del Carmen de Chucuri, Santander.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Recolectar información acerca del funcionamiento del horno secador para caucho natural ubicado en Cimitarra Santander y otros de funcionamiento similar por medio de visitas al lugar y fichas técnicas. RESULTADO: Características técnicas de cada maquinaria. INDICADOR: Información de tiempo de secado, consumo de combustible, temperaturas de trabajo y otras.
2. Diseñar el horno con base en la información recolectada por medio de software CAD/CAE, cálculos termodinámicos, normas para hornos y el carbón como combustible con el fin de mejorar la producción. RESULTADO: Planos y memorias de cálculos. INDICADOR: Capacidad de secado esperado 220kg/6horas con respecto a 220kg/11horas y diseño según Norma ASTM E145-94.
3. Construir el horno de acuerdo al diseño realizado. RESULTADO: Horno de secado INDICADOR: horno funcionando de acuerdo a lo especificado.
4. Comparar los tiempos obtenidos y verificar el impacto en la calidad del producto medido en porcentaje de impurezas y consumo de combustible respecto al horno ubicado en el municipio de Cimitarra Santander. RESULTADO: Informe con la evaluación comparativa INDICADOR: Parámetros de comparación: Porcentaje de comparación de calidad, consumo de combustible y tiempos de secado.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1. Caucho natural

El caucho natural es el polímero más importante producido por plantas convirtiéndola en una materia prima utilizada para producir miles de productos, incluyendo cientos de dispositivos médicos, neumáticos, juguetes y demás. El caucho natural se obtiene del látex, el cual es una emulsión acuosa presente en los vasos laticíferos, aunque existen más de 2500 especies productoras de caucho natural, es el *hevea brasiliensis* la fuente actual más importante comercialmente[7].

El látex del caucho del *hevea brasiliensis* se obtiene mediante una incisión en el tronco llegando hasta los vasos laticíferos, posteriormente el látex es recolectado en vasijas plásticas ubicadas al final de la incisión permitiendo que el látex caiga controladamente por acción de la gravedad. El polímero es obtenido por medio del látex mediante la coagulación y secado, logrando así un producto con peso molecular de alto rendimiento llamado crepe. Debido a esta estructura molecular y alto peso molecular, el caucho natural posee propiedades de desempeño que no pueden ser alcanzadas por el caucho sintético el cual es obtenido por medio del petróleo. Las propiedades como elasticidad, resistencia, abrasión, resistencia de impacto, dispersión de calor eficiente y maleabilidad a bajas temperaturas son las más sobresalientes de este polímero natural[7].

Con más de 6 décadas de desarrollo en el campo del caucho sintético, no se ha encontrado aún con un precio-rendimiento proporcional al del caucho natural. Por consiguiente este polímero es utilizado en más de 40.000 productos incluyendo más de 400 dispositivos médicos, guantes quirúrgicos, aeronaves, neumáticos y de ingeniería y un sinnúmero de productos de consumo. La cuota de mercado del caucho natural ha aumentado desde cerca de 30 % en los años 1970 y 1980 hasta la actualidad 40 %. Más del 90 % de caucho natural se produce en Asia, especialmente en Malasia, Tailandia e Indonesia[7].

#### 4.1.1. Proceso de transformación del caucho natural

El proceso para la transformación del látex de caucho natural demanda dos tipos de energía: eléctrica y calorífica. Los combustibles utilizados para la generación de calor son: gasolina, diésel, gas natural, madera, carbón mineral, cascarilla de arroz, aserrín entre otros[3].

El procesamiento del caucho natural comienza con el rayado del árbol de caucho natural, este paso demanda muy poca cantidad de energía debido a que la recolección del látex se realiza de forma manual por todo el cultivo. Luego de la recolección se procede al inicio de la transformación del látex del cual existen diversos tipos de terminaciones de la materia prima como lo son: látex concentrado, láminas de caucho natural, bloques de caucho natural y crepe. Este paso del proceso consume energía eléctrica y calorífica pero continua siendo insignificante en comparación con los procesos que se utilizan para agregar valor y conseguir un producto totalmente terminado[3].

Los fabricantes de llantas, productos para inmersión y productores de bloques comprimidos de caucho son los mayores consumidores de energía. En la fabricación de llantas, el calor utilizado proviene de la generación de vapor con el cual se realiza el calentamiento de los moldes y la energía eléctrica se genera a través de plantas diésel. En cambio en la producción de bloques comprimidos de caucho, la energía eléctrica es consumida por los motores eléctricos que realizan las diversas funciones y el calor para deshidratar el caucho natural proviene del diésel[3].

	The proportion of energy consumption (%)	
	Electrical	Heat
Rubber sheet	16.08	83.92
Rubber bar	58.12	41.88
Concentrated latex	86.55	7.49
Tire products	56.87	43.54
Dipping products	29.50	70.50
Extruding products	45.48	54.52
Forming products	66.35	33.35
Miscellaneous products	80.39	19.61

Figura 4.1: Porcentajes de consumo de energía eléctrica y calorífica, tomada de [3]

Como se puede apreciar en la Figura 4.1 una tabla comparativa que nos muestra el consumo de energía tanto eléctrica como de calor en porcentaje.

#### 4.1.2. Caucho natural y su clasificación por productos

Principio de clasificación: Todo el proceso de transformación del caucho natural comienza por materiales crudos hasta lograr productos terminados los cuales se clasifican en 4 grupos.

**Etapa preliminar:** Látex producido por el árbol de caucho natural. Debido al bajo consumo de energía este paso no es considerado como industrial comparado con los demás. Esta etapa involucra a los agricultores, campesinos y ralladores del árbol[3].

**Etapa media:** En esta etapa, el látex es transformado a diferentes clases de materia prima tales como: látex concentrado, lamina de caucho y bloques de caucho natural. Este paso en la transformación consume una cantidad considerable de energía[3].

**Etapa final:** Esta etapa es la encargada de convertir la materia prima obtenida en la fase anterior en productos terminados. Existen grandes cantidades de industrias involucradas en fabricación de productos, estas demandan grandes cantidades de energía eléctrica y calorífica[3].

**Etapa de reciclado:** Después de su uso, algunas partes del caucho son recolectadas y recicladas por medio de técnicas adecuadas. El caucho reciclado se convierte en materia prima para la fabricación de nuevos productos[3].

Basado en la información anterior la industria del caucho y sus productos se dividen en 9 sectores (también puede ver la figura 4.2):

#### Etapa media:

1. Láminas de caucho[3]
2. Bloques de caucho [3]
3. Látex concentrado[3]
4. Caucho sintético [3]

Sector No.	Class	Products
1	Rubber sheet	crude sheet, smoked sheet, natural-dried sheet, oven-dried sheet, band, crepe, skim, skim crepe, skim block, compound rubber
2	Rubber bar	rubber block, STR rubber, TTR rubber, skim rubber, compound rubber
3	Concentrated latex	concentrated latex, skim rubber, crepe rubber.
4	Synthetic rubber	synthetic rubber
5	Tire products	tire for motorcycle (inner tube and tire), tires for automobiles (passenger car, light truck, and heavy truck), re-tread tire, special tire.
6	Dipping products	glove, medical glove, disposal glove, nipple, hot/cold bag, finger cap, water sport outfit, balloon, sporting goods, toys, cap, shoe, bandage, elastic tape
7	Forming products	sponge, carpet supporter, sandal, shoes, rubber band, connector, curing envelope rubber, curing tube, curing flap, spoon, belt, lining mat, o-ring, roller, bumper, heavy duty pad, seal, gasket, wheel
8	Extruding products	yarn, elastic thread, brine hose, hose, trim, pipe, electric cable, refrigerator seal, window/door seal, stair handle, insulator, roller, eraser
9	Miscellaneous products	chemical added rubber, compound rubber

Figura 4.2: diversificación de productos del caucho natural, tomada de [3]

### Etapa Final:

5. Llantas [3]
6. Productos de inmersión [3]
7. Productos de moldeo [3]
8. Productos de extrusión [3]
9. Productos misceláneos [3]

#### 4.1.3. Secado del caucho natural

El calentamiento y proceso de deshidratado ha tenido grandes avances y desarrollo en varias aplicaciones industriales. Los puntos críticos en el deshidratado del caucho natural son estimados en el tiempo de secado, secado uniforme, conveniencia y control en el proceso de calentamiento a altas temperaturas.

Los componentes básicos del látex del caucho natural están establecidos en porcentajes como:

- Agua: 50 % - 80 % [6]
- Caucho seco: 18 % - 45 % [6]
- Contenido de sustancias ajenas al caucho: 2 % - 5 % [6]

Nota: Las sustancias ajenas al caucho suelen ser proteínas, carbohidratos y sustancias inorgánicas [6].

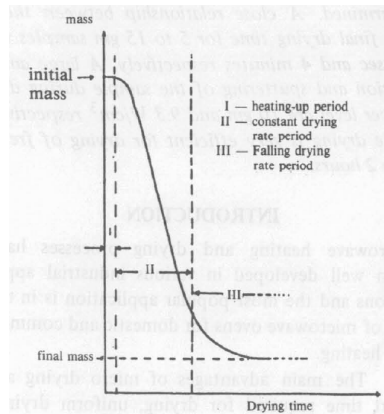


Figura 4.3: Gráfica de caracterización del secado del agua, tomada de [6]

El proceso físico que gobierna la remoción de la mezcla del líquido se encuentra dividido en dos pasos: periodo de calentamiento inicial y proceso de deshidratación. En el periodo del proceso de calentamiento, la temperatura del material alcanza la temperatura de ebullición del agua y en el proceso de deshidratado, la rata de evaporación del agua está dada en dos periodos: periodo de secado constante y periodo de caída de secado. Durante el periodo de secado constante, el contenido de mezcla es muy alto y la evaporación empieza a ocurrir desde la superficie a una rata constante [6]. Luego empieza el periodo de caída de secado. Ver Figura 4.3

## 4.2. Sopladores de Aire

### 4.2.1. Definición

Los sopladores de aire son maquinas conformadas por un motor acoplado a un impeler. El motor eléctrico convierte la energía eléctrica en energía rotacional la cual es aprovechada por el impeler para producir un flujo de aire constante. Para cada aplicación específica existe un diferente diseño de soplador, esto depende de los requerimientos y parámetros necesarios por el sistema o proceso al cual se incorpora.

### 4.2.2. Tipos de sopladores de aire

Los sopladores de aire están específicamente diseñados para producir flujos de aire a una presión específica, cada aplicación determina el tipo de soplador a utilizar. Su configuración varia dependiendo del impeler y diseño de la carcasa [5]:

- Alto flujo de aire a baja presión (Ventiladores de flujo axial) [5].
- Equilibrio entre flujo de aire y presión (ventiladores de flujo radial o sopladores centrífugos) [5].
- Bajo flujo de aire a alta presión (Turbinas regeneradoras) [5].

### 4.2.3. Ventiladores de flujo axial

Esto tipo de soplador consiste en un impeler de aspas direccionadas con cierto ángulo acoplado a un eje impulsado por un motor, la rotación produce un flujo de aire, su eficiencia es baja debido a varias razones: el paso geométrico a lo largo del aspa no es constante; a mayor cantidad de aspas mayor el flujo de aire a costas de la eficiencia; la sección transversal de las aspas no son



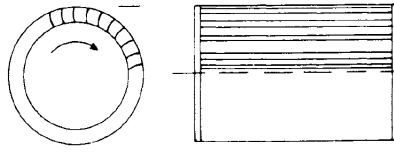


Figura 4.4: Impeler de alabes curvos hacia adelante, tomada de [5]

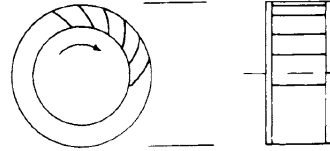


Figura 4.5: Impeler de alabes curvos hacia atrás, tomada de [5]

aerodinámicas, fabricadas de lamina de acero curvadas a una forma aerodinámica aproximada. Son usados para mover grandes cantidades de flujo a bajas presiones, estos tipos de ventiladores se pueden encontrar en sistemas de refrigeración como en los motores de combustión interna y compresores [5].

#### 4.2.4. Ventiladores de flujo radial

Los sopladores tienen características parecidas a los compresores centrífugos, el aire pasa través de un ángulo recto y se expulsa radialmente desde la carcasa. Esto produce una buena generación de presión, el flujo volumétrico depende del diseño del impeler y se utilizan tres configuraciones diferentes: Impeler de alabes curvos hacia adelante, Impeler de alabes curvos hacia atrás e Impeler de alabes radiales rectos [5].

**Impeler de alabes curvos hacia adelante:** El impeler de alabes curvos hacia adelante puede generar cerca de cinco veces más presión que los ventiladores de flujo axial y un alto flujo volumétrico. Son adecuados para la manipulación de altos flujos de aire y donde se requieren presiones más altas de las que podría ser suministrada por un ventilador de flujo axial, sin embargo para la misma capacidad se necesitaría un diámetro mayor del impeler y son más costosos [5].

La eficiencia es baja y las revoluciones tienen que ser limitadas para mantener el un nivel de ruido tolerable por lo que se reduce su capacidad de uso. Son usados con ductos con descargas cortas debido a que la alta velocidad de descarga no debe ser convertida en presión [5]. (Ver Figura 4.4)

**Impeler de alabes curvos hacia atrás:** El impeler de alabes curvos hacia atrás es aplicado para grandes flujos volumétricos, capaz de generar un flujo mayor a bajas velocidades con respecto al impeler de alabes curvos hacia adelante, en consecuencia genera menor nivel de ruido debido la suavidad en el flujo y menos turbulencias. (Ver Figura 4.5). Las características de este, dependen de la forma de los alabes; unos alabes aerodinámicos generan un flujo menos turbulento pero el costo de su manufactura es mucho mayor [5].

**Impeler de alabes radiales rectos:** El impeler de alabes radiales rectos generan altas presiones con flujos volumétricos bajos. Poseen una baja eficiencia pero una construcción sencilla y abierta

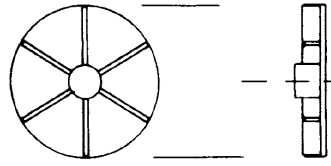


Figura 4.6: Impeler de alabes radiales rectos, tomada de [5]

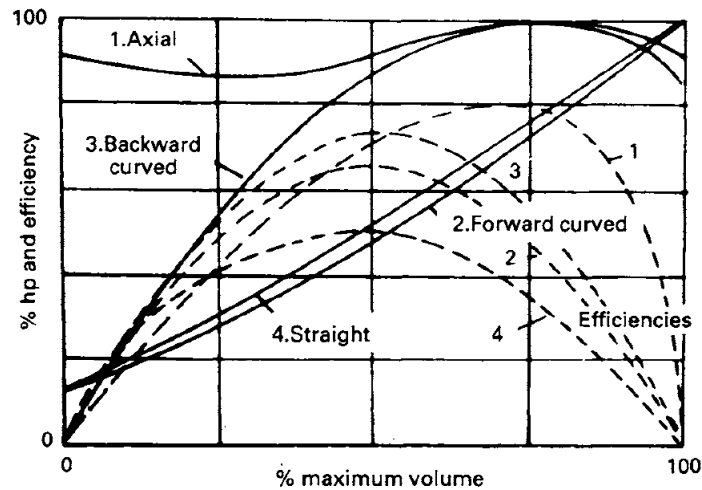


Figura 4.7: Curvas de potencia y eficiencia, tomada de [5]

lo hace ideal para trabajos en donde se encuentran el aire contenga altas impurezas que puedan degradar rápidamente los impeler [5].(Ver Figura 4.6)

Las Características típicas de rendimiento de los ventiladores de flujo axial y las tres formas básicas de sopladores centrífugos se dan en las Figuras 4.7 y 4.8

#### 4.2.5. Turbinas regeneradoras

Un tipo de soplador que sea capaz de generar una presión de 0.5 bar [5] en una sola etapa es la turbina regeneradora. Están diseñadas para que cuando el impeler rote, la acción centrífuga mueva el aire desde el origen del alabe hasta la punta de este a través de la carcasa anular. Esta acción genera un alto diferencial de presión.

El diámetro del orificio de la descarga es menor que el de aspiración, proporcionando un ajuste entre los alabes del impeler y el aire de descarga. La ventaja del principio regenerativo es que las presiones generadas son iguales a los obtenidos por los sopladores de desplazamiento de múltiples etapas o positivo [5]. (Ver Figura 4.9)

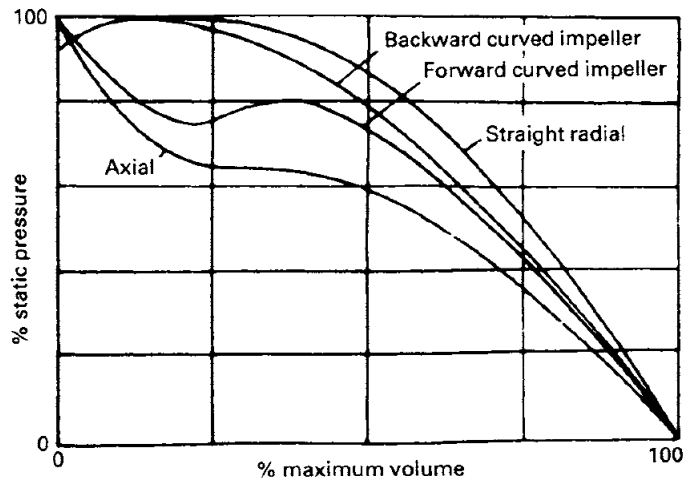


Figura 4.8: Curvas de presión estática, tomada de [5]

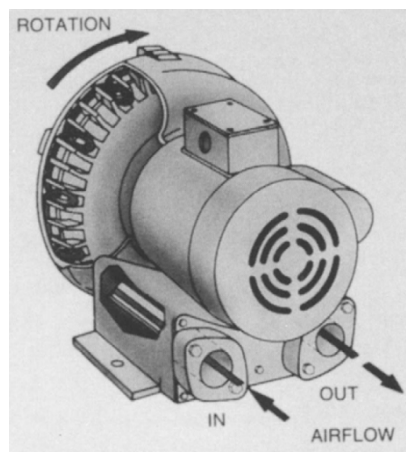


Figura 4.9: Figura de una turbina regeneradora típica, tomada de [5]

## 5. DISEÑO DEL HORNO DESHIDRATADOR

El diseño y construcción de un horno deshidratador surge como una idea para hacer una notable disminución de energía y tiempo empleado en el proceso de transformación del látex de caucho natural a caucho natural.

Lograr estas disminuciones va directamente relacionado tanto en el diseño del sistema del secado como en la calidad de los materiales debido a su variación en la conductividad térmica.

El diseño del sistema de secado es basado en un intercambiador de calor tipo Aire-Aire que aprovechara la energía térmica suministrada por la combustión del carbón mineral. El Prototipo consta de dos elementos: La cabina de secado y el quemador de carbón.

### 5.1. Parámetros de Diseño

#### 5.1.1. Calidad

Durante el proceso de transformación de látex a caucho seco es indispensable conseguir los más bajos niveles de impurezas para mantener las especificaciones establecidas, la cual aumenta sustancialmente en el momento del secado. Los hornos utilizados en la región trabajan con combustibles como el gas natural y electricidad. Aunque se logra secar el caucho, su calidad no es óptima debido a que estos hornos deshidratan a base de la combustión del gas natural aumentando las posibilidades de contaminación. Para contrarrestar esta problemática, se planea secar el polímero a base de aire caliente por medio de un intercambiador de calor aire-aire.

#### 5.1.2. Combustible

Debido a los altos costos de los combustibles que afectan de forma directa la industrialización del caucho natural, se ha seleccionado el carbón mineral (lignito), otra razón por la cual se escogió fue por la facilidad de obtenerlo debido a que la mina de carbón Centromin se encuentra situada en la zona cerca al punto de procesamiento del polímero. El carbón mineral posee el suficiente poder Calorífico para calentar aire y este por convección secar el caucho de forma más limpia.

#### 5.1.3. Cantidad de Caucho a secar

Las dimensiones del horno han sido establecidas de acuerdo con la capacidad de producción de látex en los arboles. Se planea extraer látex de 5 hectáreas diarias lo cual equivale a un promedio de 450 arboles por hectárea y cada uno de ellos produce 250 ml de látex líquido. Como en el proceso de coagulación del látex se añade agua a razón de 1.5:1 (1.5 litros de agua x 1 litro de látex líquido) y 1 ml de ácido fórmico. Al coagular el látex, entre un 35 % a 42 % se convierte en caucho seco, el cual es el producto final para deshidratar. Teniendo estos datos obtenemos que:

Árboles por hectárea: 450 promedio Número de hectáreas: 5 Litros totales:  $0.25 \times 450 \times 5 = 562.5$  litros de látex

Cantidad de mezcla agua-latex  $562.5 + 843.75(1.5 \text{ veces de agua con respecto al látex}) = 1406.25$  litros de mezcla

Cantidad total de caucho seco  $= 1406.25 \times 0.35 = 492.18$  litros de caucho coagulado

Total de caucho seco = 492.18 litros de caucho coagulado x Densidad del caucho natural [6] (0.94) = 462.65 kg de caucho seco.

Se pretende secar en dos tandas por lo tanto la capacidad del horno tiene que ser suficiente para que pueda secar 230 Kilogramos aproximadamente.

#### **5.1.4. Temperatura de Trabajo**

la temperatura de trabajo ideal para el deshidratado del caucho natural es muy variable. Los productores locales y nacionales manejan temperaturas que oscilan entre 85 y 100 grados centigrados, en cambio un Artículo tailandes recomienda secar el caucho entre 115 y 135 grados centigrados por 3 a 5 horas [3].

#### **5.1.5. Norma para el diseño del horno <sup>1</sup>**

El horno deshidratador esta enfocado en cumplir con los estándares internacionales establecidos por la ASTM. La Norma E145 – 94 “Standard Specification for Gravity-Convection and Forced-Ventilation Ovens”.

Esta especificación cubre los requerimientos de desempeño de los hornos de aire de propósito general los cuales superan los 0.6 m<sup>3</sup> de cámara de secado. Para hornos de convección forzada como en este caso, que estén en el rango de 20°C hasta 500°C a partir de la temperatura ambiente.

La norma clasifica los hornos de convección forzada en 4 grupos según el método de operación.

Tipo IA y Tipo IB para este caso no aplica porque estos tipos son por convección de gravedad o convección natural [4].

Tipo II A: horno que tiene convección forzada y una uniformidad de temperatura entre 1 % de diferencia entre el horno y las temperaturas de ambiente [4].

Tipo IIB: horno que tiene convección forzada y una uniformidad de temperatura entre 2.5 % de diferencia entre el horno y las temperaturas de ambiente [4].

#### **Requerimiento de rendimientos**

1. La temperatura dentro de la cámara será controlada por un dispositivo automático y será uniforme dentro de las tolerancias dadas en la tabla 5.1.
2. El "tiempo constante" es una medida arbitraria de la tasa o rata a la cual una muestra estándar es calentado con un procedimiento establecido la cual se explicara más adelante, el valor que de esta prueba no deberá exceder el valor de la tabla 5.1.
3. La rata de ventilación del horno, esta establecida para hornos eléctricos por esa razón el parámetro que indica la tabla no aplica para nosotros.

---

<sup>1</sup>La norma está traducida del inglés

**TABLE 1 Performance Requirements for Ovens**

Characteristic	Type IA	Type IB	Type IIA	Type IIB
Deviation from specified temperature of test throughout testing chamber during 24-h period for the following differentials between ambient and test temperatures:				
50°C or less, max, °C	1	2.5	0.5	1.25
More than 50°C, max, percent of differential	2	5	1	2.5
Time constant, max, s	600	720	480	660
Rate of ventilation of testing chamber, air changes per hour:				
min	10	10	50	50
max	...	...	200	200

Figura 5.1: Imagen de la Tabla publicada en la norma, tomada de [4]

## Métodos de Ensayo

### 1 Temperatura Uniforme

Ubicar nueve termocuplas, las termocuplas deben ser de Acero, con aproximadamente 0.5 mm diámetro y teniendo un tamaño de unión no más grande de 2mm, en la prueba vacío con la estantería en su lugar y las rejillas de ventilación abiertas. Localizar cada termocupla en las 8 esquinas de la cámara, a 5 cm de cada pared, localizar la novena alrededor de 2.5 cm del centro geométrico de la cámara. Una mínima longitud de 30 cm de cada cable conductor que será instalado adentro del horno para minimizar la conducción de la termocupla [4].

Lleve al horno a la temperatura especificada y dejarlo que alcance el estado estable, registrar las temperaturas de las nueve termocuplas por un periodo de 24 horas, determinar la máxima desviación de cada punto respecto a la temperatura deseada. La temperatura ambiente del cuarto no puede variar por más de 10°C [4].

### 2 Tiempo Constante

Calentar el horno a menos de 10°C de su temperatura máxima a la cual fue diseñado y permitirle que se estabilice por al menos 1h. Preparar una muestra estándar que consiste en: un Cilindro de cobre suave, un diámetro de 9.5 +/-0.1 mm (0.375 +/- 0.005 in.) en longitud 57 +/- 1 mm (2.25 +/- 0.05 in.) y soldar una junta a este [4].

Abrir la puerta del horno por 1min mientras la muestra estándar y la termocupla diferencial están siendo suspendidas en la cámara de prueba. Suspende la muestra verticalmente entre 25mm (1in) del centro geométrico de la cámara por medio de un cordón de asbesto de alambre fino (0.3 mm de diámetro máximo, calibre 30) Ubicar la Junta Libre de la termocupla diferencial en el espacio aéreo de la cámara al menos 75mm (3in) eliminado de la muestra. Entonces cierre la puerta y también registré o mida el diferencial de temperatura cada 10s. Determine el tiempo en segundos requeridos para que la diferencia de temperatura decrezca una décima parte del valor original máximo (por ejemplo de 120 a 12°C) [4].

## 5.2. Diseño de la cabina de secado

### 5.2.1. Estructura Externa

El horno deshidratador cuenta con un armazón de acero inoxidable, esta estructura esta diseñada a partir de las condiciones de trabajo, estándares internacionales de calidad del caucho natural y proyectado a ser un horno modular para futuras ampliaciones y aumento de producción.

La estructura externa esta compuesta por dos elementos principales: un armazón que esta conformado por ángulos de acero inoxidable de 2" x 3/16" y las paredes de el horno tipo panel, para ser ensambladas individualmente en los compartimientos, están fabricados de acero inoxidable 304 calibre 16. Este acero es utilizado en la mayoría de las industrias de los alimentos debido a su excelente resistencia a la corrosión y teniendo en cuenta que en el procesamiento del caucho natural se maneja grandes cantidades de agua, la cual aumenta las posibilidades de esta problemática. Otra de las muchas ventajas que posee este acero inoxidable son sus acabados limpios y sin necesidad de aplicación de capas exteriores de protección contra la oxidación la cual genera gran impacto visual y produce un aceleramiento en la degradación de la maquina.

La condición más crítica de trabajo a la cual va a estar sometido en horno es a la alta humedad presente en el lugar debido a que en el proceso de coagulación del caucho natural se necesita la utilización de grandes cantidades de agua, convirtiendo los espacios en focos de oxidación y deterioro. Además de la humedad presente en el lugar de trabajo, la estructura deberá soportar cerca de 250 kilos de coagulo de caucho para ser deshidratado, adicionalmente las tuberías, soplador y accesorios adicionales son cargas extras a tener en cuenta.

La estructura además de asegurar una excelente rigidez, también esta pensado a futuro, ya que su armazón modular permite futuras ampliaciones dependiendo de la capacidad de producción presente disponible.

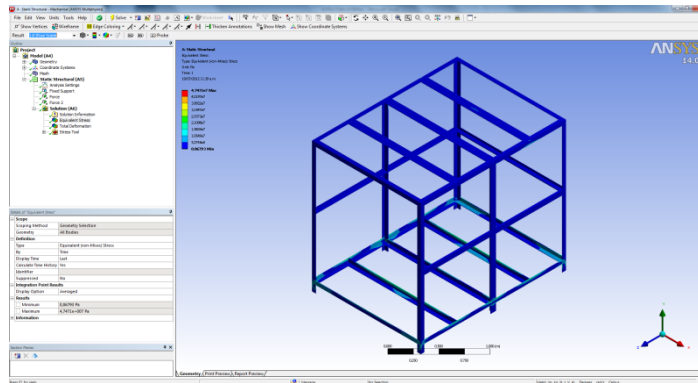


Figura 5.2: Análisis de esfuerzos generados por carga

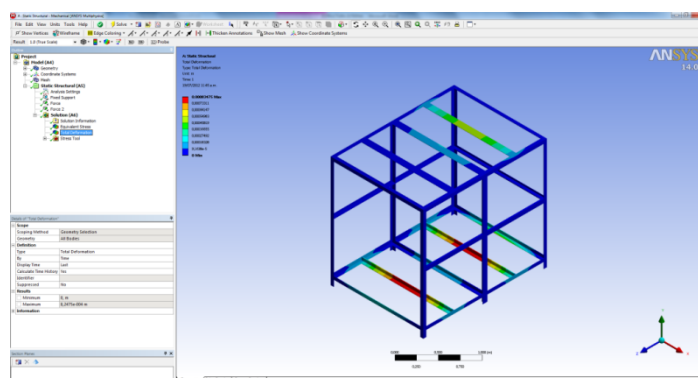


Figura 5.3: Análisis de deformación total

## Análisis estructural

El análisis fue realizado por medio del software CAE (Ansys). Correspondiente a un análisis estático estructural que será aplicado al marco que soportará la cabina de secado, para este se tomó en cuenta la acumulación de pesos causada por: paneles, tubería y carga máxima de caucho; para determinar los puntos mas críticos de la estructura, permitiendo modificar el diseño en caso de presentarse altas concentraciones de esfuerzos, deformaciones o un factor de seguridad bajo.

Los resultados mostraron un buen desempeño del marco, el cual da un indicador de que no se van a presentar fallas por diseño, los valores arrojados por el análisis fueron: Esfuerzo máximo 47MPa (Ver Figura5.2), deformación máxima 0.8mm (Ver Figura 5.3), factor de seguridad mínimo permisible fue de 5.3 (Ver figura 5.4)

### 5.2.2. Aislamiento

Una de las claves de la eficiencia del horno deshidratador es la capacidad de aislamiento aplicado en las paredes de este. Esta capacidad esta directamente relacionada con el tipo de aislante y la conductividad térmica ofrecida por el material. Este elemento es indispensable para ayudar a mantener el calor en la cámara de secado evitando perdidas de calor hacia el medio ambiente, brindando una aceleración en el tiempo de deshidratación y ayudando con la disminución de consumo de energía.



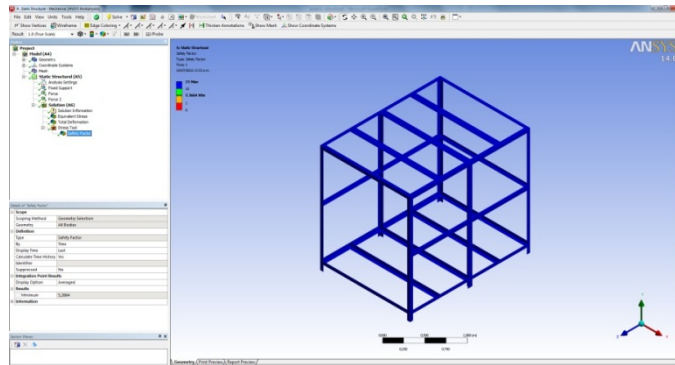


Figura 5.4: Análisis de factor de seguridad

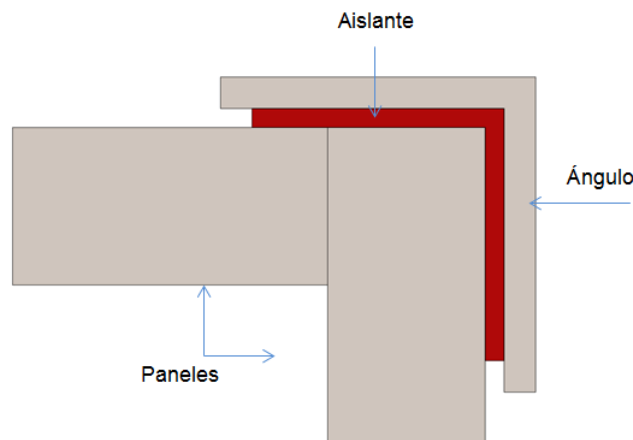


Figura 5.5: Gráfico del aislante aplicado entre la estructura externa y los paneles

Debido al diseño compuesto por un armazón como estructura principal y los paneles que conforman las paredes del horno, se ha requerido la utilización de dos tipos de aislantes: manta de fibras cerámicas y tela de fibra de vidrio siliconada.

Los paneles, son los elementos que conforman las paredes del horno, poseen un diseño tipo bandeja el cual permite acomodar perfectamente el aislante térmico. La manta cerámica, la utilizada en esta ocasión, además de poseer un excelente desempeño como aislamiento, es insensible al choque térmico, baja acumulación térmica y buen aislamiento acústico, disminuyendo los niveles de ruido que puedan ser ocasionados por el funcionamiento del horno. Su temperatura máxima de trabajo ronda los 1260°C muy por encima de la temperatura de trabajo del horno garantizando un perfecto aislamiento<sup>2</sup>.

Para aumentar la eficiencia y evitar contacto metal-metal entre el ángulo de la estructura y los paneles del horno ya que esto aumenta la transferencia de calor por conducción que hay entre ellos se hizo necesario la utilización de un segundo aislante (ver Figura 5.5). Este elemento compuesto por una tela de fibra de vidrio forrada por silicona brindando una temperatura de trabajo de alrededor de los 310°C y tiene finalidad de cumplir dos funciones: aislar térmicamente y brindar impermeabilidad.

<sup>2</sup> Este aislante lo provee Sealco empresa ubicada en Medellín, para ver especificaciones ver el anexo.A

### 5.2.3. Diseño de Tubería

La tubería fue diseñada<sup>3</sup> con el objetivo de que se aproveche el calor de la mejor forma y que haya una distribución de calor dentro de la cabina de secado lo más uniforme posible, para secar de igual forma en toda la dimensión del horno. Para aprovechar el calor se dispuso de un serpentín en el quemador para que el aire circule por allí y reciba calor a lo largo de este, lo otro que se realizó fue disponer de tubería de recirculación que conecte con la entrada de la turbina y por último aislar la tubería externa; para la distribución de calor se dispuso de flautas (tubos perforados) ubicadas en las paredes laterales de la cabina de secado en forma horizontal (Ver Figura 5.6).

El material de la tubería es acero inoxidable 304 y se han usado 3 diferentes tipos de tubería que han sido seleccionadas de acuerdo a la aplicación, estas tuberías son:

Calibre	Diámetro(pulg)	
	2	1 1/4
10	N/A	Quemador
18	Tubería 2	Tubería 1

Tabla 5.1: Tabla de tubería utilizada

**Tubería del quemador:** Esta tubería fue seleccionada con el fin de que tenga una alta durabilidad debido a las altas temperaturas a la se somete, sus dimensiones se muestran en la Tabla 5.1.

**Tubería 1:** Esta tubería fue seleccionada por recomendación del proveedor de la turbina, con el fin de obtener un buen rendimiento. Comprende el tramo de salida del quemador, junto con las flautas que dan salida al aire caliente, sus dimensiones se muestran en la tabla 5.1.

**Tubería 2:** Esta tubería fue seleccionada ya que tiene que acoplarse a la entrada y a la salida de la turbina por tanto su dimensión tiene que coincidir. Comprende dos tramos uno que recircula el aire del horno y va acoplado a la entrada de la turbina; el otro tramo comprende la salida de la turbina hasta la entrada del quemador, sus dimensiones se encuentran en la tabla 5.1.

### 5.2.4. Selección de la Turbina Regeneradora

Debido a las largas extensiones de tubería y grandes cantidades de accesorios que generan pérdidas de energía por fricción y turbulencias en el flujo de aire caliente fue necesaria la implementación de una turbina regeneradora.

La selección de la turbina regeneradora y la potencia necesaria para esta se determinaron por medio de simulaciones y aproximaciones al modelo real, estas pruebas fueron determinantes ya que la realización de cálculos matemáticos aumentan la incertidumbre y conllevan a grandes desfases en exactitudes por tratarse de un fluido compresible y por la cantidad de accesorios que producen turbulencias complicando aún mucho más el cálculo y aumentando el margen de error con la realidad.

### 5.2.5. Simulación Real de la Tubería y la Turbina

Se procedió a realizar un montaje lo mas aproximado posible, manteniendo dimensiones reales de los ductos hechos con tubería de PVC (polivinil-cloruro) ver Figura 5.7. La simulación se

<sup>3</sup>Para ver los planos de la tubería ir al Anexo B

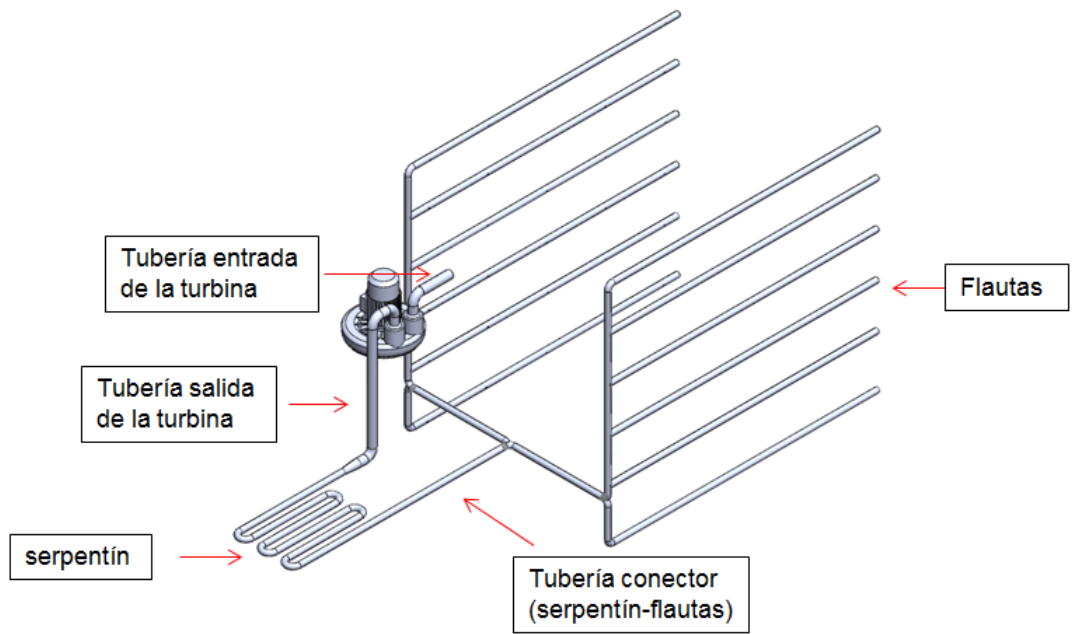


Figura 5.6: Esquema del diseño de la tubería.



Figura 5.7: Fotografía del montaje realizado para simular la tubería y la turbina.



Figura 5.8: Fotografías de visualización de flujo a través de humo marcador

hace con el fin de poder determinar la cantidad de agujeros y el diámetro de ellos en las flautas de salida del aire, posterior a esto observar la distribución del flujo a la salida de las flautas.

Para encontrar el equilibrio entre número de agujeros-diámetro vs presión-flujo de aire caliente de salida, se procedió con la perforación de 5 orificios por cada flauta con un diámetro de 2mm, se encendió la turbina y se inspeccionó el flujo de aire, viendo que la turbina brindaba la posibilidad de aumentar el diámetro de las salidas, se procedió a repasar los agujeros con una broca de mayor diámetro, así sucesivamente hasta mirar que la presión y flujo del aire fuese uniforme llegando a un diámetro de 4.5mm.

Una vez encontrado el equilibrio del fluido y la distribución apropiada de los agujeros, se procedió con la visualización del flujo. Esta se consiguió por medio de la utilización de un humo marcador (hielo seco con agua) el cual nos ayudó a visualizar el comportamiento del aire (Ver Figura 5.8). Aunque se alcanzó a notar la coloración del flujo, el resultado no fue el esperado debido a que la turbina proporciona altas presiones y logra calentar el fluido, generando como resultado pérdidas de color en el aire.

### 5.3. Diseño del quemador de Carbón

El quemador de carbón mineral brindará al horno deshidratador el calor suficiente para realizar el secado del caucho natural, por este motivo se tuvo que pensar en la obtención de la mayor eficiencia posible y evitar grandes pérdidas de calor.

La forma más eficiente de realizar la combustión con el carbón mineral es llevándolo a un estado de pulverización previo para luego ser incinerado y obtener la llama que brinda el calor dependiendo del tipo de carbón utilizado. Este proceso de pulverización es un método muy complejo y requiere mucho trabajo para la transformación del combustible, adicionalmente la infraestructura para manipularlo correctamente es muy compleja y robusta, convirtiendo esta alternativa en poco práctica para aplicarla al horno deshidratador. Para contrarrestar esta problemática se dedicaron muchas horas de ensayos para encontrar el método ideal para realizar el quemado de carbón lo más eficientemente posible y que fuera factible para su utilización. Debido a que el carbón mineral es suministrado directamente de la mina de explotación, su volumen es demasiado grande para su manipulación, por esta razón se debe disminuir su tamaño en trozos que fueron establecidos por las pruebas realizadas.

El Tipo de carbón que se va a utilizar es lignito, que proviene de la mina centromin cerca del lugar donde se va a instalar el horno. En la actualidad es utilizado en centrales eléctricas gracias

a su excelente poder calorífico el cual se encuentra alrededor de los 14,200 BTU [2].

Cuando ocurre la combustión del carbón mineral se alcanzan temperaturas extremadamente altas que pueden causar el debilitamiento de los materiales que componen el quemador, habrían dos opciones en las cuales se puede mitigar esta posibilidad de ocurrencia y son: Utilizar altos espesores en los materiales o utilizar materiales con el punto de fusión muy por encima de la temperatura de combustión del carbón mineral. La primera alternativa significaría una maquina muy robusta y pesada para su manejo en posteriores labores de mantenimiento por lo cual se selecciono la alternativa de utilizar materiales con alto punto de fusión como lo tiene el acero inoxidable.

El acero inoxidable tiene la gran ventaja de poseer el punto de fusión más alto que el acero al carbono que podría debilitarse con las temperaturas de trabajo. Además de eso su peso es muy similar pero se obtiene la gran ventaja de trabajar espesores bajos, consiguiendo que el quemador de carbón logre un peso adecuado y pueda ser manipulado de forma más sencilla y sin menos esfuerzo a la hora de realizar un mantenimiento preventivo y limpieza de sus componentes.

### **5.3.1. Modo de ignición del carbón mineral**

Para realizar la combustión del carbón mineral es necesario una fuente de energía externa para realizar su ignición, una vez encendido el mineral solamente es necesaria la aplicación de un flujo de aire constante para mantener alimentada la combustión.

Se estableció como la opción mas acertada para la ignición de carbón mineral la utilización del gas natural. El gas natural es un excelente combustible para inducir el encendido del carbón mineral debido a que brinda el poder calorífico necesario para esta función. Las pruebas realizadas implicaron la utilización del gas natural para su ignición, logrando tabular los tiempos de encendido del carbón y poder establecer un tiempo determinado.

### **5.3.2. Pruebas realizadas al carbón**

Las pruebas realizadas al carbón mineral (lignito), fueron desarrolladas para determinar y establecer parámetros de operación debido a que el poder calorífico del carbón mineral no es uniforme en todo el combustible y es muy impredecible a la hora de su combustión. Con estas pruebas realizadas se determinaron los siguientes parámetros: Tamaño y masa ideal de carbón, tiempos de quemado del carbón, temperaturas alcanzadas, tiempo de encendido del carbón y la relación aire-combustible.

**Selección del tamaño y masa ideal:** Debido a que el carbón mineral (lignito) es proporcionado de forma directa de la mina, los fragmentos de este mineral son demasiado grandes, por lo que es necesario realizar una reducción de tamaño para que sea posible su manejo. Los fragmentos de aproximadamente 20 kilogramos fueron reducidos de tamaño por medio de un maso de hierro, obteniendo trozos mucho mas pequeños los cuales sus pesos fueron tabulados para realizar la siguiente estadística (ver tabla 5.2).

Se calcula el rango de esta forma:  $R = \text{Dato mayor} - \text{dato menor}$ ; y obtenemos:  $R = 420 - 20.9 = 399.1$

Pesos obtenidos (Gramos)												
125.7	268.8	256.9	263.5	63.4	162	360.3	45.5	41.6	37.4	40.2	20.9	39.4
78	300.6	58.7	104.1	29.2	108.6	218.5	150	44.3	29.4	48.4	29.3	23.6
37.3	251.3	174.7	106.8	70.5	106.9	82.8	122.7	345	25.5	144	157.7	107.6
23.8	162.4	212.9	55.9	64.8	211.9	153.3	53.6	56.4	189.7	350	274	144.5
256.8	311.4	95	318.3	124.1	57	142	40.9	367	84.5	40.5	40.8	292.7
147.7	396	289.3	320	333.1	318.5	333	240	52	171.2	193	244.9	99.1
67.5	59.3	140.1	85.5	87.7	60.3	49.8	62.5	67.7	43.9	66	80	417.9
168.5	328	326.7	289	357.9	77.5	199.6	286.8	401.7	312.2	199.7	93.2	123.3
402.3	224.5	122.1	105.1	118.7	246.4	72.3	292.8	190.9	69.1	103.9	56.3	137.8
47.3	59.8	49.9	44.4	420	369.1	66	26.2	169.6	101.2	401.6	70.6	132.7
357	285.5	86.5										

Tabla 5.2: Tabla con los pesos de los fragmentos del carbón

Ahora calculamos al cantidad de intervalos de acuerdo a la cantidad de datos obtenidos, como son mayor a 30 en estadística generalmente se considera un conjunto población; usamos la fórmula de Sturges:

$N = 1 + 3.3\text{Log}(R)$ ; reemplazamos y tenemos:  $N = 1 + 3.3 \text{Log} (399.1) = 9.583569$ ; por tanto si redondeamos tendríamos 10 intervalos.

Ahora determinamos el tamaño del intervalo:  $A = R / N$ ; Reemplazamos y obtenemos:  $A = 399.1 / 10 = 39.91$ .

Los intervalos serian así: [20.9 - 60.81]; [60.81 - 100.72]; [100.72 - 140.63]; [140.63 - 180.54]; [180.54 - 220.45]; [220.45 - 260.36]; [260.36 - 300.27]; [300.27 - 340.18]; [340.18 - 380.09]; [380.09 - 420].

En el caso nuestro se agruparon los pesos, para realizar las pruebas de la siguiente forma: [20 - 120]; [120 - 220]; [220 - 320]; [320 - 420]. Estos intervalos se tomaron basados en el cálculo de Intervalos de la fórmula de Sturges, pero decidimos conformarlos en grupos 2.5 veces más grande, para que permita la facilidad de clasificar la muestras.

#### ■ Tiempos de encendido del carbón mineral

Después de haber realizado las pruebas para determinar la máxima temperatura alcanzada respecto a la masa y agrupado los fragmentos en grupos según su peso, se procedió realizar las pruebas para determinar el tiempo de encendido del carbón mineral y la temperatura máxima alcanzada respecto al intervalo de peso, con una masa constante de 1.5Kg.

En el Intervalo de [20g-120g] el tiempo de encendido fue de 2min, y la temperatura máxima fue alcanzada a los 18min con un valor de 122.8°C (Ver tabla 5.3). Por otro lado en el intervalo [120g-220g] el tiempo de encendido fue de 2min, y la temperatura máxima fue alcanzada a los 12min con un valor de 127.8°C (Ver tabla 5.4).

Tiempo (min)	Temperatura (°C)
0	26.4
3	41.4
6	66.8
9	82
12	95.4
15	118.6
18	122.8
21	122.6

Tabla 5.3: Tabla de temperaturas alcanzadas con la muestra de [20g-120g]

Tiempo (min)	Temperatura (°C)
0	27.3
3	54.8
6	103.5
9	112.4
12	127.8
15	124.8
18	100

Tabla 5.4: Tabla de temperaturas alcanzadas con la muestra [120g-220g]

Tiempo (min)	Temperatura (°C)
0	26
3	75.2
6	112.4
9	129.6
12	132.8
15	121.4
18	94.4

Tabla 5.5: Tabla de temperaturas alcanzadas con la muestra [220g-320g]

Tiempo (min)	Temperatura (°C)
0	29
3	45.8

Tabla 5.6: Tabla de temperaturas alcanzadas con la muestra [320g-420g]

En el intervalo de [220g-320g] el tiempo fue de 3min, y la temperatura máxima fue alcanzada a los 12min con un valor de 132.8°C (Ver tabla 5.5). Por otro lado en el intervalo [320g-420g] el tiempo de encendido del carbón es de 6min, el carbón se apagó después de 4min (Ver tabla 5.6).

**Observaciones:** Si el tamaño del carbón es más grande, la temperatura máxima se logra en menos tiempo, pero la temperatura máxima alcanzada se mantiene por menos tiempo.

#### ▪ Relación Aire-Combustible

Encontrar la relación correcta de aire-combustible es vital para el buen funcionamiento del horno secador ya que se trabaja con la mayor eficiencia posible.

Como el carbón mineral es un combustible muy impredecible debido a que su poder calorífico varía de acuerdo a muchas variables como: humedad, porcentaje de carbón, porcentaje de ceniza entre otras. No existen tablas con las cuales se establezcan parámetros de relación de aire-carbón mineral (lignito), por lo cual se desarrollaron las pruebas para determinar la relación necesaria que relacionara la mayor eficiencia posible con los parámetros necesarios para secar el coagulo de caucho natural.

Para determinar el flujo de aire correcto sobre la combustión del carbón mineral, se tuvo en cuenta una masa inicial de 1.5 kg de carbón (con la masa de 1.5 kg se alcanzan las temperaturas deseadas) alimentada por sopladores de aire convencionales, una vez puesto en marcha se pretende observar la calidad de la llama y los gases de combustión.

Los flujos volumétricos máximos de los sopladores fueron determinados de la siguiente manera: Primero tomamos la velocidad del flujo a través de un anemómetro, luego con un flexómetro determinamos el diámetro o longitud de la salida del soplador; el cálculo se determinó de por medio de la ecuación: Flujo volumétrico = Área sección transversal x velocidad del flujo

Flujo volumétrico soplador manual=  $(0.0125) \text{ m}^2 \times \pi \times 38\text{m}/\text{seg} = 0.01865\text{m}^3/\text{seg} = 1.11\text{m}^3/\text{min}$

Flujo volumétrico soplador industrial=  $7.8\text{m}/\text{seg} \times (0.00856) \text{ m}^2 = 0.06674\text{m}^3/\text{seg} = 4\text{m}^3/\text{min}$ .

El primer arreglo consistió en alimentar el carbón con un soplador manual (Ver figura 5.9) por lo tanto tenemos un flujo volumétrico de aire de:  $1.11\text{m}^3/\text{min}$ . Se Observó que se logró generar una combustión pobre, la relación del aire con respecto al mineral fue baja, produciendo exceso de humo.

El segundo arreglo consistió en alimentar el carbón con dos sopladores manuales (Ver figura 5.10) por lo tanto tenemos un flujo volumétrico de  $2.22\text{m}^3/\text{min}$ . Se Observó que se logró generar una combustión aceptable, la relación del aire con respecto al mineral fue un poco baja por lo que se observan pequeñas cantidades de humo en la combustión.





Figura 5.9: Fotografía del primer arreglo con un soplador manual



Figura 5.10: Fotografía del segundo arreglo con dos sopladores manuales



Figura 5.11: Fotografía del tercer arreglo con el soplador industrial

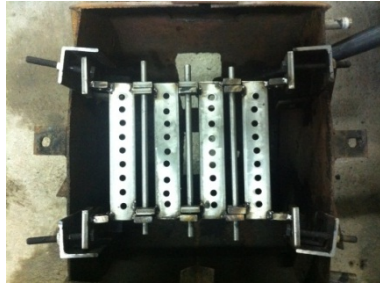


Figura 5.12: Fotografía de la banda con sus sensores



Figura 5.13: Fotografía de la banda puesta a prueba con calor

El tercer arreglo consistió en alimentar el carbón con un soplador industrial (Ver figura 5.11) por lo tanto tenemos un flujo volumétrico de  $4\text{m}^3/\text{min}$ . Se observó que se logró generar una combustión excelente, la relación del aire con respecto al mineral fue la adecuada generando un quemado uniforme y sin excesos de humo a la vista. A partir de este arreglo se nota que el soplador idóneo para alimentar el carbón es uno tipo industrial que provea el caudal necesario para tener una combustión aproximada a la estequiométrica.

### 5.3.3. Diseño de la banda transportadora

Una de las principales problemáticas de la utilización del carbón mineral no pulverizado es que al concluir el ciclo del quemado, las mismas cenizas pesadas quedan en la cámara provocando obstrucción y ocupando el volumen de esta, por lo cual se ha recurrido a una ingeniosa idea de renovación para asegurar el quemado total de la masa disponible y garantizar la continuidad de la combustión del carbón mineral. Esta forma de quemado del carbón mineral, utilizada en las altas industrias de fabricación de cartones de huevos, en donde es necesaria la utilización de calderas de vapor, con el cual se suministra la temperatura adecuada para el secado de las bandejas.

La idea sencilla pero muy efectiva consta de una banda transportadora que a su vez realiza el quemado del carbón, el movimiento lineal de la banda transportadora garantiza una combustión uniforme y constante del mineral haciendo muy eficiente esta alternativa. Las pruebas que se realizaron fueron útiles para determinar la velocidad de la banda transportadora debido a que se obtuvo el tiempo del quemado del carbón mineral.

Debido al alto costo de la fabricación de una banda transportadora, se optó por diseñarla de una forma práctica y simple<sup>4</sup> que permitiera el uso de materiales de fácil acceso pero teniendo presente su duración y versatilidad. El diseño consistió en unir unas platinas perforadas por medio de pines, donde en la parte inferior de cada una se le unió un eje cuadrado responsable de transmitir el movimiento rotativo del rodillo conductor.

Previo a la construcción de la banda transportadora, se realizó una simulación de funcionamiento de la banda transportadora. La prueba consto en armar un prototipo con el diseño de la banda y reproducir el ambiente de trabajo de esta, se ubicaron tornillos en los cuatro extremos para garantizar la tensión ocasionada por la rotación del moto reductor, el peso del carbón y el de la misma banda (Ver figura 5.12), además de la tensión, tiene que soportar el calor generado por la combustión del carbón mineral el cual genera debilitamiento en el material y al encontrarse en

<sup>4</sup>Para ver los planos de la banda transportadora ir al Anexo C

condiciones de enfriamiento y calentamiento se provocan esfuerzos térmicos que pueden causar fatiga con posterior fractura en alguno de los eslabones que componen la banda transportadora (Ver figura 5.13).

La banda transportadora fue elaborada en acero inoxidable 304, el cual tiene un punto de fusión de 1450°C aproximadamente y puede trabajar de forma constante alrededor de los 900°C. El acero deberá soportar altos esfuerzos térmicos, tensiones y vencer la fatiga térmica, esta fatiga será producida por los cambios constantes de temperatura originados a la rotación de la banda transportadora.

#### **5.3.4. Selección y ubicación del moto-reductor**

La ubicación del moto-reductor y el conducto de ventilación son un punto clave y determinante en la vida útil de la banda transportadora. Este debe ser ubicado de tal manera que la zona cargada con el carbón mineral (parte superior) no presente tensión causada por el arrastre ya que las altas temperaturas producidas por la combustión generan debilitamiento de las secciones incrementando las posibilidades de deformación y probable rotura, en cambio la tensión debe ser soportada por la parte inferior de la banda debido a que su temperatura es muy inferior y se minimizan las posibilidades de un desgaste acelerado.

La selección del moto-reductor se llevo a cabo gracias a la asesoría del proveedor, quien tuvo en cuenta el peso de la banda transportadora y el servicio que iba a cumplir.

#### **5.3.5. Selección del Soplador y diseño del ducto del soplador**

La selección del soplador fue determinada por la prueba de relación aire-combustible que se realizó en las pruebas del carbón.

El diseño del ducto de descarga fue diseñado en base a las especificaciones recomendadas que se mencionarán a continuación:

##### **En caso de descarga del aire:**

1. Si existe un aumento de área transversal, el Angulo de inclinación no debe ser mayor a 7°, además la sección transversal del conducto de entrada puede ser menor del 105 % del área de la salida del blower(Ver figura 5.14) [1].
2. Si existe una reducción de área transversal, el Angulo de inclinación no debe ser mayor a 15°, además la sección transversal del conducto de entrada puede ser menor del 95 % del área de entrada del blower (ver figura 5.14) [1].
3. La distancia mínima entre el blower y un codo que varié la dirección del flujo debe ser mínimo de 2.5 veces el diámetro de entrada del blower (se recomienda 3 diámetros) (Ver figura 5.14) [1].

Debido a la configuración del soplador seleccionado que estaba disponible en el mercado, no fue posible fabricar el ducto de acuerdo a las recomendaciones. Sin embargo las recomendaciones indican que esto se cumple para largos trayectos de conductos en los cuales es indispensable mantener un flujo laminar, para evitar pérdidas de energía; en este caso el recorrido del aire es corto y el flujo no se alcanza a desarrollar por estas razones la norma no se pudo aplicar en su totalidad.

## Typical Outlet Conditions

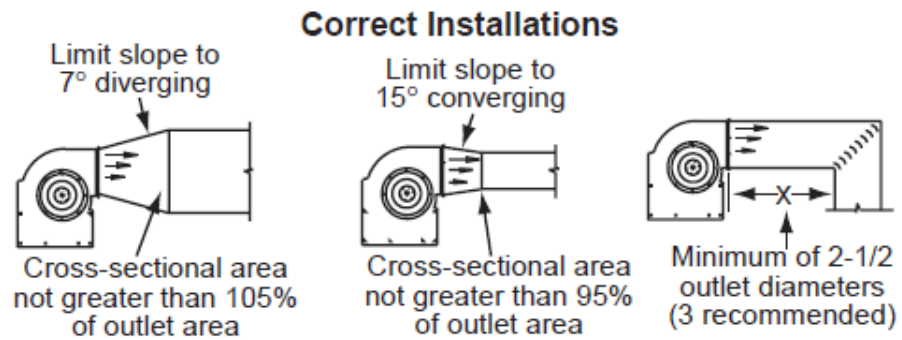


Figura 5.14: Gráfica de recomendaciones para ductos de descarga, tomada de [1]

La ubicación del conducto de ventilación también es de vital importancia, por que es el encargado de conducir el aire suministrado por el soplador. Este aire cumple dos funciones específicas: suministrar el flujo de aire ideal para alimentar la combustión del carbón y refrigerar la parte superior de la banda transportadora.



Figura 6.1: Fotografías del marco del horno hecho en FEMARCO Ltda.



Figura 6.2: Fotografía de construcción de los paneles del horno

## 6. CONSTRUCCIÓN DEL HORNO DESHIDRATADOR

El horno deshidratador consta de dos componentes principales: la cámara de secado y el quemador de carbón mineral. Al ser un conjunto de elementos dependientes, es vital un buen procedimiento de manufactura para así asegurar un funcionamiento exitoso, durabilidad en sus componentes y obtener una alta confiabilidad; a continuación se muestra el paso a paso de la construcción del horno.

La construcción del marco externo de la cabina de secado se realizó en una empresa especializada en fabricación y montaje de estructuras llamada FEMARCO Ltda. El proceso de armado se inició con la realización de las caras laterales culminando con la cara superior e inferior, en donde se aplicó en todas la uniones soldadura de electrodo de acero inoxidable (Ver fotografías en la figura 6.1).

Una vez terminado, se realizaron las medidas correspondientes para la elaboración de los paneles que conforman las paredes de la cabina, posteriormente se les aplico el aislante térmico y se sellaron a fundición con soldadura TIG (Ver figura 6.2).

Para el quemador de carbón mineral se realizó una construcción similar al del marco de la cabina de secado (Ver figura 6.3). Se armó un marco en ángulo de acero inoxidable con paredes de lámina del mismo material soldadas entre sí (Ver figura 6.4). La tubería del intercambiador de calor en forma de serpentín se atornillo a la estructura y en sus extremos se soldaron uniones tipo brida (Ver figura 6.5) para un fácil y eficiente acople al resto de la tubería del sistema.

La banda transportadora elaborada fue construida a partir de platina de acero inoxidable y perforada para permitir el paso del aire para la combustión del carbón mineral, para garantizar una



Figura 6.3: Fotografía del marco para el quemador

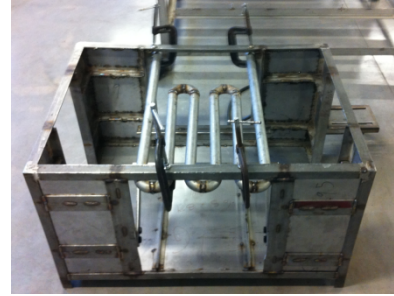


Figura 6.4: fotografía del conjunto del marco terminado junto con el serpentín.

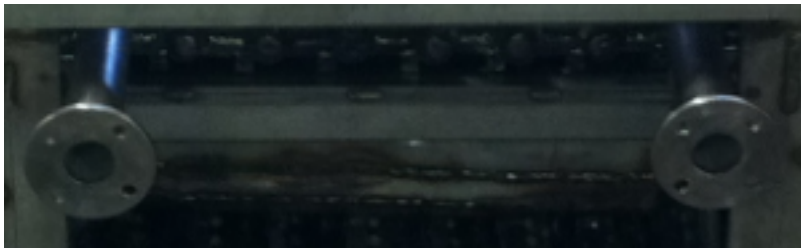


Figura 6.5: Fotografía de las bridas del intercambiador

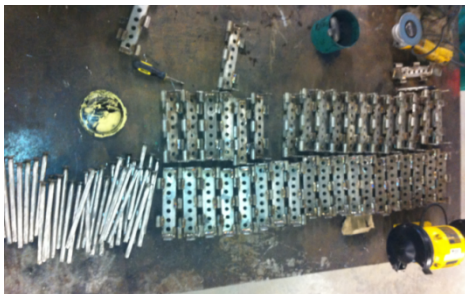


Figura 6.6: Fotografías de la banda transportadora.



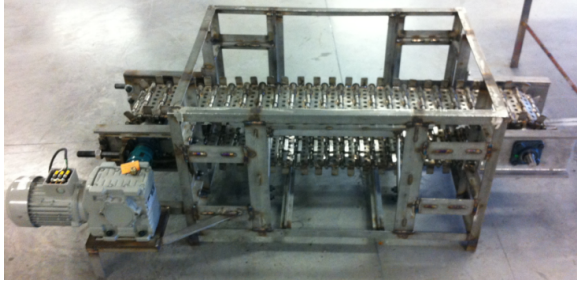


Figura 6.7: Fotografía del ensamble de la banda con el marco del quemador



Figura 6.8: Fotografía muestra detalle de las guías de la banda transportadora.



Figura 6.9: Fotografía del quemador de carbón terminado

lubricación permanente y disminuir el desgaste de las piezas, se aplicó grafito (Ver fotografías en la figura 6.6).

Teniendo la banda transportadora ensamblada se procedió a montarla en el quemador junto con el moto-reductor (Ver figura 6.7) y para garantizar un movimiento continuo sin desalineamiento, se construyeron unas guías que cumplen dos funciones: mantener alineada y sostener la banda transportadora (Ver figura 6.8).

El quemador de carbón totalmente terminado fue puesto en marcha para observar el buen funcionamiento de la cadena, moto-reductor, tensores y guías (Ver figura 6.9).

De forma consecutiva se procedió a colocar la turbina en el marco de la cabina de secado (Ver figura 6.10) para comenzar a fabricar (Ver figura 6.11) e instalar (ver figura 6.12) la tubería que lleva el aire caliente y lo distribuye en todo el compartimento. Una vez construida la tubería se completó con el ensamble de los paneles con el marco (Ver figura 6.13) y las puertas de la cabina secadora (Ver figura 6.14).



Figura 6.10: Fotografía de la turbina en sitio.



Figura 6.11: Fotografía de la tubería fabricada



Figura 6.12: Fotografía de la tubería instalada en sitio



Figura 6.13: Fotografía de los paneles instalados



Figura 6.14: fotografía de las puertas instaladas





Figura 7.1: Fotografía de la primera prueba realizada al horno

## 7. PRUEBAS DEL HORNO DESHIDRATADOR

### 7.1. Pruebas Preliminares

Las pruebas ejecutadas de manera previa a la puesta en marcha final, tuvieron como finalidad la verificación del comportamiento de todos los componentes del horno deshidratador realizando optimizaciones de los puntos débiles después de cada encendida para así obtener la máxima eficiencia.

Monitorear el rango de temperaturas en el cual tiene la capacidad de operar y aprender el manejo del quemador de carbón, fueron puntos clave para encontrar el equilibrio entre cantidad de carbón necesario para mantener en la temperatura ideal para el secado del polímero.

#### 7.1.1. Prueba preliminar numero 1

Las primeras pruebas de funcionamiento del horno deshidratador se realizaron a partir del calentamiento del intercambiador de calor aire-aire con el uso de gas natural (Ver figura 7.1). El objetivo principal de esta primera prueba fue corroborar el buen funcionamiento de todo el conjunto de accesorios junto con la tubería utilizada, corregir posibles fallas, optimizar el calentamiento del intercambiador y observar el comportamiento de la turbina regeneradora a un régimen más aproximado a las condiciones de trabajo.

#### Observaciones:

- La temperatura máxima fue 60°C y se alcanzó en aproximadamente en 50 minutos.
- Después de alcanzar la temperatura máxima, la cabina de secado se mantuvo en esta temperatura de forma estable.
- El intercambiador de calor aire-aire soporto perfectamente las altas temperaturas generadas por la combustión del gas natural, inclusive fue necesario la adición de ladrillos en la parte superior para aumentar la eficiencia de transferencia de calor.
- La prueba se realizó con condiciones no ideales: no existe aislamiento de tubería para evitar pérdidas y se presentaron escapes de aire caliente.



Figura 7.2: Fotografía de la segunda prueba realizada al horno

#### 7.1.2. Prueba preliminar numero 2

Después de haber realizado la primera encendida y efectuado las correcciones necesarias para optimizar el funcionamiento del horno deshidratador en la fase de calentamiento, se procedió a encenderlo nuevamente pero el combustible de esta segunda fue carbón mineral, el cual es el definitivo y el encargado del calentamiento del intercambiador de calor (Ver figura 7.2).

#### Observaciones:

- La temperatura máxima fue 90°C y se alcanzó en aproximadamente en 1 hora 20 minutos.
- Después de alcanzar la temperatura máxima, la cabina de secado se mantuvo en esta temperatura de forma estable.
- El mayor inconveniente para la ignición del carbón mineral ha sido la propagación del fuego hacia el combustible adyacente para generar su encendido y posterior quemado, fue necesario la manipulación manual para lograr mantener encendido el carbón mineral, para eliminar esta acción se prevé la utilización de tamaño de partícula de carbón más pequeña y realizar una mezcla con cascarilla de fruto de palma africana con el fin de conseguir una mejor combustión y encendido, además son dos combustibles con poder calorífico muy similares.
- Dos de las acciones de optimización realizadas fue la elaboración de aletas para mejorar el direccionamiento del aire el cual es el encargado de mantener la llama producida por la combustión de carbón mineral y en segundo lugar se colocó una lámina de acero inoxidable por encima de la tubería de calentamiento para aumentar la eficiencia de transferencia de calor.
- La prueba se realizó con condiciones no ideales: no existe aislamiento de tubería para evitar pérdidas y se presentaron escapes de aire caliente, se operó con estas condiciones para simular las peores condiciones de trabajo y poder el alcance máximo, después de corroborar los resultados positivos se realizarán las correcciones correspondientes para optimizar el sistema y aumentar la eficiencia del horno deshidratador.



Figura 7.3: Fotografía de la tercera prueba realizada al horno

### 7.1.3. Prueba preliminar numero 3

Para esta encendida se siguieron algunas recomendaciones para el mejoramiento de la combustión del combustible y la optimización del quemador de carbón mineral. Esta vez se realizó una mezcla de cascarilla del fruto de palma africana con el mineral (Ver figura 7.3).

#### Observaciones:

- La temperatura máxima fue 90°C y se alcanzó en aproximadamente en 35 minutos.
- Después de alcanzar la temperatura máxima, la cabina de secado se mantuvo en esta temperatura de forma estable.
- Se logró una gran mejoría en la combustión realizando la mezcla de cascarilla del fruto de la palma con el carbón mineral.
- Aunque se han realizado tareas de optimización del flujo de aire para la alimentación de la combustión del combustible, no se ha logrado encender de forma consecutiva con la rotación de la banda transportadora, esta operación ha sido manual.

### 7.1.4. Prueba preliminar numero 4

Debido a los desfavorables resultados en el encendido consecutivo del carbón mineral y después de haber realizado varias modificaciones para optimizar el direccionamiento del aire para la combustión se determinó que se necesitaba mayor caudal de aire para la alimentación, debido a esto se hizo cambio del motor y se le adaptó un variador de frecuencia para controlar las rpm (Ver figura 7.4). En cuanto al carbón mineral, se redujo el tamaño de partícula al máximo permisible obteniendo resultados muy positivos.

#### Observaciones:

- La temperatura máxima fue 100°C y se alcanzó en aproximadamente en 60 minutos
- El horno deshidratador se puso a trabajar durante 2 horas y 15 minutos, durante la cual se logró mantener de forma satisfactoria la temperatura de trabajo con facilidad y control.



Figura 7.4: Fotografía de la cuarta prueba realizada al horno.

- El variador de velocidad utilizado en el motor que alimenta la combustión, ofreció la posibilidad de conseguir la relación ideal de aire-carbón mineral lo cual posibilitó un quemado más uniforme y controlado, aunque no se ha logrado obtener la combustión consecutiva del mismo.
- El tamaño de la partícula del carbón mineral fue fundamental generar una combustión más eficiente.

## 7.2. Prueba Final

Después de cada puesta en marcha del horno deshidratador e ir optimizando cada vez más el proceso de funcionamiento, se llegó a la prueba final de secado del caucho natural.

La preparación del caucho natural para la prueba final fue un poco complicada debido a que después de haber realizado exitosamente la coagulación del látex del caucho natural, este tiene que ser picado y secado lo más pronto posible para evitar alteraciones químicas que perjudiquen la calidad del polímero. La dificultad se presentó en el momento de realizar el picado ya que no se contó con la máquina idónea para realizar la labor del triturado, por tal motivo se procedió a realizarse el picado manualmente logrando un tamaño de partícula demasiado grande el cual afecta directamente el tiempo y calidad del caucho natural al momento del deshidratado.

Cabe resaltar que en esta época del año los árboles que son fuente del látex se encuentran en temporada de defoliación, se evita realizar el rayado del árbol para evitar posibles daños al mismo. Se logró conseguir 5 galones de látex de caucho natural los cuales fueron coagulados alcanzando una masa de 12 kilogramos de caucho seco sin embargo solo fue posible deshidratar 5 kilogramos por razones que se mencionaron anteriormente.

### Registro del procedimiento:

1. Coagulación del látex de caucho natural (Ver figura 7.5)
2. Se midió el peso de la muestra (Ver figura 7.6) y se colocó en una bandeja de aluminio perforada para aumentar la transferencia de calor con el aire (Ver figura 7.7).



Figura 7.5: Fotografías del proceso de coagulación del látex de caucho natural.



Figura 7.6: Fotografía de la cantidad de látex ubicado en la bandeja.



Figura 7.7: Fotografía de bandeja perforada.

3. Se colocaron dos bandejas con caucho natural, cada una con 2.5 kilogramos del polímero y se ubicaron a diferentes alturas para mirar la uniformidad en el secado (Ver figura 7.8).
4. Se realizó el respectivo monitoreo cada hora para observar el progreso de secado; Hora 1 (Ver figura 7.9); Hora 2 (Ver figura 7.10); Hora 3 (Ver figura 7.11); Hora 4 (Ver figura 7.12); Hora 5 (Ver figura 7.13); Hora 6 (Ver figura 7.14).

Durante la prueba las temperaturas fueron monitoreadas a través de dos RTDs que estaban ubicados cerca de las bandejas, para leer las temperaturas se utilizó el PLC ubicado en la extrusora del laboratorio de procesos de ingeniería mecánica. La temperatura que registra la RTD1 se encuentra en la parte superior del horno, su temperatura se puede observar en la figura 7.15; la temperatura que registra la RTD2 se encuentra ubicada en la parte inferior del horno, la temperatura que registró se puede observar en la figura 7.16.

#### Observaciones:

- La temperatura máxima fue 100°C y se alcanzó en aproximadamente en 50 minutos.
- El horno se mantuvo encendido durante 7 horas y 30 min aproximadamente, en donde fueron monitoreadas las temperaturas en cada una de las bandejas por medio de RTDs (Resistant temperature detector); la RTD 1 monitoreo la bandeja superior y la RTD 2 monitoreo la bandeja inferior.
- Se realizaron todos los aislamientos posibles: aislamiento en la tubería de la turbina para evitar pérdidas de calor, se sellaron las fugas en la entrada y salida de la turbina regeneradora y en la conexión con la cabina secadora.





Figura 7.8: Fotografía de ubicación de las bandejas con látex dentro de la cabina de secado.



Figura 7.9: Fotografías de la primera hora de secado del caucho.



Figura 7.10: Fotografías de la segunda hora de secado del caucho.



Figura 7.11: Fotografías de la tercera hora de secado del caucho



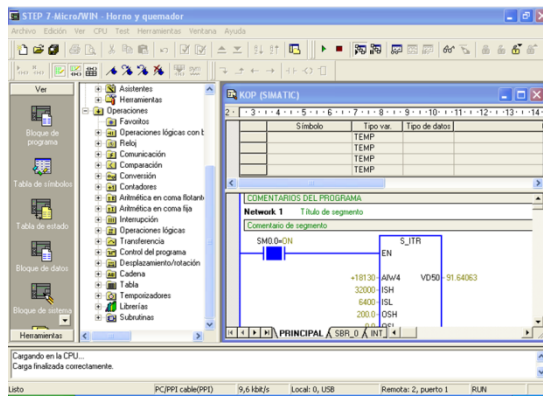
Figura 7.12: Fotografías de la cuarta hora de secado del caucho.



Figura 7.13: Fotografías de la quinta hora de secado del caucho

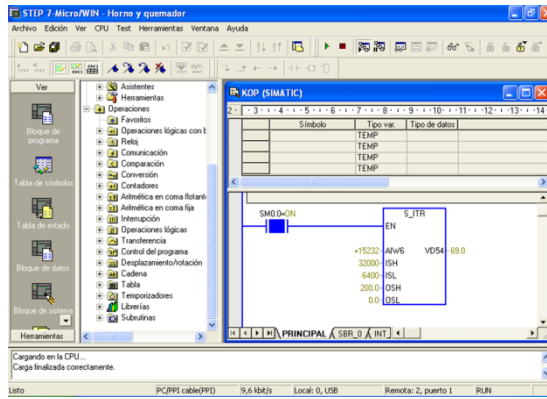


Figura 7.14: Fotografías de la sexta hora de secado del caucho



VD50 - 91.64063

Figura 7.15: Temperatura registrada por la RTD1



VD54 | 69.0

Figura 7.16: Temperatura registrada en RTD2

- Las RTDs registraron un diferencial de temperaturas notable, cerca de 20°C, lo cual indica que el secado no es uniforme en todos los puntos del horno, notándose claramente en los resultados.



## 8. RESULTADOS

Los resultados obtenidos estuvieron bien pero darán pie a análisis para buscar mejoras; a continuación se hablará de los resultados más relevantes.

El quemador de carbón mineral fue diseñado para que funcionara automáticamente a partir de la renovación causada por el avance de la banda transportadora y así provocar una ignición sucesiva por conducción entre partículas del mineral, a pesar de todos los esfuerzos aplicados para optimizar la combustión de carbón, no fue posible generar esta reacción en cadena, a fin y al cabo se realizó la alimentación y renovación del carbón mineral de forma manual logrando los mismos resultados esperados en cuanto a la temperatura máxima alcanzada dentro de la cabina de secado.

Además no se logró obtener una temperatura uniforme en los agujeros de las flautas, siendo el aire calentado por la misma fuente de energía y suministrado equitativamente por todo el sistema de ductos por donde se transporta el fluido. De igual manera las distancias y tiempo entre la succión y descarga son muy cortos para suponer grandes intercambios de calor, así mismo a la tubería se le realizó su respectivo aislamiento para evitar pérdidas de energía térmica.

Con respecto al secado del coagulo del caucho natural los resultados fueron positivos pero con algunos inconvenientes, debido a las siguientes razones:

1. La temperatura de trabajo de la cabina de secado no se mantuvo uniforme de forma ascendente pero de forma longitudinal si se logró conservar constante. Este fenómeno es causado por el diferencial de densidades por lo cual el aire caliente se mantiene en la parte superior inclusive cuando se diseñó un sistema de recirculación del aire para aumentar la eficiencia del mismo.
2. El tamaño de la muestra del caucho natural no fueron idóneas para realizar un secado exitoso debido a que no se pudo conseguir un molino especial para realizar la trituración del polímero, se procedió a picarlo manualmente generando grandes trozos y evitando que se lograra el mayor contacto de área superficial del caucho natural en contacto con el aire circundante. Se evidencio que los pequeños trozos si alcanzaron a secarse satisfactoriamente logrando un color y textura adecuados.
3. La temperatura de trabajo para los hornos de deshidratadores de caucho natural es muy variante. Un artículo tailandés indica que el caucho natural debe ser secado entre 115°C y 135°C por 3 a 5 horas [3], pero a nivel de industria nacional esta temperatura se maneja entre 85°C y 100°C lo cual son datos muy dispares y provocan un margen de incertidumbre muy alto (siendo el mismo tipo de árbol que suministra el látex), en lo que se traduce que la temperatura de trabajo se obtiene a prueba y error.



Figura 8.1: Fotografía del horno realizado en el proyecto



Figura 8.2: Fotografía del horno de la planta de Cimitarra



Figura 8.3: Fotografía del caucho seco por el horno del proyecto.



Figura 8.4: Fotografía del caucho seco por el horno de Cimitarra

### Características de secado y del horno del proyecto de grado

- Se obtuvo un color en el caucho muy disparate producto del tamaño de los trozos del coágulo, se alcanza a notar unas zonas en donde se obtuvo un secado exitoso, sin embargo tendió a quemarse después de 4 horas (Ver figura 8.3).
- Tiempo de secado 7 horas a 90°C
- Fuentes de Energía: - Dispone de 3 motores trifásicos y el combustible es carbón mineral, en la figura 8.1 solo se alcanza a apreciar dos motores trifásicos.
- Energía consumida por el combustible: 167 560 BTU/h
- Costo de energía: 17427.76 pesos por las 7 horas tanto de los motores como de carbón.

### Características de secado y del horno de Cimitarra

- Aunque no se logra un secado ideal, se logra un mejor aspecto producto del tamaño del trozo más pequeño y uniforme, se presenta el mismo problema de distribución de temperaturas en toda la cabina (Ver figura 8.4).
- Tiempo de secado 11 horas a 95°C
- Fuentes de Energía: - Dispone de un quemador de ACPM y 1 motor trifásico (Ver figura 8.2).
- Energía consumida por el combustible: 207846.25 BTU/h
- Costo de Energía: 140069,5 pesos por las 11 horas tanto de diésel como del motor triáfico.

## 9. OBSERVACIONES

Las observaciones realizadas durante todo el proceso del proyecto son:

- En las condiciones iniciales de funcionamiento del horno deshidratador se garantiza un flujo equitativo y uniforme por todos los agujeros de las flautas, siendo incierto la conservación de estas después de alcanzar la máxima temperatura debido a que la densidad del aire cambia de forma notoria.
- Durante el proceso de secado del caucho natural, las RTDs arrojaron un diferencial de temperaturas de 20°C aproximadamente entre la parte superior e inferior del habitáculo, como consecuencia se produce un secado no uniforme del polímero. Al poseer una sola fuente de calentamiento (intercambiador de calor) para todo el sistema, no se logra obtener una temperatura equitativa por todos los agujeros en sentido vertical, pero si se logra mantener de forma horizontal.
- El sistema de acoplamiento entre los paneles y la estructura de la cabina secadora se realizó por medio de prensas atornilladas, se debe tener especial cuidado en la aplicación del torque para evitar que las roscas de los tornillos de acero inoxidable 304 fallen.
- El manejo del carbón mineral suele ser complicado debido a que no se mantiene un poder calorífico constante en todo el combustible, este se demuestra observando el color de la llama mientras es alimentado por el aire del soplador. El uso de un variador de velocidad para controlar el flujo de aire ideal para la combustión del carbón mineral fue indispensable, ya que se permite extraer de una forma más eficiente el calor suministrado por este.
- La manera más eficiente de utilizar el carbón mineral como combustible es en forma de polvo pero se debe manejar un mecanismo muy complejo para lograrlo, por esta razón se recomienda emplear tamaños de grano los más pequeños posibles para optimizar el quemado y generar una llama mucho más constante.
- El tamaño de la muestra del caucho natural debe ser lo más pequeño posible, con el fin de aumentar al máximo el área superficial en contacto con el aire caliente y disminuir de forma notable el tiempo de secado.

## 10. CONCLUSIONES

- No se pudo cumplir en su totalidad la norma ASTM E145-94 debido a que la desviación de la temperatura de trabajo dentro de la cabina de secado supero el 2.5 % establecido por esta, las temperaturas se monitorearon en tiempo real por 2 RTDs localizadas junto a las bandejas donde se colocó el caucho natural a diferentes alturas con el fin de observar el comportamiento de las temperaturas y establecer la desviación del prototipo, además el laboratorio no tiene disponibilidad las 24 horas, tiempo el cual es establecido para la puesta en marcha de la máquina.
- La información se recolectó por medio de visitas técnicas a plantas de procesamiento del polímero ubicadas en el municipio de cimitarra y pozo nutria, además se asistió a un congreso internacional de caucho natural realizado en la ciudad de Villavicencio en octubre de 2011, allí se realizó la visita a los dos cultivos más grandes de caucho natural del país; obteniendo modelos generales de comportamiento para las variables temperatura, tiempo de secado, consumo de combustible y calidad de producto. Las cuales fueron la base para el diseño y construcción del prototipo.
- El diseño del horno deshidratador se realizó de acuerdo a las especificaciones y requerimientos estipulados por la futura producción de látex de caucho natural en la zona. Se utilizó software CAD para el diseño y dimensionamiento de la estructura permitiendo realizar bosquejos comparativos y poder seleccionar el mejor a criterio propio. Con el software CAE se realizó una simulación aproximada de las cargas aplicadas cuando la capacidad de la cabina de secado se encuentre en el máximo régimen.
- La construcción del horno deshidratador se desarrolló en base al diseño planteado, la mano de obra casi que en su totalidad fue realizada dentro del laboratorio de procesos de fabricación, posteriormente se realizaron pruebas de funcionamiento dando pie a la corrección de cualquier imperfección encontrada.
- Se comparó los tiempos obtenidos arrojando como resultado una diferencia de tiempo de 4 horas menos en el horno construido, el cual nos indica que hubo una mejora en el proceso; se cree tentativamente que el proceso pudo haber sido más corto debido a que no se logró una variación de temperatura pequeña dentro de la cabina de secado.
- El prototipo Consumió 167560 BTU/h, que es la suma de carbón utilizado, la turbina regeneradora, el soplador de alimentación para la combustión del mineral y se omite el moto-reductor de la banda transportadora ya que solo se utilizó en muy cortos lapsos de tiempo, en comparación del horno utilizado en la planta de procesamiento de caucho ubicada en el municipio Cimitarra que fue de 207846.25 BTU/h, energía consumida por un quemador de ACPM y un motor trifásico, lo cual genero una relación de costos de 10:1.
- La comparación de calidades del caucho natural se realizó por medio de inspección visual ya que en la región no se cuenta con la tecnología idónea para determinar índice de plasticidad, índice de color, materia volátil y contenido de ceniza, siendo estos los parámetros más importantes para determinar la calidad del polímero. La inspección visual general de la muestra después de las 7 horas de secado mostro las consecuencias de la diferencia de temperatura dentro de la cabina, es decir se obtuvo un color no uniforme en toda la masa, por ende no es posible realizar post-procesos por tratarse de una calidad dispareja. En comparación con la coloración del producto de las otras plantas que obtienen un color ámbar uniforme por todo el caucho natural.

## 11. RECOMENDACIONES

Las siguientes recomendaciones buscan optimizar y mejorar el funcionamiento del horno.

- Debido a que no se pudo alcanzar una temperatura uniforme en toda la cabina de secado por la razón de que el aire caliente por diferencia de densidades tiende a ocupar parte superior del habitáculo, se sugiere trasladar el sistema de recirculación hacia la parte inferior del mismo con el fin de que la turbina regeneradora succione el aire que se encuentra a menor temperatura y así se logre calentar de forma más uniforme.
- Las tareas de optimización para la ignición y propagación de la combustión del carbón mineral no fueron suficientes para obtener un manejo automático del quemador, se recomienda diseñar un direccionamiento más eficiente con el cual se pueda mitigar el problema.
- Disminuir el tamaño del coagulo de caucho natural para lograr aumentar el área superficial en contacto con el aire circundante es vital para mejorar la eficiencia del secado y disminuir notablemente los tiempos y de forma directa bajar los costos de producción. Por esta razón es de gran importancia poseer un sistema idóneo de triturado del polímero.
- Una variable importante a tener en cuenta en el sistema de secado del caucho natural es el contenido de humedad, por tal razón se debe instalar un higrómetro para su medición y así lograr un mejor control en el proceso y renovación en el aire.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Engineering cookbook a Handbook for the Mechanical Designer*. Loren cook company, Sringfield, US-MO, 2nd edition, 1999.
- [2] Notas economicas regionales, región centro oriente. Technical Report 05, Banco de la República, Subgerencia de Estudios Económicos, Centro Regional de Estudios Económicos CREE, Bucaramanga, 2005.
- [3] Project on studying of energy efficiency index in rubber industry. Technical Report 01, Department of Alternative Energy Development and Efficiency, 17 Rama 1 Road Patumwam Bangkok, November 2007.
- [4] *Gravity-Convection and Forced-Ventilation Ovens*. ASTM E145-94, 2011.
- [5] Anthony Barber. *Pneumatic Handbook*, chapter 10 : Vacuum and Low Pressure, pages 563–593. Elsevier Science & Technology Books, 8th edition, 1997.
- [6] Zaidan B. A Wahab Kaida Bin Khalid and ABD. Rahman Kasmani. Microwave drying of hevea rubber latex and total solid content (tsc) determination. *PERTANIKA*, 11, 1988.
- [7] Jan B. van Beilen and Yves Poirier. Establishment of new crops for the production of natural rubber. *Trends in Biotechnology*, 25(11):522–529, November 2007.

# ANEXO A

## ESPECIFICACIONES AISLANTE TÉRMICO





# MANTA DE FIBRA CERÁMICA

## Ref. 4780



### TEMPERATURA

4780 : 1260° C

### DESCRIPCIÓN

Esta manta se obtiene a partir de fibras centrifugadas las cuales poseen la cualidad de ser químicamente inertes.

No contiene ligantes, está cosida por las dos caras.

Es muy resistente antes y después de su calentamiento. Su coeficiente de absorción de sonido es muy superior al de los productos refractarios densos o aislantes.

### TEMPERATURA LÍMITE DE EMPLEO

La temperatura límite de empleo depende de la aplicación. En caso de duda, le recomendamos que se ponga en contacto con su distribuidor.

### VENTAJAS

- Excelente desempeño en el aislamiento térmico.
- Buena inercia química, excepto al contacto con los ácidos fluorhídrico, fosfórico y las bases fuertes.
- Gran estabilidad térmica.
- Baja acumulación térmica.
- Fuerte resistencia al desgarramiento y rotura tanto en caliente como en frío, gracias a las propiedades de las fibras centrifugadas y al doble cosido.
- Ligereza y resiliencia.
- Insensible al choque térmico.
- Buen aislamiento acústico.

### PRESENTACIÓN

Espesores (pulg.)	Ancho (cm)	Largo (mt)
1/2"	60	15.2
1"	60	7.6
2"	60	3.8

### APLICACIONES

- Revestimiento de hornos industriales.
- Aislamiento de calderas.
- Enfriamiento controlado.
- Calefacción de hornos de vidrio.
- Estanquidad de puertas de hornos.
- Aislamiento de los conductos de gases en tuberías.
- Pantallas térmicas en la industria del automóvil.
- Protección contra incendios.
- Piezas cortadas para la industria del electrodoméstico.
- Aislamiento para el destensionado de soldaduras.
- Filtración a alta temperatura.
- Aislamiento de las turbinas de gas o a vapor.

0047/Rev.04/04

**C.I. SEALCO S.A.**  
www.cisealco.com

• E-mail: sealco@cisealco.com

• www.cisealco.com

• Av. 37B # 38A-12 Itagüí -Colombia

• (PBX) (574) 370 47 00

• (FAX): (574) 372 78 52 - 281 73 27





## INFORMACION DEL PRODUCTO

Características principales		<b>Cerablanket</b>
		<b>4780</b>
Temperatura de clasificación	<b>°C</b>	<b>1280</b>

### Características medidas en ambiente (23 °C/ 50% H.R.)

* Color		blanco
* Densidad	8 Lb/pie <sup>3</sup>	
* Resistencia a la tracción (NF-B-40-456)		
64 kg/m <sup>2</sup>	kPa	39
69 kg/m <sup>2</sup>		78
128 kg/m <sup>2</sup>		103
160 kg/m <sup>2</sup>		127

### Prestaciones a alta temperatura

\* Contracción lineal permanente después de 24h (NF-B-40-452) de calentamiento sobre las dos caras a:

1000 °C	%	1.5
1100 °C		2.2
1200 °C	-	3.0
1300 °C	-	5.5
1400 °C	-	-
1500 °C	-	-

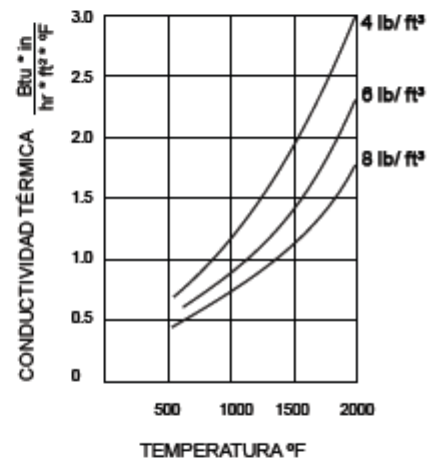
\* Conductividad térmica a la temperatura media de:

		64 kg/m <sup>2</sup>
200 °C	W/m.k	0.07
400 °C		0.12
600 °C	-	0.20
800 °C	-	0.30
1000 °C	-	0.43

\* Calor específico 1080 °C

k./kg.K

Composición química		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	48.5
SiO <sub>2</sub>	-	53.3
CaO	-	-
ZrO <sub>2</sub>	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiO <sub>2</sub>	-	0.15
CaO + MgO	-	0.05
Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	-	0.10



**NOTA:** La información, detalles, dimensiones y valores indicados corresponden a nuestro mejor conocimiento. Recomendamos realizar ensayos de acuerdo a su aplicación, las especificaciones están sujetas a cambios sin previo aviso.

## **ANEXO B**

### **PLANOS DE LA CABINA DE SECADO**



## ANEXO C

### PLANOS DEL QUEMADOR DE CARBÓN

