

**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

**"Diseño de un Túnel de Termocontracción para Etiquetar  
botellas con Película PVC"**

**TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO MECANICO**

Presentada por:

Gustavo Arnaldo Zambrano Calderón

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2007

## **AGRADECIMIENTO**

A todas las personas  
que de uno u otro  
modo colaboraron en  
la realización de este  
trabajo y  
especialmente al Ing.  
Ernesto Martínez  
Director de Tesis, por  
su invaluable ayuda.

## **DEDICATORIA**

A MIS PADRES GUSTAVO Y  
MARIA RAQUEL.

A MIS HERMANOS MARIA  
RAQUEL Y GABRIEL.

A MI TIO VICTOR

## TRIBUNAL DE GRADUACION

---

Ing. Eduardo Rivadeneira P.  
DECANO DE FIMCP  
PRESIDENTE

---

Ing. Ernesto Martínez L.  
DIRECTOR DE TESIS

---

Ing. Francisco Andrade S.  
VOCAL

## **DECLARACION EXPRESA**

"La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL"

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

---

Gustavo A. Zambrano Calderón

## **ORESUMEN**

En la actualidad en las pequeñas y grandes industrias ecuatorianas es más común notar que se utiliza el proceso de etiquetar diferentes productos principalmente aquellas presentaciones en botellas mediante películas termoencogibles el cual les permite de esta forma tener una presentación de sus productos más conveniente, ya que este les brinda mayor protección y le da mayor estética al producto al momento de ser vendidos. A la película termoencogible puede colocársele una leyenda, que se vea el interior o no; todo al gusto y requerimientos del cliente sin importar la forma de la botella.

El proceso de etiquetar mediante películas termoencogibles consiste en envolver el producto en una de estas películas y luego hacerlo pasar por un túnel denominado túnel de termo contracción el cual mediante calor contrae esta película y le ofrece a la botella la apariencia final con la que se va a vender en el mercado.

Una de las industrias en las que se quiere implementar este proceso es una licorera de la ciudad de Guayaquil la cual debido a su crecimiento del mercado y nuevas presentaciones que ofrece a sus clientes, requieren para lo cual utilizar botellas PET con etiqueta que cubre casi el 100% de ella; requiere un equipo de termo contracción pero existen problemas económicos

para adquirir el mencionado equipo debido al costo, por lo que, en afán de buscar otras alternativas se decidió la construcción de un túnel de termocontracción que pueda ser realizado con ingeniería local y para los requerimientos existentes, a un menor costo que aquellos construidos en el exterior y con esto fomentar el desarrollo industrial en el Ecuador.

El objetivo principal de esta tesis es el de diseñar un túnel para termocontraer películas de PVC; utilizando los materiales y elementos disponibles en el mercado local y además que su operación sea de bajo costo y fácil mantenimiento.

Entre las condiciones indicadas por la industria licorera que debe cumplir el túnel están producción de N° botellas/minuto, dimensiones, material de botella, además el horno debe funcionar con GLP(Gas Licuado de Petróleo). Partiendo con estos datos conocidos se determinará la capacidad y dimensión del túnel.

Luego se elaborará el diseño de forma de los elementos constituyentes del Túnel que son el horno y sistema de transportación. Se realizará el diseño del Túnel el cual se hará en base al análisis térmico del horno, se analizara y se seleccionara cada elemento que forma parte tanto del horno como del sistema de transportación ya que se trata de obtener una correcta adhesión

de la etiqueta a la botella y al mismo tiempo no causar daño al producto por efecto del calor, por lo que la determinación de la temperatura de operación y la velocidad de la botella es crítica.

Se elaborará un cronograma de construcción en base a los planos y se presupuestará los costos del equipo.

Con este diseño se espera optimizar la operación de etiquetamiento con este tipo de equipos tanto en consumo de energía y calidad de etiquetamiento permitiendo de esta forma ser construidos a nivel local a bajo costo y poder así ser competidores de iguales equipos traídos del exterior, con lo cual se generará una fuente de trabajo.



## INDICE GENERAL

RESUMEN.....	II
INDICE GENERAL.....	V
ABREVIATURAS.....	IX
SIMBOLOGIA.....	X
INDICE DE FIGURAS.....	XI
INDICE DE TABLAS.....	XII
INDICE DE PLANOS.....	XIII
INTRODUCCION.....	1

### CAPITULO 1

1. GENERALIDADES.....	2
1.1. Descripción del Proceso de Producción.....	2
1.2. Definición del Problema.....	3
1.3. Alternativa de Solución.....	4
1.3.1. Tipos de Etiquetas.....	4

### CAPITULO 2

2. FUNDAMENTOS TEORICOS.....	6
2.1. Descripción de la Teoría de Termocontracción.....	6
2.2. Descripción del Túnel de Termocontracción.....	7

### **CAPITULO 3**

3. DISEÑO DE FORMA DEL TUNEL DE TERMOCONTRACCION.....	10
3.1. Consideraciones y Especificaciones en el Diseño.....	10
3.1.1. Producción Requerida en N° Botellas/Minuto.....	10
3.1.2. Dimensiones de La Botella.....	11
3.1.3. Velocidad de Transportación.....	12
3.1.4. Características del Material de Operación.....	13
3.2. Dimensiones del Túnel de Termocontraccion.....	15
3.3. Bosquejo del Túnel de Termocontraccion.....	18

### **CAPITULO 4**

4. DISEÑO DEL TUNEL DE TERMOCONTRACCION.....	19
4.1. Análisis Térmico del Horno.....	19
4.1.1. Calor Entregado a la etiqueta.....	24
4.1.2. Perdidas por Paredes y por Extremos de Túnel.....	47
4.1.3. Determinación de Consumo Teórico de Combustible.....	58
4.2. Calculo y Diseño del Quemador.....	60
4.3. Diseño de Sistema de Transportación.....	72
4.3.1. Calculo y Selección de Transportador de Botella.....	72
4.3.2. Calculo y Selección de Motor y Caja Reductora.....	82
4.4. Selección de Cortinas de Aire.....	83

**CAPITULO 5**

5. ANALISIS DE COSTO DEL TUNEL DE TERMOCONTRACCION.....84

**CAPITULO 6**

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....91

APENDICES

BIBLIOGRAFIA

## ABREVIATURAS

A	Area
Q	Calor
Cp	Calor Especifico a Presión Constante
h	Coefficiente Convectivo
k	Conductividad Térmica
E <sub>almacen</sub>	Energía Almacenada
Kg	Kilogramo
KW	Kilowatt
m	Metro
m <sup>2</sup>	Metro Cuadrado
m <sup>3</sup>	Metro Cúbico
N	Newton
Gr <sub>L</sub>	Numero Grashof
Nu <sub>L</sub>	Numero Nusselt
Pr	Numero Prandtl
Ra <sub>L</sub>	Numero Rayleigh
Re	Numero Reynolds
P	Producción Requerida
PC <sub>inf</sub>	Poder Calorífico Inferior
Pot.	Potencia
s	Segundo
T	Temperatura
W	Watt

## SIMBOLOGIA

$\rho$	Densidad
$^{\circ}\text{C}$	Grado Centígrado
$^{\circ}\text{K}$	Grado Kelvin
$\nu$	Viscosidad cinemática
$\forall$	Volumen
$\overset{*}{m}$	Flujo Masico
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann
$\mu$	Coefficiente de Fricción
$\Delta P$	Caída de Presión

## INDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1.1 Recipientes con Etiquetas Termoencogibles.....	2
Figura 1.2 Producto antes y después de Termocontraccion.....	3
Figura 1.3 Botellas Con Etiquetas Adhesivas.....	4
Figura 1.4 Proceso de Etiquetado mediante Fundas Termoencogibles.....	5
Figura 2.1 Correlación de Termocontraccion.....	8
Figura 3.1 Diseño de Forma del Túnel.....	18
Figura 4.1 Carga: Película, Botella, Aire y Agua.....	30
Figura 4.2 Distribución de Temperatura de Carga.....	45
Figura 4.3 Pared Compuesta.....	47
Figura 4.4 Circuito Termico Equivalente de Pared Compuesta.....	48
Figura 4.5 Tubo Venturi.....	61
Figura 4.6 Inyector.....	63
Figura 4.7 Diagrama de Funcionamiento de un Quemador Atmosferico.....	70
Figura 4.8 Transportador Tipico.....	77
Figura 4.9 Retorno de Cadena.....	78
Figura 4.10 Catenaria.....	78
Figura 4.11 Fuerzas Actuantes sobre la Cadena.....	80

## INDICE DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1 Dimensiones De Botellas.....	11
Tabla 2 Propiedades Termodinámicas de Componentes de la Carga.....	36
Tabla 3 Valores Típicos de Coeficiente de Transferencia de Calor por Conveccion.....	38
Tabla 4 Propiedades Termodinámicas de Aire Circundante a las Paredes.....	50
Tabla 5 Propiedades de Sustancias Gaseosas.....	59
Tabla 6 Valores del Coeficiente de Flujo (K) según el Angulo de Convergencia del Inyector.....	64
Tabla 7 Limites de Inflamabilidad de Sustancias Gaseosas.....	66
Tabla 8 Valores de X.....	68
Tabla 9 Carga Limite.....	75
Tabla 10 Costos de Materiales y Equipos.....	85
Tabla 11 Máquina Construcción Local.....	87
Tabla 12 Maquina Importada.....	88
Tabla 13 Construcción Local.....	88
Tabla 14 Construcción Local-Electricidad.....	89
Tabla 15 Construcción Local-Total.....	89
Tabla 16 Maquina Importada-Consumo Eléctrico.....	89

## INDICE DE PLANOS

Plano 1	Viga Guía Interior
Plano 2	Viga Guía Exterior
Plano 3	Viga C
Plano 4	Pared Interior
Plano 5	Pared Exterior
Plano 6	Tapa Anterior y Posterior Pared
Plano 7	Guía Desgaste Retorno
Plano 8	Viga Retorno
Plano 9	Guía Desgaste Acarreo
Plano 10	Viga Apoyo
Plano 11	Apoyo Motor
Plano 12	Viga Rigidez
Plano 13	Angulo Sujeción Motor
Plano 14	Angulo Sujeción
Plano 15	Patas
Plano 16	Eje Conductor
Plano 17	Barra Engrane Conducido
Plano 18	Quemador
Plano 19	Barra Sujeción Motor
Plano 20	Anillo Fijación Conducido
Plano 21	Anillo Fijación Conductor



## INTRODUCCION

La idea de desarrollar el presente proyecto surge debido a la necesidad de una empresa licorera situada en la ciudad de Guayaquil de incrementar su producción, para lo cual se ve obligado a adquirir equipos que puedan obtener la capacidad de producción deseada en cada uno de sus procesos. Uno de estos equipos que se requieren, es un túnel de termo-contracción utilizado en el para etiquetar de botellas.

Debido al costo del equipo en el exterior no ha sido posible su adquisición por lo que se ha considerado la posibilidad de construirlo en el país. Al realizar el diseño del Túnel de termo contracción con ingeniería local se espera adecuarlo a las necesidades de la empresa tanto en producción así como en el costo de construcción sea bajo y de fácil operación, que en equipos importados especialmente en lo que respecta a producción son de demasiada capacidad para la demanda que tiene la empresa.

Una de las principales características que se pretende implementar es el uso de GLP(Gas Licuado de Petróleo) como fuente de energía para el calentamiento de la película a contraer.

# CAPITULO 1

## 1. GENERALIDADES

### 1.1. Descripción del Proceso de Producción

Hoy en día muchas empresas realizan este tipo de proceso a sus productos no solo con la intención de poner una etiqueta en la que vaya el nombre del producto, compañía que lo fabrica; sino también darle al producto una presentación llamativa.



**FIGURA 1.1 RECIPIENTES CON ETIQUETAS TERMOENCOGIBLES**

## 1.2. Definición del Problema

La manera en que se haga el etiquetado debe ser tal que garantice antes que todo que la etiqueta no se vaya a desprender del producto, ni moverse, ni deformarse con la manipulación y transporte del producto; además que la legibilidad se mantenga después del proceso de etiquetado. Todo con el fin de que el producto tenga una buena presentación.



**FIGURA 1.2 PRODUCTO ANTES (A) Y DESPUÉS DE TERMOCONTRACCION (B)**

El propietario de esta empresa indica que no existen los recursos suficientes para adquirir un equipo en el exterior, además todos los equipos ofertados operan con energía eléctrica lo cual aumentara la

demanda de la misma y por lo tanto notaría este incremento en las planillas mensuales.

Aun teniendo listas las botellas, etiquetas y cartones no es posible lanzar este producto al mercado.

### **1.3. Alternativa de solución**

A continuación se presentan alternativas que podrían ser analizadas para seleccionar que tipo de equipo se va a adquirir.

#### **1.3.1. Tipos de Etiquetas**

Dentro de los procesos de etiquetado en el mercado son conocidos los siguientes procesos:

##### **➤ Cintas Adhesivas**

Estas cintas se pegan a la superficie de la botella usando pegamentos (químicos adhesivos).



**FIGURA 1.3 BOTELLAS CON ETIQUETAS ADHESIVAS**

### ➤ Fundas Termoencogibles

Este tipo de proceso se basa en colocarle fundas hechas de materiales termoencogibles a las botellas llenas de líquido. Estas fundas vienen en dimensiones previamente solicitadas, para luego ser pasados a través de un túnel de termo contracción, donde adquiere la contracción requerida.

En base al costo de las etiquetas y la durabilidad de las mismas se decide utilizar la funda termoencogible.

Además el cliente sin haber analizado las diferentes alternativas mando a fabricar las etiquetas termocontraibles razón por la cual se diseñara un equipo para que la etiqueta se adhiera al cuerpo de la botella.



**FIGURA 1.4 PROCESO DE ETIQUETADO MEDIANTE FUNDAS TERMOENCOGIBLES**

# CAPITULO 2

## 2. FUNDAMENTOS TEORICOS

### 2.1. Descripción de la Teoría de Termocontracción

El sistema de envase en termocontraible se fundamenta en la utilización de un material termoplástico que se caracteriza por variar sus dimensiones y adecuarse a la forma del objeto a envolver, cuando se llega a una determinada temperatura.

El fenómeno de temocontraccion (también llamado de retracción) se produce como consecuencia de las tensiones residuales existentes en el film, las cuales fueron obtenidas durante el proceso de fabricación de la película y que resultan liberadas cuando el material alcanza la temperatura adecuada. Estas tensiones, llamadas contracción longitudinal y contracción transversal, son regulables durante el proceso de fabricación del film y para cada tipo de envoltorio que se desea obtener se pueden especificar los valores

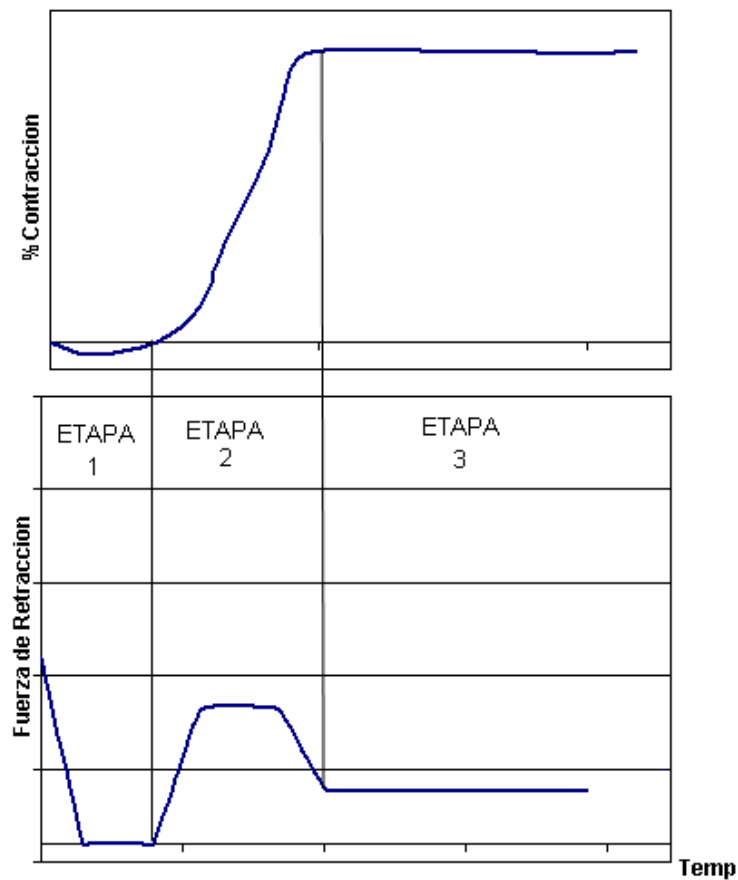
necesarios. Como se muestra en la figura 2.1, el fenómeno de termocontracción se desarrolla de acuerdo a las siguientes etapas:

ETAPA 1: *Ablandamiento del film*: El film se ablanda en ambas direcciones (Transversal y longitudinal).

ETAPA 2: *Retracción del film*: En esta etapa comienza la retracción del film, alcanzándose gran parte de la retracción del material.

ETAPA 3: *Estabilización*: En esta etapa el material deja de contraer, aun cuando permanezca a la temperatura de contracción o superior a ella.

ETAPA 4: *Enfriamiento*: El material completa su retracción mientras se enfría. Esta etapa del proceso es importante, por el incremento de fuerza de contracción del material.



**FIGURA 2.1 CORRELACION DE TERMOCONTRACCION**

## 2.2. Descripción del Túnel de Termocontracción

El recinto del horno está formado por la caldería y el aislamiento térmico en cuyo interior se disponen los quemadores y la banda transportadora. El calor en el recinto se genera debido a un flujo de combustible (Gas Licuado de Petróleo) que sale de un tanque presurizado, viaja por las líneas de combustible y llega a los quemadores. Este flujo justo a la salida de los quemadores se



combustiona. Los quemadores se encuentran uniformemente distribuidos a lo largo del horno.

Existe transferencia de calor por convección entre todas las superficies dentro del horno, estas superficies son la pared, el techo, la banda y la carga (botellas llenas y la película puesta a su alrededor); las botellas entran en dos filas. De esta manera la botella alcanza una determinada temperatura en la cual ocurre contracción de la película.

En la salida y entrada del túnel se encuentran unas cortinas de material térmico cuya función principal es impedir que el aire caliente salga del horno al salir del horno la botella, permitiéndole de esta forma recuperar sus propiedades mecánicas originales; al bajarle la temperatura a la botella ya etiquetada facilita la manipulación de la misma en procesos posteriores.

### **Características generales**

- Paredes y techo están construidas en acero inoxidable y unidas totalmente por medio de pernos.
- Aislamiento térmico de lana de vidrio.
- Fuente de calor, el túnel funciona con GLP.

# CAPITULO 3

## 3. DISEÑO DE FORMA DEL TUNEL DE TERMOCONTRACCION

### 3.1. Consideraciones y especificaciones en el Diseño

Para realizar el presente diseño se estableció un modelo en el cual se consideraran los siguientes puntos:

- Producción requerida (N° paquetes/minuto).
- Dimensiones de la botella.
- Velocidad de transportación.
- Características del material de operación:
  - Tiempo de exposición necesario para contracción.

#### 3.1.1. Producción requerida en N° Botella/Minuto

En la actualidad en el mercado nacional normalmente se venden túneles importados con una capacidad superior a las

180 botellas por minuto la cual en muchos casos es demasiado alta para pequeñas industrias interesadas en adquirir este tipo de equipo.

Consultando a varias industrias y a personas interesadas en este producto se estableció la capacidad máxima de producción en 100 botellas/minuto.

### 3.1.2. Dimensiones de la botella

En el mercado existen variadas dimensiones de botellas el túnel que se desea construir abarcara varios tamaños de botellas, a continuación se indican sus dimensiones:

**TABLA 1  
DIMENSIONES DE BOTELLAS**

Descripción	Altura Ext.[mm]	Diametro Ext.[mm]
3.5 litros	370	124
3 litros	370	115
2 litros	350	105
1.7 litros	345	90
½ litros	220	65

Ya que se desea que la maquina funcione para botellas con capacidad entre 0.5 a 3.5 litros se tendrá en cuenta las dimensiones que corresponden al recipiente de 3.5 litros.

### 3.1.3. Velocidad de transportación

El rango típico de velocidades de transportación equipos es menor o igual que 10 m/min.

Para determinar la velocidad de transportación se basara en el requerimiento de botellas/minuto que se menciona anteriormente.

Además se considerara un espaciamento longitudinal entre botellas de 30 mm. Considerando el diámetro de 124 mm más el espaciamento entre botellas nos da una longitud total de 154 mm/botella.

Para una producción de 50 botellas/minuto lo que da una producción de 25 botellas/minuto por fila y una longitud de paquete de 154 mm/botella, tenemos:

$$V = \frac{PxL}{1000} \quad \text{ec.3.1}$$

Donde,

V = Velocidad de sistema de transportación [m/min.]

P = Producción por fila [botellas/minuto].

L= Longitud [mm/botella].

Entonces:

$$V = \frac{25 \times 154}{1000} = 3.85 \text{ m/min}$$

### 3.1.4. Características del material de operación Termoplásticos

Los plásticos termoplásticos se pueden fundir cuantas veces se desee para darle forma, por lo tanto son reciclables. Los termoplásticos al ser calentados aumentan la energía de sus moléculas y se reducen las fuerzas de atracción entre ellas, de esta forma se vuelven mas deformables o plásticos.

Una vez enfriados recuperan sus propiedades mecánicas.

Algunos tipos de plásticos termoplásticos son:

#### A. Polietileno Alta Densidad (PEAD)

Esta compuesto por cadenas de moléculas rectas, sin bifurcaciones, por lo que la fuerza de atracción entre moléculas es alta, dando como resultado un plástico duro y resistente y estable, con el se fabrican, cajas para botellas de cerveza, leche y refrescos, algunos envases de productos lácteos y detergentes líquidos.

## B. Polietileno Baja Densidad (PEBD)

Esta formado por cadenas de moléculas con bifurcaciones, por lo tanto es un material menos resistente y mas flexible, se ablanda con el calor; con el se fabrican juguetes, bolsas de plástico, barreños, etc.

### Películas Polietileno

Una característica de las películas de polietileno es que cuando el material se lo calienta empieza a cambiar así como también reconoce su estado original y se contrae en sus medidas, dejando ajustado a los productos que envuelve.

## C. Cloruro de polivinilo (PVC)

Es un material originalmente rígido pero se puede hacer más flexible añadiendo plastificantes. Se emplea en tuberías, gomas de riego, maletas, impermeables, cubiertas de cables, etc.

También se lo conoce como: poli cloruro de vinilo, o poli cloruro de polivinilo.

### Películas de PVC

La contracción del film de PVC, a diferencia de otros plásticos, como el PE (Polietileno), se logra a temperaturas bajas, característica importante para el empaque de productos sensibles al calor.

### **3.2. Dimensiones del Túnel de termo contracción**

Para determinar las dimensiones del túnel de termo contracción se basara en el diámetro de las botellas y espaciamento entre las filas de botellas para establecer el ancho; para la altura del túnel el alto de las botellas y en la velocidad de transportación con el mayor tiempo contracción requerido para determinar la longitud del túnel. En la sección siguiente se muestra un bosquejo de la maquina para tener un mejor entendimiento de cual es el alto, ancho y largo del Tunel.

Se comenzara determinando el ancho y la altura del túnel para lo cual consideró el paquete de mayores dimensiones que tiene las siguientes medidas: 370 mm de alto y 124 mm de diámetro.

#### **Altura del túnel**

Como la altura de la botella de mayores dimensiones que se utilizara en este túnel es de 370 mm se considerara un espaciamento de 30

mm por lo que la altura del túnel será de 400 mm, esto es desde donde se coloca la botella (cadena transportadora) hasta la parte interior del techo.

### **Ancho del túnel**

Como el diámetro del paquete de mayores dimensiones es de 124mm se considerara un espaciamiento 72mm (entre botellas de una misma fila) el cual permitirá a los operarios tener mayor libertad para colocar las botellas sobre la cadena transportadora por lo que el ancho del túnel será de 425 mm.

### **Longitud del Túnel**

Para determinar la longitud del túnel de termo contracción consideraremos la velocidad de transportación requerida la cual fue de 3.85 m/min y la temperatura a la cual debe llegar la película para completar su contracción que es 65°C, para evitar que el PVC se deforme o la leyenda escrita se deteriore debido a un calentamiento muy brusco el proceso se realizara en 25 seg por lo que la longitud del túnel será:

$$l = (V \times t) / 60 \quad \text{ec. 3.2}$$

l = longitud del túnel [m]



V = velocidad de sistema de transportación [m/min.]

t = tiempo promedio [s]

entonces,

$$l = \frac{3.85\text{m/min.} \times 25 \text{ s}}{60\text{s/min}}$$

$$l = 1.604 \text{ m}$$

Por lo que la longitud requerida para el túnel será de 1.604 m. Las

medidas que el túnel tendrá serán:

Boca del Túnel: 400 x 425mm

Largo del Túnel: 1604 mm.

### 3.3. Bosquejo del Túnel de termo contracción

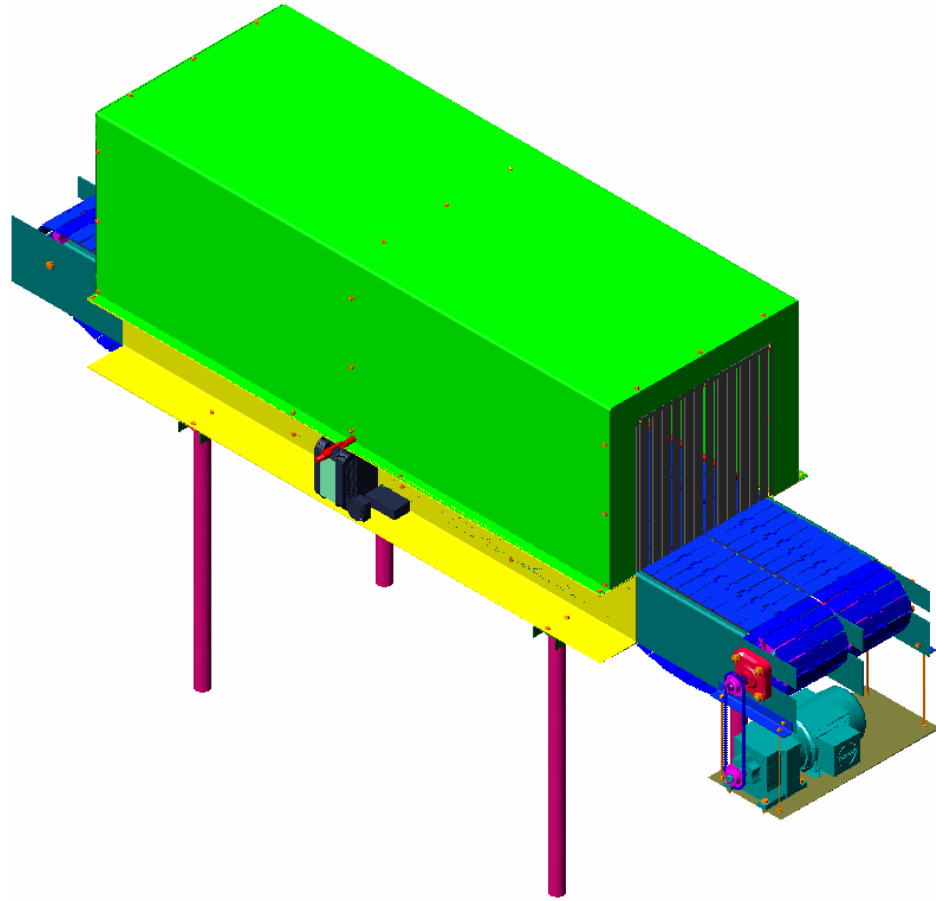


FIGURA 3.1 DISEÑO DE FORMA DEL TUNEL

# CAPITULO 4

## 4. DISEÑO DEL TUNEL DE TERMOCONTRACCION

### 4.1. Análisis Térmico del Horno

El balance energético de un horno varía fundamentalmente de un horno continuo a un horno intermitente. En los continuos interviene la producción en Kg/h, mientras que en los intermitentes es mas importante la carga producida en cada operación en Kg o en t.

La temperatura en los hornos continuos es prácticamente constante en cada zona a lo largo del tiempo, y la temperatura de la carga varia a lo largo del horno desde la entrada hasta la salida. En los hornos intermitentes la temperatura de la carga varía a lo largo del tiempo, pero se mantiene relativamente constante en todo el horno en un instante dado.

En los hornos continuos, además de la producción horaria en Kg/h es interesante destacar la producción específica en  $\text{Kg/m}^2\text{-h}$ , referida a la superficie total de solera o a la superficie de solera realmente ocupada por la carga. En los hornos intermitentes, además de la carga introducida en Kg, interesa conocer la capacidad de calentamiento en Kg/h, teniendo en cuenta el tiempo de calentamiento y la capacidad específica en  $\text{Kg/m}^3\text{-h}$ , referida al volumen útil interior del horno o al volumen realmente ocupado por la carga.

El consumo de energía de un proceso en un horno industrial es una de sus características principales. Se determina calculando los componentes del balance energético, cuando se trata del diseño de un horno, o midiéndolos en su funcionamiento real, cuando se trata de un horno construido.

El balance energético se establece tomando como base la producción horaria, en los hornos continuos, y el ciclo completo de una carga, en los hornos intermitentes. Sin embargo, es frecuente que muchos hornos continuos funcionen únicamente durante uno o dos turnos de trabajo al día, por lo que las pérdidas de calor, etc.; durante las horas de parada del horno deben de tenerse en cuenta.

En todo balance energético es fundamental que las condiciones al final del periodo en que se hacen las mediciones sean las mismas que al comienzo. Por ello en los hornos intermitentes las mediciones cubren una carga completa o un ciclo completo, y en los hornos continuos las condiciones de trabajo deben ser lo suficientemente constantes como para que las pequeñas variaciones que se produzcan sean despreciables. Entre los componentes de un balance energético se distinguen los que suponen aportación de calor al proceso y los receptores.

#### **A. Balance energético en funcionamiento estable**

Denominamos funcionamiento estable de un horno al que es repetitivo a lo largo del tiempo en cuanto a las condiciones de trabajo sin paradas o cambios importantes en el proceso, sobre todo de temperatura. En un horno continuo supone constancia en las cargas, temperaturas de regulación de las diferentes zonas, velocidades de avance o tiempos de tratamientos constantes a lo largo de un periodo prolongado sin paradas durante la noche, fines de semana, etc.

En un horno discontinuo, que opera por ciclos con enfriamiento del horno, dichos ciclos se repiten sucesivamente sin cambios en las

cargas y temperaturas de proceso. Tiene especial importancia el calor almacenado en el revestimiento, del cual una parte importante se pierde en cada ciclo.

En el funcionamiento de un horno debe verificarse:

$$\text{Calor aportado} = \text{Calor absorbido}$$

### **B. Balance energético en funcionamiento real**

El balance energético en funcionamiento estable (producción nominal del horno sin variar las condiciones de trabajo) es aplicable a unos periodos no muy extendidos en el tiempo, ya que en su funcionamiento real es frecuente:

- Un cambio en las condiciones del proceso.
- Operar con diferentes cargas o producciones de trabajo.
- Realizar paradas por: modificaciones en los procesos anteriores y/o posteriores al horno, exigencias de mantenimiento, funcionamiento en uno o dos turnos de trabajo en lugar de continuo, paradas de fin de semana, en que el horno se desconecta o se mantiene a temperatura reducida, etc.

Un cambio de los parámetros de funcionamiento del horno puede suponer un considerable aumento de la energía consumida. Si es

preciso elevar las temperaturas de regulación de las distintas zonas que componen el horno, por una parte, requiere mayor consumo de energía durante el funcionamiento estable, y además para la producción del horno hasta que se alcance el nuevo régimen, lo que da lugar a pérdidas de calor sin producción.

La energía requerida para calentar el horno y las pérdidas de calor, durante el tiempo de calentamiento sin producción, pueden elevar considerablemente el consumo específico medio. Si el horno va a operar a un régimen de temperaturas inferior al anterior, es preciso destinar un tiempo de enfriamiento sin producción, y que deberá tenerse en cuenta en el balance energético correspondiente.

Los tiempos de calentamiento o enfriamiento antes citados son reducidos en hornos con aislamiento en base a fibras cerámicas, pero pueden ser de varias horas cuando se han utilizado ladrillos u hormigones refractarios y aislantes.

Además deben considerarse los periodos de parada total (vacaciones, mantenimiento anual de la instalación, fines de semana en que se desconecte el horno, averías en el interior del

horno que obliguen a un enfriamiento para su reparación, etc.) a los que sigue un calentamiento del horno hasta su puesta a temperatura de régimen que exige una gran cantidad de energía y que, para evitar daños en el revestimiento, debe hacerse a una velocidad adecuada.

Para realizar el análisis térmico se tiene que cumplir el siguiente balance de energía:

$$E_{\text{carga}} + E_{\text{pérdidas}} = E_{\text{aire}}$$

Al dividir el balance de energía para un  $\Delta t$  se obtiene:

$$Q_{\text{paquete}} + Q_{\text{pérdidas}} = Q_{\text{aire}} \quad \text{ec. 4.1}$$

#### 4.1.1. Calor Entregado a la Etiqueta

El calor útil requerido para calentar cada componente de la carga, que entra al horno será:

$$Q = \dot{m} C_p (T_s - T_e) \quad \text{ec. 4.2}$$

$\dot{m}$  = Flujo de masa del Componente [kg/s]

$C_p$  = Calor Especifico [J/kg °K]

$T_s$  = Temperatura de Salida [°C]

$T_e$  = Temperatura de Entrada [°C]



A partir de este momento se realizara el cálculo de energía que requiere la carga para el siguiente caso:

La botella más grande asumiendo propiedades del agua para el líquido contenido en el interior del recipiente.

La carga esta formada por:

- Líquido
- Envase (PET)
- Película termoplástica: el material termoplástico que utilizare para mi análisis será el PVC que dentro del mercado para el etiquetado de botellas se venden en espesores de 40 a 50 micras siendo temperatura de contracción de 65°C a un tiempo de 25 segundos.

### Carga

Las botellas a analizar se asumen cilindros perfectos con las siguientes dimensiones:

Altura 370 mm

Diámetro 124 mm

La temperatura previa al ingreso al túnel de todos los componentes es 27°C.

Para determinar la masa de cada componente del paquete se tienen los siguientes datos:

➤ Película PVC: espesor 50 micras, alto 0.37 m, diámetro 0.124 m y densidad 1350 Kg/m<sup>3</sup>

$$m = \rho \cdot V$$

$$m = 1350 \text{ Kg/m}^3 \cdot (\pi \cdot 0.124 \text{ m} \cdot 5 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot 0.37 \text{ m})$$

$$m = 9.73 \times 10^{-3} \text{ Kg/Botella}$$

Para determinar el flujo másico se tiene la producción requerida que son 50 botellas/minuto, entonces tenemos:

$$\dot{m} = m \cdot P$$

$$\dot{m} = 9.73 \times 10^{-3} \frac{\text{Kg}}{\text{Botella}} \times 50 \frac{\text{Botella}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}}$$

$$\dot{m} = 8.11 \times 10^{-3} \text{ Kg/s de PVC}$$

➤ Botella de PET: espesor 0.4 mm, alto 0.37 m, diámetro 0.124 m y densidad 1410 Kg/m<sup>3</sup>

$$m = \rho \cdot V$$

$$m = 1410 \text{ Kg/m}^3 \cdot (\pi \cdot 0.124 \text{ m} \cdot 4 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot 0.37 \text{ m})$$

$$m = 8.13 \times 10^{-2} \text{ Kg/Botella}$$

De la misma manera en que se hizo con la película, entonces tenemos:

$$\dot{m} = m \cdot P$$

$$\dot{m} = 8.13 \times 10^{-2} \frac{\text{Kg}}{\text{Botella}} \times 50 \frac{\text{Botella}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{min}}{60 \text{seg}}$$

$$\dot{m} = 67.75 \times 10^{-3} \text{Kg/s de PET}$$

➤ Líquido son botellas de 3.5 litros: densidad 1000 Kg/m<sup>3</sup>

$$m = \rho \cdot V$$

$$m = 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 3.5 \text{litros} \times \frac{1 \text{m}^3}{1000 \text{litros}}$$

$$m = 3.5 \text{ Kg/ Botella}$$

De manera similar en que se hizo con anteriormente, se tiene:

$$\dot{m} = m \cdot P$$

$$\dot{m} = 3.5 \frac{\text{Kg}}{\text{Botella}} \times 50 \frac{\text{Botella}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{min}}{60 \text{seg}}$$

$$\dot{m} = 2.915 \text{ Kg/s de Agua}$$

La botella no esta totalmente llena de agua, también hay gas en el interior de la misma; cualquiera que sea este gas se asumirá propiedades del aire.

- Gas: Volumen de liquido contenido en la botella 3.5litros(0.0035 m<sup>3</sup>), alto total de la botella 0.37 m, diámetro 0.124 m y densidad 1.1614 Kg/m<sup>3</sup>

$$H_{AGUA} = \frac{4V}{\pi D^2}$$

$$H_{AGUA} = \frac{4 \times 0.0035 \text{m}^3}{\pi (0.124 \text{m})^2} = 0.29 \text{m}$$

$$H_{AIRE} = H_{total} - H_{AGUA}$$

$$H_{AIRE} = 0.37 - 0.29 = 0.08 \text{m}$$

Teniendo la altura que ocupa el gas es posible calcular su masa:

$$m = \rho * V$$

$$m = 1.1614 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times \left( \frac{0.08 \text{m} \times \pi (0.124 \text{m})^2}{4} \right)$$

$$m = 1.12 \times 10^{-3} \text{ Kg/ Botella}$$

Para determinar el flujo másico se tiene la producción requerida que son 100 botellas/minuto, entonces tenemos:

$$\dot{m} = m \cdot P$$

$$\dot{m} = 1.12 \times 10^3 \frac{\text{Kg}}{\text{Botella}} \times 50 \frac{\text{Botella}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{min}}{60 \text{seg}}$$

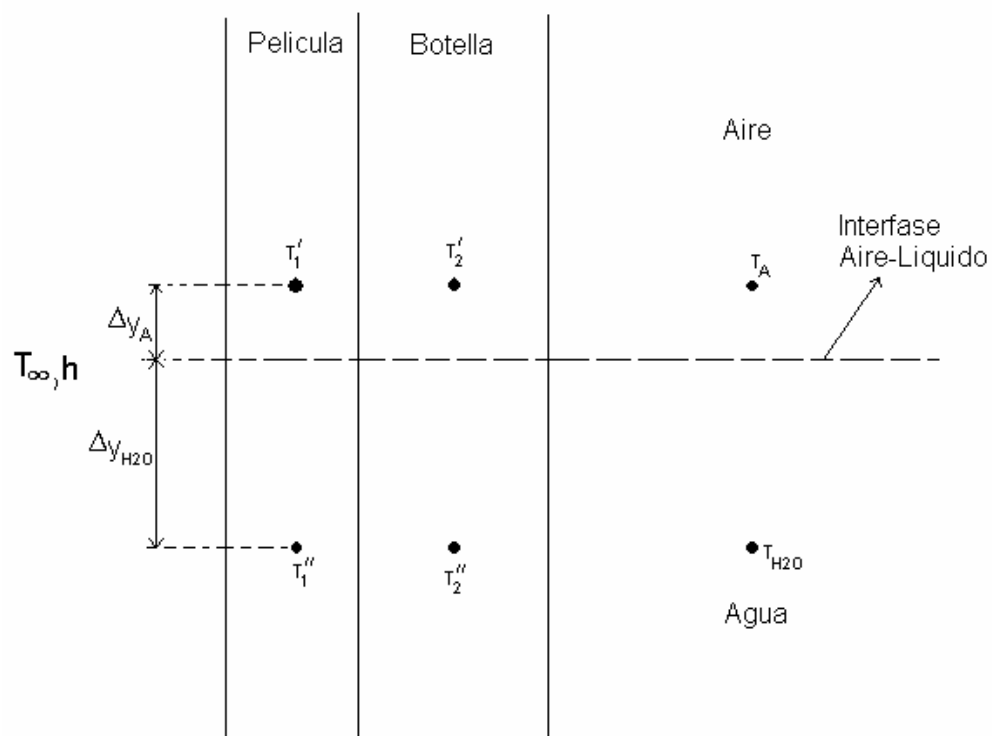
$$\dot{m} = 935 \times 10^{-6} \text{Kg/s de Aire}$$

Para determinar la temperatura de salida de cada componente de la carga se considerara un método de diferencias finitas. Para esto es necesaria una ecuación de conservación apropiada para cada punto nodal de temperatura desconocida (figura 4.1). El conjunto de ecuaciones resultantes se resuelve de manera simultánea para la temperatura en cada nodo.

El primer paso necesario para obtener las ecuaciones de temperatura nodal es aplicar la conservación de la energía a un volumen de control alrededor de la región nodal. Como la dirección real del flujo de calor (dentro o fuera del nodo) se desconoce, es conveniente formular el balance de energía suponiendo que todo el flujo de calor es hacia el nodo. Tal condición es, por supuesto, imposible, pero si las ecuaciones de flujo se expresan de manera congruente con esta suposición, se obtiene la forma correcta de la ecuación de diferencias finitas.

Debido a los espesores que tienen la película y la botella como aproximación válida se puede considerar el sistema bidimensional (figura 4.1). Se asumirá lo siguiente:

- Condiciones Transitorias con propiedades constantes
- No hay generación de energía
- Transferencia de Calor a la Carga por Radiación es despreciable



**FIGURA 4.1 CARGA: PELICULA, BOTELLA, AIRE Y AGUA**

Para deducir las mencionadas ecuaciones se partirá de una forma ecuación de balance de energía (ec 4.3):

$$Q_{alm} = Q_{ent} \quad \text{ec 4.3}$$

$$2\rho_1 P_1 \Delta y_A C \rho_1 \frac{(T_1^{l_{p+1}} - T_1^{lp})}{\Delta t_1'} = 2P_1 \Delta y_A \frac{(T_\infty - T_1^{lp})}{R_{conv-cond}} + 2P_1 \Delta y_A \frac{(T_2^{lp} - T_1^{lp})}{R_{1-2}} + P_1 \Delta x_1 \frac{(T_1^{lp} - T_1^{lp})}{\frac{\Delta y_A + \Delta y_{H_2O}}{k_1}}$$

Al simplificar y despejar se obtiene la ecuación de la temperatura  $T_1^{p+1}$  que es:

$$T_1^{l_{p+1}} = \left[ \frac{T_\infty}{R_{conv-cond}} + \frac{T_2^{lp}}{R_{1-2}} \right] \frac{Fo_1' \Delta x_1}{k_1} + \frac{Fo_1' \Delta x_1^2 T_1^{lp}}{2\Delta y_A (\Delta y_A + \Delta y_{H_2O})} + \left\{ 1 - Fo_1' \left[ \frac{\Delta x_1^2}{2\Delta y_A (\Delta y_A + \Delta y_{H_2O})} + \frac{\Delta x_1}{k_1} \left( \frac{1}{R_{conv-cond}} + \frac{1}{R_{1-2}} \right) \right] \right\} T_1^{lp}$$

ec. 4.4

En un problema transitorio, la solución para las temperaturas nodales debe aproximarse de forma continua a los valores finales al aumentar el tiempo. Sin embargo, con este método, la solución se caracteriza por oscilaciones numéricamente inducidas, que son físicamente imposibles. Las oscilaciones se vuelven inestables, lo que ocasiona que la solución difiera de las condiciones finales reales. Para evitar estos resultados erróneos, el valor establecido de  $\Delta t$  debe mantenerse por debajo de cierto límite. Esta dependencia se denomina criterio de estabilidad. El criterio se determina

requiriendo que el coeficiente asociado con el nodo de interés en el tiempo anterior sea mayor o igual a cero. Esto se hace reuniendo todos los términos que incluyen  $T_{m,n}^p$  para obtener la forma del coeficiente. Este resultado sirve entonces para obtener una relación límite del cual se determina el máximo valor permisible de  $\Delta t$ . A continuación se determinara este incremento de tiempo permisible:

$$1 - Fo_1' \left[ \frac{\Delta x_1^2}{2\Delta y_A (\Delta y_A + \Delta y_{H_2O})} + \frac{\Delta x_1}{k_1} \left( \frac{1}{R_{conv-cond}} + \frac{1}{R_{1-2}} \right) \right] \geq 0$$

$$Fo_1' \leq \frac{1}{\frac{\Delta x_1^2}{2\Delta y_A (\Delta y_A + \Delta y_{H_2O})} + \frac{\Delta x_1}{k_1} \left( \frac{1}{R_{conv-cond}} + \frac{1}{R_{1-2}} \right)}$$

$$Fo_1' = \frac{\Delta t_1' k_1}{\rho_1 C p_1 \Delta x_1^2} \quad \text{ec. 4.5}$$

Reemplazando y despejando se obtiene:

$$\Delta t_1' \leq \frac{\rho_1 C p_1 \Delta x_1^2 / k_1}{\frac{\Delta x_1^2}{2\Delta y_A (\Delta y_A + \Delta y_{H_2O})} + \frac{\Delta x_1}{k_1} \left( \frac{1}{R_{conv-cond}} + \frac{1}{R_{1-2}} \right)} \quad \text{ec. 4.6}$$

De manera similar se hace lo mismo con el resto de temperaturas nodales:



$$T_1^{lp+1} = \left[ \frac{T_\infty}{R_{conv-cond}} + \frac{T_2^{lp}}{R_{1-2}} \right] \frac{Fo_1' \Delta x_1}{k_1} + \frac{Fo_1' \Delta x_1^2 T_1^{lp}}{2\Delta y_{H_2O} (\Delta y_A + \Delta y_{H_2O})} + \left\{ 1 - Fo_1'' \left[ \frac{\Delta x_1^2}{2\Delta y_{H_2O} (\Delta y_A + \Delta y_{H_2O})} + \frac{\Delta x_1}{k_1} \left( \frac{1}{R_{conv-cond}} + \frac{1}{R_{1-2}} \right) \right] \right\} T_1^{lp}$$

ec. 4.7

$$Fo_1'' = \frac{\Delta t_1'' k_1}{\rho_1 C p_1 \Delta x_1^2} \quad \text{ec. 4.8}$$

$$\Delta t_1'' \leq \frac{\rho_1 C p_1 \Delta x_1^2 / k_1}{\frac{\Delta x_1^2}{2\Delta y_{H_2O} (\Delta y_A + \Delta y_{H_2O})} + \frac{\Delta x_1}{k_1} \left( \frac{1}{R_{conv-cond}} + \frac{1}{R_{1-2}} \right)} \quad \text{ec. 4.9}$$

$$T_2^{lp+1} = \left[ \frac{T_1^{lp}}{R_{1-2}} + \frac{T_A^p}{R_{2-A}} \right] \frac{Fo_2' \Delta x_2}{k_2} + \frac{Fo_2' \Delta x_2^2 T_2^{lp}}{2\Delta y_A (\Delta y_A + \Delta y_{H_2O})} + \left\{ 1 - Fo_2'' \left[ \frac{\Delta x_2^2}{2\Delta y_A (\Delta y_A + \Delta y_{H_2O})} + \frac{\Delta x_2}{k_2} \left( \frac{1}{R_{1-2}} + \frac{1}{R_{2-A}} \right) \right] \right\} T_2^{lp}$$

ec.4.10

$$Fo_2'' = \frac{\Delta t_2'' k_2}{\rho_2 C p_2 \Delta x_2^2} \quad \text{ec.4.11}$$

$$\Delta t_2' \leq \frac{\rho_2 C p_2 \Delta x_2^2 / k_2}{\frac{\Delta x_2^2}{2\Delta y_A (\Delta y_A + \Delta y_{H_2O})} + \frac{\Delta x_2}{k_2} \left( \frac{1}{R_{1-2}} + \frac{1}{R_{2-A}} \right)} \quad \text{ec.4.12}$$

$$T_2^{lp+1} = \left[ \frac{T_1^{lp}}{R_{1-2}} + \frac{T_{H_2O}^p}{R_{2-H_2O}} \right] \frac{Fo_2'' \Delta x_2}{k_2} + \frac{Fo_2'' \Delta x_2^2 T_2^{lp}}{2\Delta y_{H_2O} (\Delta y_A + \Delta y_{H_2O})} + \left\{ 1 - Fo_2'' \left[ \frac{\Delta x_2^2}{2\Delta y_{H_2O} (\Delta y_A + \Delta y_{H_2O})} + \frac{\Delta x_2}{k_2} \left( \frac{1}{R_{1-2}} + \frac{1}{R_{2-H_2O}} \right) \right] \right\} T_2^{lp}$$

ec.4.13

$$Fo_2'' = \frac{\Delta t_2'' k_2}{\rho_2 C p_2 \Delta x_2^2} \quad \text{ec.4.14}$$

$$\Delta t_2'' \leq \frac{\rho_2 C p_2 \Delta x_2^2 / k_2}{\frac{\Delta x_2^2}{2\Delta y_{H_2O} (\Delta y_A + \Delta y_{H_2O})} + \frac{\Delta x_2}{k_2} \left( \frac{1}{R_{1-2}} + \frac{1}{R_{2-H_2O}} \right)} \quad \text{ec.4.15}$$

$$T_A^{p+1} = \left[ \frac{4T_2^{lp}}{R_{2-A}} + \frac{T_{H_2O}^p D}{2R_{H_2O-A} \Delta y_A} \right] \frac{Fo_A D}{k_A} + \left\{ 1 - \left[ \frac{Fo_A D}{k_A} \left( \frac{4}{R_{2-A}} + \frac{D}{2R_{H_2O-A} \Delta y_A} \right) \right] \right\} T_A^p \quad \text{ec.4.16}$$

$$Fo_A = \frac{\Delta t_A k_A}{\rho_A C p_A D^2} \quad \text{ec.4.17}$$

$$\Delta t_A \leq \frac{\rho_A C p_A}{4 + \frac{1}{R_{2-A} D + 2R_{H_2O-A} \Delta y_A}} \quad \text{ec.4.18}$$

$$T_{H_2O}^{p+1} = \left[ \frac{4T_2^{lp}}{R_{2-H_2O}} + \frac{T_A^p D}{2R_{H_2O-A} \Delta y_{H_2O}} \right] \frac{Fo_{H_2O} D}{k_{H_2O}} + \left\{ 1 - \left[ \frac{Fo_{H_2O} D}{k_{H_2O}} \left( \frac{4}{R_{2-A}} + \frac{D}{2R_{H_2O-A} \Delta y_{H_2O}} \right) \right] \right\} T_{H_2O}^p \quad \text{ec.4.19}$$

$$Fo_{H_2O} = \frac{\Delta t_{H_2O} k_{H_2O}}{\rho_{H_2O} C p_{H_2O} D^2} \quad \text{ec.4.20}$$

$$\Delta t_{H_2O} \leq \frac{\rho_{H_2O} C p_{H_2O}}{4 + \frac{1}{R_{2-H_2O} D + 2R_{H_2O-A} \Delta y_{H_2O}}} \quad \text{ec.4.21}$$

Donde:

$$R_{conv-cond} = \frac{1}{h} + \frac{\Delta x_1}{2k_1}$$

$$R_{1-2} = \frac{\Delta x_1}{2k_1} + \frac{\Delta x_2}{2k_2}$$

$$R_{2-A} = \frac{\Delta x_2}{2k_2} + \frac{D}{2k_A}$$

$$R_{2-H_2O} = \frac{\Delta x_2}{2k_2} + \frac{D}{2k_{H_2O}}$$

$$R_{A-H_2O} = \frac{\Delta y_A}{k_A} + \frac{\Delta y_{H_2O}}{k_{H_2O}}$$

$$H_{AIRE} = 0.08 \text{ m}; H_{H_2O} = 0.29 \text{ m}$$

$$\Delta y_A = \frac{H_{AIRE}}{2} = \frac{0.08\text{m}}{2} = 0.04\text{m}$$

$$\Delta y_{H_2O} = \frac{H_{H_2O}}{2} = \frac{0.29\text{m}}{2} = 0.145\text{m}$$

$$\Delta x_1 = \text{Espesor de Película} = 50 \text{ micras} = 0.00005 \text{ m}$$

$$\Delta x_2 = \text{Espesor de Botella} = 0.4 \text{ mm} = 0.0004 \text{ m}$$

**TABLA 2**

**PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DE COMPONENTES DE LA CARGA**

	Cp[J/kg K]	K[W/m K]	ρ[kg/m <sup>3</sup> ]	Apéndice
Película(1)	1210	0.16	1350	A
Botella(2)@46° C	1250	0.21	1410	B
Agua(H <sub>2</sub> O)@300 K	4179	0.613	997	C
Aire(A)@300 K	1007	2.63x10 <sup>-2</sup>	1.1614	D

En la tabla 2 se detalla las propiedades de cada elemento de la carga. Del apéndice C se toma las propiedades que corresponden al líquido saturado (propiedades con subíndice f) que aunque no es el estado en el que se encuentra el agua aun

así el uso de estas propiedades da resultados bastante cercanos a la realidad.

A continuación se procede al calcular el coeficiente de convección ( $h$ ). La convección se clasifica de acuerdo con la naturaleza del flujo de aire que ocasiona la transferencia de calor por este medio. Hablamos de *convección forzada* cuando el flujo es causado por medios externos como un ventilador, o vientos atmosféricos. En cambio, en la *convección libre* (o natural) el flujo es inducido por fuerzas de empuje que surgen a partir de diferencias de densidad ocasionadas por variaciones de temperatura en el fluido. En esta tesis se asumirá convección es libre, en la tabla 3 se tiene valores de transferencia como se puede observar el coeficiente debe estar entre  $2-25 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ .

**TABLA 3**  
**VALORES TÍPICOS DE COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN**

Proceso	h(W/m <sup>2</sup> K)
Convección Libre	
Gases	2-25
Líquidos	50-1000
Convección Forzada	
Gases	25-250
Líquidos	50-20000
Convección en cambio de fase (Ebullición o Condensación)	2500-100000

Para esto se asumirá que las botellas son cilindros perfectos de 370 mm de alto y 124 mm de diámetro. Para el siguiente valor se saca a la temperatura pelicular:

$$T_f = \frac{T_\infty + T_{promedio}}{2} = \frac{T_\infty + \frac{T_s + T_e}{2}}{2}$$

En este punto es necesario escoger la temperatura del aire ( $T_\infty$ ) necesaria para los cálculos, esta debe hacer posible que en 25 seg llegue a 65°C. Asumiremos esta temperatura y luego

de ser necesario se la ajustara para cumpla con el objetivo deseado.

$$T_e = 27^\circ\text{C}$$

$$T_s = 65^\circ\text{C}$$

$$T_\infty = 227^\circ\text{C}$$

$$T_f = \frac{227 + \frac{65 + 27}{2}}{2} = 136.5^\circ\text{C} \quad (409.5^\circ\text{K})$$

Con este valor se va al apéndice D y se obtiene las propiedades necesarias a la temperatura pelicular ( $T_f$ ):

$$\text{Pr} = 0,69$$

$$K = 3,38 \times 10^{-2} \text{ W/m K}$$

$$\nu = 2.64 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{seg}$$

Con estos valores se obtiene el numero de Rayleigh ( $Ra_L$ ) el cual a su vez es necesario para calcular el numero Nusselt( $Nu_L$ ):

$$Ra_L = Gr_L \text{Pr} = \frac{g(T_s - T_\infty)L^3 \text{Pr}}{T_f \nu^2} \quad \text{ec. 4.22}$$

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{\left[ 1 + (0.492/\text{Pr})^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad \text{ec. 4.23}$$

Donde:

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$L = \text{Altura de la botella} = 0.37 \text{ m}$$

Para que la ec. 4.22 y 4.23 se la pueda usar en cilindro vertical deben cumplir la siguiente condición:

$$\frac{D}{L} \geq \frac{35}{\left(Ra_L / Pr\right)^{1/4}} \quad \text{ec. 4.24}$$

Entonces lo primero que debe hacerse es calcular el número Rayleigh con la ec 4.22:

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{9.8 \left( 227^\circ\text{C} - \frac{65^\circ\text{C} + 27^\circ\text{C}}{2} \right) (0.37\text{m})^3 \times 0.69}{409.5\text{K} \left( 2.64 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right)^2} = 217 \times 10^6$$

$$D = 0.124 \text{ m}$$

$$L = 0.37 \text{ m}$$

Este valor se utiliza para determinar si la condición de la ec. 4.24 cumple

$$\frac{D}{L} \geq \frac{35}{\left( 217 \times 10^6 / 0.69 \right)^{1/4}} = 0.262$$

$$\frac{D}{L} = \frac{0.124\text{m}}{0.37\text{m}} = 0.335$$

Como se observa la condición si se cumple con lo que se puede usar las ec. 4.22 y 4.23. Ahora se reemplazan valores en la ec. 4.23:

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.387(217 \times 10^6)^{1/6}}{\left[ 1 + (0.492/0.69)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 = 76.75$$



$$\bar{h} = \overline{Nu}_L \frac{k}{L} \quad \text{ec. 4.25}$$

$$\bar{h} = 76.75 \frac{2.815 \times 10^{-2} \frac{W}{mK}}{0.37m} = 7.01 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

El próximo paso será determinar el  $\Delta t$  que se va a usar; ya que existen varios criterios de estabilidad (ec. 4.6, 4.9, 4.12, 4.15, 4.18, 4.21) debe escogerse un tiempo que se satisfaga a todos.

$$R_{conv-cond} = \frac{1}{7.01} + \frac{5 \times 10^{-5}}{2 \times 0.16} = 0.143 \text{ K/W}$$

$$R_{1-2} = \frac{5 \times 10^{-5}}{2 \times 0.16} + \frac{4 \times 10^{-4}}{2 \times 0.21} = 1.11 \times 10^{-3} \text{ K/W}$$

$$R_{2-A} = \frac{4 \times 10^{-4}}{2 \times 0.21} + \frac{0.124}{2 \times (2.63 \times 10^{-2})} = 2.36 \text{ K/W}$$

$$R_{2-H_2O} = \frac{4 \times 10^{-4}}{2 \times 0.21} + \frac{0.124}{2 \times (0.613)} = 0.1 \text{ K/W}$$

$$R_{H_2O-A} = \frac{0.04}{2.63 \times 10^{-2}} + \frac{0.145}{0.613} = 1.76$$

$$\Delta t_1' \leq \frac{1350 \times 1210 \times (5 \times 10^{-5})^2 / 0.16}{\frac{(5 \times 10^{-5})^2}{2 \times 0.04(0.04 + 0.145)} + \frac{5 \times 10^{-5}}{0.16} \left( \frac{1}{0.143} + \frac{1}{1.11 \times 10^{-3}} \right)}$$

$$\Delta t_1' \leq 0,0899608981 \text{ seg}$$

$$\Delta t_1'' \leq \frac{1350 \times 1210 \times (5 \times 10^{-5})^2 / 0.16}{\frac{(5 \times 10^{-5})^2}{2 \times 0.145(0.04 + 0.145)} + \frac{5 \times 10^{-5}}{0.16} \left( \frac{1}{0.143} + \frac{1}{1.11 \times 10^{-3}} \right)}$$

$$\Delta t_1'' \leq 0,0899609369 \text{ seg}$$

$$\Delta t_2' \leq \frac{1410 \times 1250 (4 \times 10^{-4})^2 / 0.21}{\frac{(4 \times 10^{-4})^2}{2 \times 0.04(0.04 + 0.145)} + \frac{4 \times 10^{-4}}{0.21} \left( \frac{1}{1.11 \times 10^{-3}} + \frac{1}{2.36} \right)}$$

$$\Delta t_2' \leq 0.782177 \text{ seg}$$

$$\Delta t_2'' \leq \frac{1410 \times 1250 (4 \times 10^{-4})^2 / 0.21}{\frac{(4 \times 10^{-4})^2}{2 \times 0.145(0.04 + 0.145)} + \frac{4 \times 10^{-4}}{0.21} \left( \frac{1}{1.11 \times 10^{-3}} + \frac{1}{0.1} \right)}$$

$$\Delta t_2'' \leq 0.78218 \text{ seg}$$

$$\Delta t_A \leq \frac{1.1614 \times 1007}{\frac{4}{2.36 \times 0.124} + \frac{1}{2 \times 1.76 \times 0.04}}$$

$$\Delta t_A \leq 56.3 \text{ seg}$$

$$\Delta t_{H_2O} \leq \frac{997 \times 4179}{\frac{4}{0.1 \times 0.124} + \frac{1}{2 \times 1.76 \times 0.145}}$$

$$\Delta t_{H_2O} \leq 317.92 \text{ seg}$$

Con los valores numéricos de los criterios de estabilidad se puede escoger un apropiado  $\Delta t$  el cual será de 0.0889 seg. Procederemos a obtener los valores de los números de Fourier (ec. 4.5, 4.8, 4.11, 4.14, 4.17, 4.20).

$$Fo_1' = Fo_1'' = \frac{0.0887 \times 0.16}{1350 \times 1210 \times (5 \times 10^{-5})^2} = 3.47$$

El que los números de Fourier  $Fo_1'$  y  $Fo_1''$  tengan el mismo valor se debe a que lo único que los hacía diferentes era el incremento de tiempo ahora que se ha escogido un cambio común se vuelven iguales lo mismo pasará con  $Fo_2'$  y  $Fo_2''$ .

$$Fo_2' = Fo_2'' = \frac{0.0887 \times 0.21}{1410 \times 1250 \times (4 \times 10^{-4})^2} = 6.6 \times 10^{-2}$$

$$Fo_A = \frac{0.0887 \times 2.63 \times 10^{-2}}{1.1614 \times 1007 \times (0.124^2)} = 1.3 \times 10^{-4}$$

$$Fo_{H_2O} = \frac{0.0887 \times 0.613}{997 \times 4179 \times (0.124^2)} = 8.49 \times 10^{-7}$$

Estos valores se los va a reemplazar en las ecuaciones de temperatura nodal (ec. 4.4, 4.7, 4.10, 4.13, 4.16, 4.19), así se obtendrá la distribución de temperatura de la carga.

$$T_1^{lp+1} = \left[ \frac{227}{0.14} + \frac{T_2^{lp}}{1.11 \times 10^{-3}} \right] \frac{3.47 \times (5 \times 10^{-5})}{0.16} + \frac{3.47 \times (5 \times 10^{-5})^2 T_1^{lp}}{2 \times 0.04(0.04 + 0.145)} + \left\{ 1 - 3.47 \left[ \frac{(5 \times 10^{-5})^2}{2 \times 0.04(0.04 + 0.145)} + \frac{5 \times 10^{-5}}{0.16} \left( \frac{1}{0.14} + \frac{1}{1.11 \times 10^{-3}} \right) \right] \right\} T_1^{lp}$$

$$T_1^{llp+1} = \left[ \frac{227}{0.14} + \frac{T_2^{llp}}{1.11 \times 10^{-3}} \right] \frac{3.47 \times (5 \times 10^{-5})}{0.16} + \frac{3.47 \times (5 \times 10^{-5})^2 T_1^{llp}}{2 \times 0.145(0.04 + 0.145)} + \left\{ 1 - 3.47 \left[ \frac{(5 \times 10^{-5})^2}{2 \times 0.145(0.04 + 0.145)} + \frac{5 \times 10^{-5}}{0.16} \left( \frac{1}{0.14} + \frac{1}{1.11 \times 10^{-3}} \right) \right] \right\} T_1^{llp}$$

$$T_2^{lp+1} = \left[ \frac{T_1^{lp}}{1.11 \times 10^{-3}} + \frac{T_A^p}{2.36} \right] \frac{(6.6 \times 10^{-2})(4 \times 10^{-4})}{0.21} + \frac{(6.6 \times 10^{-2})(4 \times 10^{-4})^2 T_2^{lp}}{2 \times 0.04(0.04 + 0.145)} + \left\{ 1 - (6.6 \times 10^{-2}) \left[ \frac{(4 \times 10^{-4})^2}{2 \times 0.04(0.04 + 0.145)} + \frac{4 \times 10^{-4}}{0.21} \left( \frac{1}{1.11 \times 10^{-3}} + \frac{1}{2.36} \right) \right] \right\} T_2^{lp}$$

$$T_2^{llp+1} = \left[ \frac{T_1^{llp}}{1.11 \times 10^{-3}} + \frac{T_{H_2O}^p}{0.1} \right] \frac{(6.6 \times 10^{-2})(4 \times 10^{-4})}{0.21} + \frac{(6.6 \times 10^{-2})(4 \times 10^{-4})^2 T_2^{llp}}{2 \times 0.145(0.04 + 0.145)} + \left\{ 1 - (6.6 \times 10^{-2}) \left[ \frac{(4 \times 10^{-4})^2}{2 \times 0.145(0.04 + 0.145)} + \frac{4 \times 10^{-4}}{0.21} \left( \frac{1}{1.11 \times 10^{-3}} + \frac{1}{0.1} \right) \right] \right\} T_2^{llp}$$

$$T_{H_2O}^{p+1} = \left[ \frac{4T_2^{lp}}{R_{2-H_2O}} + \frac{T_A^p D}{2R_{H_2O-A} \Delta y_{H_2O}} \right] \frac{Fo_{H_2O} D}{k_{H_2O}} + \left\{ 1 - \left[ \frac{Fo_{H_2O} D}{k_{H_2O}} \left( \frac{4}{R_{2-A}} + \frac{D}{2R_{H_2O-A} \Delta y_{H_2O}} \right) \right] \right\} T_{H_2O}^p$$

$$T_A^{p+1} = \left[ \frac{4T_2^{lp}}{2.36} + \frac{T_{H_2O}^p D}{2 \times 1.76 \times 0.04} \right] \frac{1.3 \times 10^{-4} \times 0.124}{2.63 \times 10^{-2}} + \left\{ 1 - \left[ \frac{1.3 \times 10^{-4} \times 0.124}{2.63 \times 10^{-2}} \left( \frac{4}{2.36} + \frac{0.124}{2 \times 1.76 \times 0.04} \right) \right] \right\} T_A^p$$

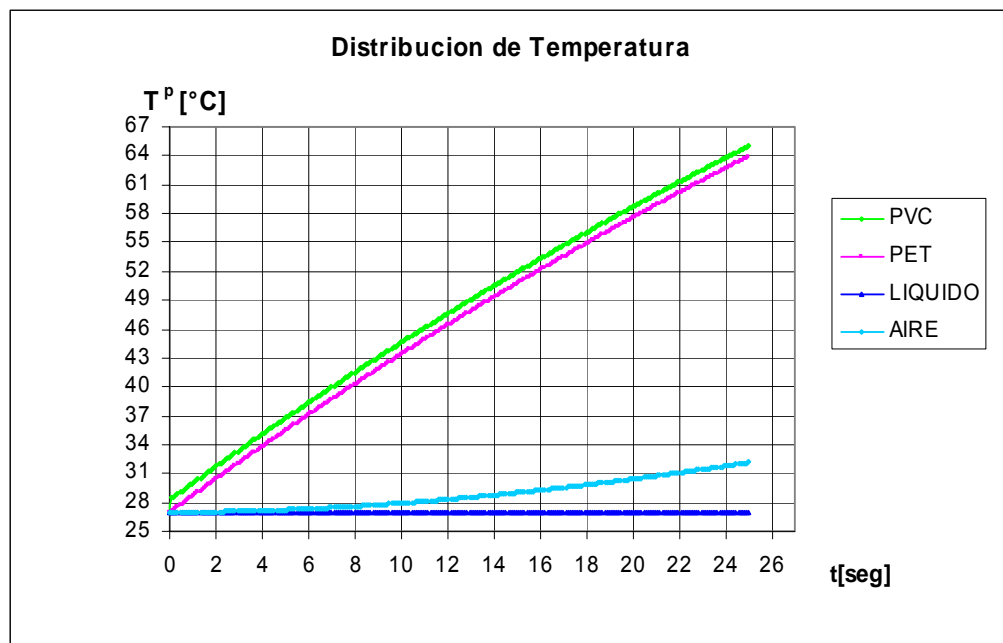
$$T_{H_2O}^{p+1} = \left[ \frac{4T_2^{llp}}{0.1} + \frac{0.124 T_A^{llp}}{2 \times 1.76 \times 0.145} \right] \frac{(8.49 \times 10^{-7}) \times 0.124}{0.613} + \left\{ 1 - \left[ \frac{(8.49 \times 10^{-7}) \times 0.124}{0.613} \left( \frac{4}{2.36} + \frac{0.124}{2 \times 1.76 \times 0.145} \right) \right] \right\} T_{H_2O}^{llp}$$

Como se puede observar en el apéndice E las temperaturas nodales  $T_1^{/p+1}$  y  $T_1^{//p+1}$  son parecidas, así la temperatura de la película de PVC se la puede considerar como un promedio de las temperaturas nodales, el mismo criterio se puede usar con  $T_2^{/p+1}$  y  $T_2^{//p+1}$  ya que también son similares.

$$T_{PVC}^p = \frac{T_1^{/p} + T_1^{//p}}{2}$$

$$T_{BOTELLA}^p = \frac{T_2^{/p} + T_2^{//p}}{2}$$

En la figura 4.2 se tiene una mejor idea de la variación de temperatura de la carga.



**FIGURA 4.2 DISTRIBUCION DE TEMPERATURA DE CARGA**

Del apéndice E se puede observar que efectivamente que la temperatura del aire que se estaba asumiendo es la apropiada

para alcanzar la temperatura en el tiempo deseado. Del mismo apéndice se obtiene la temperatura final de todos los elementos que conforman la carga.

$$T_{S-Película} = 65^{\circ}\text{C}$$

$$T_{S-Botella} = 63.85^{\circ}\text{C}$$

$$T_{S-Aire} = 32.15^{\circ}\text{C}$$

$$T_{S-Agua} = 27.04^{\circ}\text{C}$$

Finalmente se procederá a calcular el requerimiento de calor con la ec. 4.2:

$$Q_{Película} = \left( 8.11 \times 10^{-3} \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right) 1210 \frac{\text{J}}{\text{KgK}} (65^{\circ}\text{C} - 27^{\circ}\text{C}) = 372.9 \text{ W}$$

$$Q_{Botella} = \left( 67.75 \times 10^{-3} \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right) 1250 \frac{\text{J}}{\text{KgK}} (63.85^{\circ}\text{C} - 27^{\circ}\text{C}) = 3120.73 \text{ W}$$

$$Q_{Aire} = \left( 935 \times 10^{-6} \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right) 1007 \frac{\text{J}}{\text{KgK}} (32.15^{\circ}\text{C} - 27^{\circ}\text{C}) = 4.85 \text{ W}$$

$$Q_{Agua} = \left( 2.915 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right) 4179 \frac{\text{J}}{\text{KgK}} (27.035^{\circ}\text{C} - 27^{\circ}\text{C}) = 426.36 \text{ W}$$

Por tanto:

$$Q_{carga} = 372.9 + 3120.73 + 4.85 + 426.36 = 3924.84 \text{ W}$$

#### 4.1.2. Pérdidas por Paredes y por extremos del tunel

Para realizar el cálculo de las pérdidas por conducción se considerará lo siguiente:

- Estado Estable con propiedades constantes
- Conducción Unidimensional
- No hay generación de energía
- La transferencia de Calor por Radiación es despreciable

Como se puede apreciar en la figura 4.3 tanto las paredes como el techo del túnel estarán compuestas por:

- La caldería interior por una plancha de acero inoxidable AISI 304 de espesor 2 mm
- Aislamiento de fibra mineral con espesor de 80 mm
- La caldería exterior por una plancha de acero inoxidable AISI 304 de espesor 2mm



**FIGURA 4.3 PARED COMPUESTA**

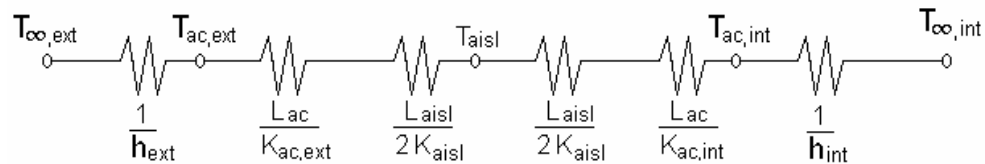
La temperatura en el exterior del túnel ( $T_{\infty,ext}$ ) será 27°C.

La principal característica del estado energético en que se encuentra la pared y el techo es que ya no almacena más energía. Aplicando el principio de conservación de la energía se tiene lo siguiente:

$$\dot{E}_{entra} = \dot{E}_{sale}$$

✓ Paredes

Ya que se conocen las temperaturas  $T_{\infty,ext}$  y  $T_{\infty,int}$ . En la figura 4.4 se tiene el circuito térmico equivalente de la pared compuesta.



**FIGURA 4.4 CIRCUITO TÉRMICO EQUIVALENTE DE PARED  
COMPUESTA**

$$Q_{pared}'' = \frac{T_{\infty,int} - T_{ac,ext}}{\frac{1}{h_{int}} + \frac{L_{ac}}{K_{ac,int}} + \frac{L_{aisl}}{K_{aisl}} + \frac{L_{ac}}{K_{ac,ext}}} = \frac{T_{ac,ext} - T_{\infty,ext}}{\frac{1}{h_{ext}}} \quad \text{ec. 4.26}$$

$$Q_{pared}'' = \frac{T_{ac,int} - T_{\infty,ext}}{\frac{L_{ac}}{K_{ac,int}} + \frac{L_{aisl}}{K_{aisl}} + \frac{L_{ac}}{K_{ac,ext}} + \frac{1}{h_{ext}}} = \frac{T_{\infty,int} - T_{ac,int}}{\frac{1}{h_{int}}} \quad \text{ec. 4.27}$$



$$Q_{pared}^{||} = \frac{T_{aisl} - T_{\infty,ext}}{\frac{L_{aisl}}{2K_{aisl}} + \frac{L_{ac}}{K_{ac,ext}} + \frac{1}{h_{ext}}} = \frac{T_{\infty,int} - T_{aisl}}{\frac{1}{h_{int}} + \frac{L_{ac}}{K_{ac,int}} + \frac{L_{aisl}}{2K_{aisl}}} \quad \text{ec. 4.28}$$

$$L_{ac} = 2 \text{ mm} = 2 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$L_{aisl} = 80 \text{ mm} = 80 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$T_{\infty,ext} = 27^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\infty,int} = 227^{\circ}\text{C}$$

Así que iniciaremos asumiendo las temperaturas de las capas que componen la pared del horno y luego haremos las correcciones de las propiedades que dependen de las temperaturas asumidas.

$$T_{ac,ext} = 50^{\circ}\text{C}$$

$$T_{ac,int} = 200^{\circ}\text{C}$$

$$T_{aisl} = \frac{T_{\infty,ext} + T_{\infty,int}}{2} = \frac{27 + 200}{2} = 113.5^{\circ}\text{C}$$

Con estas temperaturas asumidas se ira al apéndice F para la conductividad del acero y al H para del aislamiento.

$$K_{ac,int} = 18.20 \text{ W/m K @ } 500 \text{ K}$$

$$K_{ac,ext} = 14.9 \text{ W/m K @ } 300 \text{ K}$$

$$K_{aisl} = 0.042 \text{ W/m K @ } 338 \text{ K}$$

$$T_{f,int} = \frac{T_{ac,int} + T_{\infty,int}}{2} = \frac{200 + 227}{2} = 213.5^{\circ}\text{C (486.5 }^{\circ}\text{K)}$$

$$T_{f,ext} = \frac{T_{ac,ext} + T_{\infty,ext}}{2} = \frac{50 + 27}{2} = 38.5 \text{ °C (311.5 °K)}$$

**TABLA 4**

**PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DE AIRE CIRCUNDANTE  
A LAS PAREDES (VER APÉNDICE D)**

Temperatura [°K]	$\nu \times 10^6$ [m <sup>2</sup> /s]	$K \times 10^3$ [W/m °K]	Pr
300	15.89	26.3	0.707
475	35.59	39	0.685

$$Ra_L = \frac{g(T_{ac} - T_{\infty})L^3}{T_f \nu^2} Pr \quad \text{ec. 4.29}$$

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

L = Longitud característica = Alto de la Plancha = 0.4 m

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{\left[ 1 + (0.492/Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad \text{ec. 4.30}$$

$$\overline{h} = \overline{Nu}_L \frac{k}{L}$$

En el cálculo de coeficiente convectivo tanto para el interior de la pared como para el exterior se usan las ecuaciones 4.29, 4.30.

*Interior*

$$Ra_L = \frac{9.8 \text{ m/s}^2 (227\text{°C} - 200\text{°C})(0.4\text{m})^3}{486.5\text{K}(35.59 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})^2} 0.685 = 1.88 \times 10^7$$

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 \times (1.88 \times 10^7)^{1/6}}{\left[ 1 + (0.492 / 0.685)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 = 37.22$$

$$\bar{h} = 37.22 \frac{39 \times 10^{-3} \frac{W}{mK}}{0.4m} = 3.63 \text{ W/m}^2 \text{ K pared de acero dentro}$$

del horno

*Exterior*

$$Ra_L = \frac{9.8 \text{ m/s}^2 (50^\circ\text{C} - 27^\circ\text{C})(0.4\text{m})^3}{311.5\text{K}(15.89 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})^2} 0.707 = 1.3 \times 10^8$$

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 \times (1.3 \times 10^8)^{1/6}}{\left[ 1 + (0.492 / 0.707)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 = 66$$

$$\bar{h} = 66 \frac{26.3 \times 10^{-3} \frac{W}{mK}}{0.4m} = 4.34 \text{ W/m}^2 \text{ K pared de acero fuera del}$$

horno

Haciendo uso de las ecuaciones 4.26 a 4.28 se determinara las temperaturas de cada componente de la pared.

$$\frac{227 - T_{ac,ext}}{\frac{1}{3.63 \frac{W}{m^2K}} + \frac{2 \times 10^{-3} \text{ m}}{18.2 \frac{W}{mK}} + \frac{80 \times 10^{-3} \text{ m}}{0.051 \frac{W}{mK}} + \frac{2 \times 10^{-3} \text{ m}}{14.9 \frac{W}{mK}}} = \frac{T_{ac,ext} - 27}{4.34 \frac{W}{m^2K}}$$

$$\frac{T_{ac,int} - 27}{\frac{2 \times 10^{-3} \text{ m}}{18.2 \frac{W}{mK}} + \frac{80 \times 10^{-3} \text{ m}}{0.051 \frac{W}{mK}} + \frac{2 \times 10^{-3} \text{ m}}{14.9 \frac{W}{mK}} + \frac{1}{4.34 \frac{W}{m^2K}}} = \frac{227 - T_{ac,int}}{3.63 \frac{W}{m^2K}}$$

$$\frac{T_{aisl} - 27}{\frac{80 \times 10^{-3} m}{2 \times 0.051 \frac{W}{mK}} + \frac{2 \times 10^{-3} m}{14.9 \frac{W}{mK}} + \frac{1}{4.34 \frac{W}{m^2 K}}} = \frac{227 - T_{aisl}}{\frac{1}{3.63 \frac{W}{m^2 K}} + \frac{2 \times 10^{-3} m}{18.2 \frac{W}{mK}} + \frac{80 \times 10^{-3} m}{2 \times 0.051 \frac{W}{mK}}}$$

$$T_{ac,ext} = 49.21^\circ\text{C}$$

$$T_{ac,int} = 200.44^\circ\text{C}$$

$$T_{aisl} = 124.83^\circ\text{C}$$

Como se puede apreciar en los resultados las temperaturas asumidas fueron acertadas. Ahora se procederá a calcular el calor que se va por las paredes.

$$Q_{pared}'' = \frac{227 - 200.44}{1/3.63} = 96.41 \text{ W/m}^2$$

$$Q_{pared} = A_{tox} L \arg o x Q_{pared}'' = 0.4 m \times 1.604 m \times 96.41 \frac{W}{m^2}$$

$$Q_{pared} = 61.86 \text{ W}$$

#### ✓ Techo

El procedimiento que se aplica para en esta parte es el mismo que se aplico para la pared. Y se usa el mismo Circuito Térmico Equivalente que de la pared (figura 4.4). Lo único que cambia son las longitudes características y las ecuaciones de Nusselt (Nu).

$$L = \frac{As}{P} = \frac{Ancho \times L \arg o}{2(Ancho + L \arg o)} \quad \text{ec. 4.31}$$

As = Área Superficial del techo

P = Perímetro del techo

$$\overline{Nu}_L = 0.54 Ra_L^{1/4} \quad \text{ec. 4.32}$$

Se asumirá las temperaturas del acero:

$$T_{ac,ext} = 50 \text{ °C}$$

$$T_{ac,int} = 200 \text{ °C}$$

$$T_{f,int} = \frac{T_{ac,int} + T_{\infty,int}}{2} = \frac{227 + 0}{2} = 213.5 \text{ °C (486.5 °K)}$$

$$T_{f,ext} = \frac{T_{ac,ext} + T_{\infty,ext}}{2} = \frac{50 + 27}{2} = 38.5 \text{ °C (311.5 °K)}$$

Ya que las temperaturas asumidas son similares a las de la pared se tomara los mismos valores para las propiedades de conductividad de las capas de la pared y del aire circundante.

*Interior*

$$L = \frac{0.425 m \times 1.604 m}{2(0.425 m + 1.604 m)} = 0.168 \text{ m}$$

$$Ra_L = \frac{9.8 m/s^2 (227 \text{ °C} - 200 \text{ °C})(0.168 m)^3}{486.5 K (35.59 \times 10^{-6} m^2/s)^2} 0.685 = 1.39 \times 10^6$$

$$\overline{Nu}_L = 0.54 (1.39 \times 10^6)^{1/4} = 18.54$$

$$\bar{h} = 18.54 \frac{39 \times 10^{-3} \frac{W}{mK}}{0.168 m} = 4.3 \text{ W/m}^2 \text{ °K}$$

*Exterior*

La longitud característica es la misma que la del interior 0.14 m.

$$Ra_L = \frac{9.8 \text{ m/s}^2 (50^\circ\text{C} - 27^\circ\text{C})(0.168 \text{ m})^3}{311.5 \text{ K}(15.89 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})^2} 0.707 = 9.6 \times 10^6$$

$$\overline{Nu}_L = 0.54(9.6 \times 10^6)^{1/4} = 30$$

$$\overline{h} = 30 \frac{26.3 \times 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{mK}}}{0.168 \text{ m}} = 4.69 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$$

Al usar nuevamente las ecuaciones 4.26 a 4.28 se determinara las temperaturas de cada componente del techo.

$$\frac{227 - T_{ac,ext}}{\frac{1}{4.3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}} + \frac{2 \times 10^{-3} \text{ m}}{18.2 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{80 \times 10^{-3} \text{ m}}{0.051 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{2 \times 10^{-3} \text{ m}}{14.9 \frac{\text{W}}{\text{mK}}}} = \frac{T_{ac,ext} - 27}{\frac{1}{4.69 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}}}$$

$$\frac{T_{ac,int} - 27}{\frac{2 \times 10^{-3} \text{ m}}{14.9 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{80 \times 10^{-3} \text{ m}}{0.051 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{2 \times 10^{-3} \text{ m}}{18.2 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{1}{4.69 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}}} = \frac{227 - T_{ac,int}}{\frac{1}{4.3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}}}$$

$$\frac{T_{aisl} - 27}{\frac{80 \times 10^{-3} \text{ m}}{2 \times 0.051 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{2 \times 10^{-3} \text{ m}}{14.9 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{1}{4.69 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}}} = \frac{227 - T_{aisl}}{\frac{1}{4.3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}} + \frac{2 \times 10^{-3} \text{ m}}{18.2 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{80 \times 10^{-3} \text{ m}}{2 \times 0.051 \frac{\text{W}}{\text{mK}}}}$$

$$T_{ac,ext} = 48.17^\circ\text{C}$$

$$T_{ac,int} = 203.91^\circ\text{C}$$

$$T_{aisl} = 126.04^\circ\text{C}$$

Ahora que se tienen las temperaturas es posible calcular el calor que se va por el techo.

$$Q''_{techo} = \frac{48.17 - 27}{\frac{1}{4.69 \frac{W}{m^2 K}}} = 99.29 \text{ W/m}^2$$

$$Q_{techo} = Ancho \times L \times Q''_{techo} = 0.425 \text{ m} \times 1.604 \text{ m} \times 99.29 \frac{W}{m^2}$$

$$Q_{techo} = 67.66 \text{ W}$$

✓ Cadena Transportadora

A diferencia de la pared y el techo la cadena nunca llega al equilibrio ya que permanentemente esta entrando y saliendo del horno, fuera del recinto la cinta transportadora se enfría y vuelve a su estado energético inicial en consecuencia si almacena energía; para luego entregarla cuando esta fuera del horno. Pero esta variación de energía (entrada y salida de cadena) es tan poca que para calcularla asumiremos condiciones similares a las del techo y que toda la cadena esta a una misma temperatura esta se igualara con la ecuación de transferencia de calor por conveccion de la siguiente manera.

$$Q'' = Q''_{dentro} = Q''_{fuera}$$

$$(2\bar{h}_{ext-inf-banda} + \bar{h}_{ext-sup-banda})(T_{\infty,ext} - T_{banda}) = \bar{h}_{int-banda}(T_{\infty,int} - T_{banda})$$

ec. 4.33

La ecuación de transferencia de calor para la banda (ec. 4.33) es así debido a que durante el acarreo de la cadena (cuando la banda lleva la carga) solo una superficie esta recibiendo calor del aire dentro del horno, la parte superior de la misma; que corresponde al lado derecho de la igualdad y durante el retorno son tres: la inferior del acarreo y la superior e inferior del retorno; que es el lado izquierdo de la igualdad

$$T_{f,int} = \frac{T_{\infty,int} + T_{banda}}{2} = \frac{227 + 80}{2} = 153.5 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (426.5 } ^\circ\text{K)}$$

$$T_{f,ext} = \frac{T_{\infty,ext} + T_{banda}}{2} = \frac{27 + 80}{2} = 53.5 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (326.5 } ^\circ\text{K)}$$

Ya que las temperaturas son similares a las de las paredes usaremos las propiedades que están en la tabla 4. Para el cálculo de los coeficientes convectivo interior se hará uso de las ec. 4.29, 4.31, 4.32.

$$L = \frac{As}{P} = \frac{Ancho \times L \text{ arg o}}{2(Ancho + L \text{ arg o})}$$

El ancho que se considerará en este calculo es el del túnel menos las líneas de combustible que están a los lados de la cadena cada línea tiene un diámetro de 13.7 mm el calculo de este diámetro se lo explicara en detalle mas adelante.

$$Ancho = 0.425 - (2 \times 13.7 \times 10^{-3}) = 0.3976 \text{ m} \approx 0.4 \text{ m}$$

$$L = \frac{As}{P} = \frac{0.4 \times 1.604}{2(0.4 + 1.604)} = 0.160 \text{ m}$$



$$Ra_L = \frac{9.8 \text{ m/s}^2 (227^\circ\text{C} - 80^\circ\text{C})(0.160 \text{ m})^3}{426.5 \text{ K} (29.4 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})^2} 0.688 = 11 \times 10^6$$

El coeficiente de convección (h) se lo calculará con la ecuación 4.25.

$$\overline{Nu}_L = 0.27(11 \times 10^6)^{1/4} = 15.55$$

$$\overline{h}_{\text{int-banda}} = 15.55 \frac{35.55 \times 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{mK}}}{0.16 \text{ m}} = 3.46 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

El mismo cálculo se hará para la superficie exterior al horno donde lo que cambia es la temperatura  $T_\infty$ , por ende las propiedades termodinámicas.

$$Ra_L = \frac{9.8 \text{ m/s}^2 (80^\circ\text{C} - 27^\circ\text{C})(0.16 \text{ m})^3}{326.5 \text{ K} (18.405 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})^2} 0.7035 = 13.53 \times 10^6$$

En este punto  $\overline{h}_{\text{ext-inf-banda}}$  y  $\overline{h}_{\text{ext-sup-banda}}$  de la cadena de retorno se rigen por ecuaciones de  $\overline{Nu}_L$  diferentes: la superficie superior por la ec 3.32 y la inferior por la ec. 3.34.

$$\overline{Nu}_L = 0.27(13.53 \times 10^6)^{1/4} = 16.38$$

$$\overline{h}_{\text{ext-inf-banda}} = 16.38 \frac{28.15 \times 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{mK}}}{0.16 \text{ m}} = 2.88 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$\overline{Nu}_L = 0.54(13.53 \times 10^6)^{1/4} = 32.75$$

$$\overline{h}_{\text{ext-sup-banda}} = 32.75 \frac{28.15 \times 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{mK}}}{0.16 \text{ m}} = 5.76 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$$

Ahora se procederá a reemplazar los valores en la ecuación 4.33 para obtener la temperatura de salida ( $T_{\text{banda}}$ ) de la cadena.

$$(2 \times 2.88 + 5.76)(T_{\text{banda}} - 27) = 3.46(227 - T_{\text{banda}})$$

$$T_{\text{banda}} = 73.19 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Teniendo esta temperatura se calculara el calor de la cadena.

$$Q'' = 3.46 \text{ W / m}^2 \text{ K} \times (227^\circ - 73.19^\circ\text{C}) = 532.18 \text{ W/m}^2$$

$$Q = \text{Ancho} \times \text{Largo} \times Q'' = 0.4 \text{ m} \times 1.604 \text{ m} \times 532.18 \text{ W/m}^2 = 341.45 \text{ W}$$

#### 4.1.3. Determinación de Consumo Teórico de Combustible

Como primer paso determinar cuanto combustible se necesita se debe sumar todas las pérdidas.

$$Q_{\text{perdidas}} = 2Q_{\text{paredes}} + Q_{\text{techo}} + Q_{\text{banda}}$$

$$Q_{\text{perdidas}} = (2 \times 61.86) + 67.66 + 341.45 = 532.83 \text{ W}$$

Haciendo uso de la ec. 4.1 se determinara el calor total requerido por el horno.

$$Q = 3924.84 \text{ W} + 532.83 \text{ W} = 4457.67 \text{ W}$$

Además se diseñara el quemador para entregar 30% más de la energía estimada para casos en los que la botella entre fría o el horno recién se encienda y las paredes, en tal caso las paredes más calor.

$$Q_T = (4457.67 \text{ W}) \times 1.3 = 5794.97 \text{ W} \cong 5800$$

El calor que entrega el aire a su vez lo recibe del combustible, para que este entregue la cantidad necesaria de energía es necesario determinar el flujo de combustible necesario.

Como primer paso se determinará el caudal de combustible necesario haciendo uso de la ec. 4.35. El combustible que se va usar es una mezcla de gases que son 70% Propano y 30% Butano.

**TABLA 5**  
**PROPIEDADES DE SUSTANCIAS GASEOSAS**

Gas	PCS [MJ/m <sup>3</sup> ]	Densidad Relativa ( $\rho_r$ )
Propano (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	99	1.562
Butano (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	128.46	2.064

$$Q_T = Q_{gas} PCS \quad \text{ec 4.35}$$

Donde:

$Q_T$  = Calor [W]

$Q_{gas}$  = Caudal [m<sup>3</sup>/s]

PCS = Poder Calorífico superior [J/m<sup>3</sup>] (Ver tabla. 5)

El PCS del combustible se obtiene con la ec 4.36

$$PCS = \sum X_i PCS_i$$

$PCS_i$  = De cada gas que componen el combustible

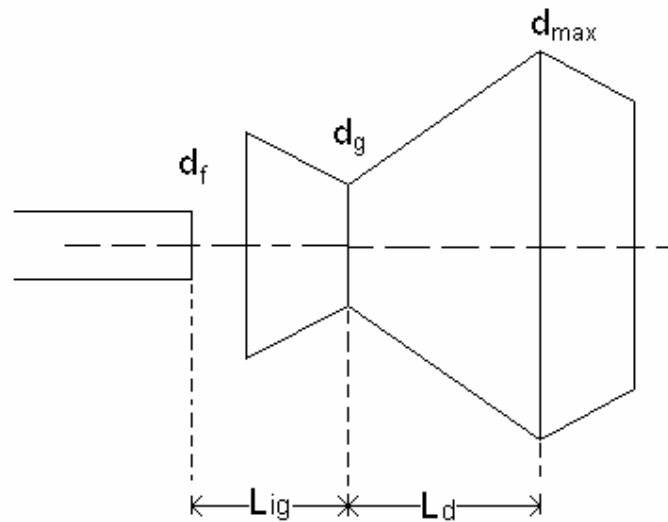
$X_i$  = Fracción Molar

$$\begin{aligned} PCS &= (0.7 \times 99) + (0.3 \times 128.46) = 107.84 \text{ MJ/m}^3 \\ &= 107.84 \times 10^6 \text{ J/m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{gas} &= \frac{Q_T}{PCS} = \frac{5800 \text{ W}}{107.84 \times 10^6 \text{ J/m}^3} = 5.38 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} \\ &= 0.194 \text{ m}^3/\text{h} \end{aligned}$$

#### 4.2. Calculo y Diseño del Quemador

El gas combustible induce (arrastra) su propia provisión de aire se realiza por aspiración mediante un tubo Venturi (figura 4.5). Este consta de dos conos (la cámara y el tubo de mezcla) convergente-divergentes de ángulo muy pequeño, entre 7° a 10°. La sección donde se ensancha con diámetro  $d_g$  se denomina “cuello” o “garganta” del tubo.



**FIGURA 4.5 TUBO VENTURI**

Los reactantes están premezclados al llegar a los quemadores. La llama es estabilizada por la pérdida de calor al cuerpo del quemador.

Son de especial interés los siguientes parámetros:

- Velocidad de la llama
- Estabilización de la llama (soplado y retroceso)
- Emisión de contaminantes

Es frecuente que un quemador calculado con exactitud no funcione correctamente debido a que el inyector no ha sido construido con esmero.

La vena del gas que sale del orificio debe ser coaxial con la garganta del quemador, por lo que en un inyector no se trata solamente de

practicar un orificio de un determinado diámetro, sino también de preocuparse por conseguir:

- Que el orificio en toda su longitud sea perfectamente coaxial con el cuerpo del inyector.
- Que su sección sea constante
- Que no queden rebabas
- Que los bordes estén perfectamente marcados

A continuación se determinara el diámetro del inyector para las condiciones de operación mediante la ec 4.37.

$$Q_{gas} = \frac{11}{1000} k d_f^2 \sqrt{\frac{h}{\rho_r}} \quad \text{ec 4.37}$$

Donde:

$Q_{gas}$  = Flujo del gas [ $m^3/h$ ]

$k$  = Coeficiente del inyector que incluye las pérdidas de carga por fricción y por la formación de la vena gaseosa a la salida del mismo.

$d_f$  = Diámetro del inyector [mm]

$h$  = presión estática del gas [mm de  $H_2O$ ]

$\rho_r$  = densidad relativa del gas respecto al aire

Se sabe que la presión de trabajo de las cocinas ( $h$ ) es de 280 mm de  $H_2O$ . La densidad relativa ( $\rho_r$ ) se la obtiene de manera similar que

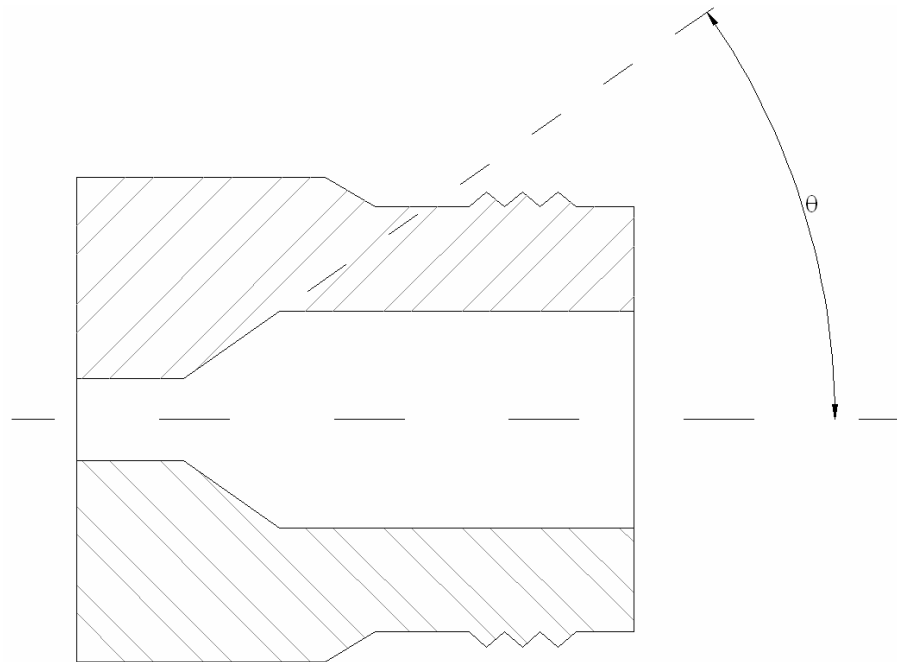
el PCS basándose en las densidades relativas de cada gas que están en la tabla 5:

$$\rho_r = \sum_{i=1}^n x_i \rho_{ri}$$

$\rho_{ri}$  = Densidad de cada gas que componen el combustible

$X_i$  = Fracción molar

$$\rho_r = (0.7 \times 1.562) + (0.3 \times 2.064) = 1.713$$



**FIGURA 4.6 INYECTOR**

TABLA 6

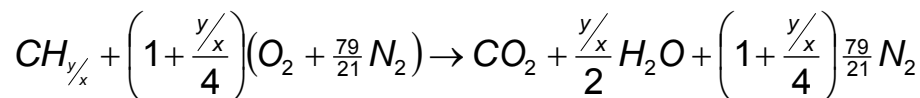
**VALORES DEL COEFICIENTE DE FLUJO (K) SEGÚN EL ÁNGULO DE CONVERGENCIA DEL INYECTOR (VER FIGURA 4.6)**

Angulo de Convergencia ( $\theta$ )	Coefficiente de Flujo (K)
12	0.82
15	0.82
19	0.82
60	0.80
90	0.64

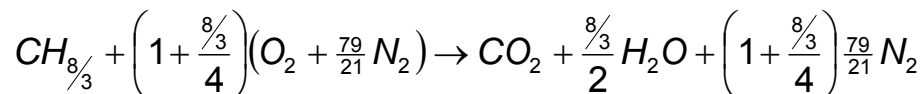
Ya que el flujo necesario será entregado por medio de dos quemadores flujo de combustible a reemplazar en la ec. 4.37 será la mitad del flujo total requerido. Para los tipos más comunes de inyectores K tiene casi siempre un valor próximo a 0.8 que corresponde a un ángulo de  $60^\circ$  como se indica en la tabla 6. El diámetro del inyector es:

$$d_f = \sqrt{\frac{1000}{11 \times 0.8} \cdot 0.097 \sqrt{\frac{1.713}{280}}} = 0.93 \text{ mm}$$

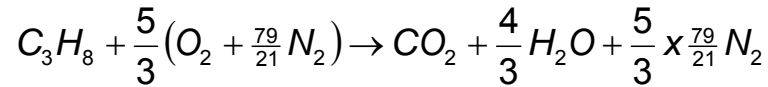
Reacción general:



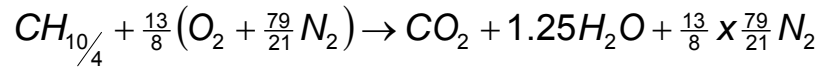
$C_3H_8 = \text{Propano} \implies y/x=8/3$



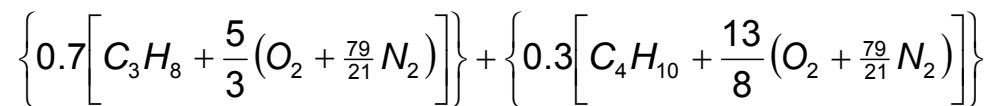




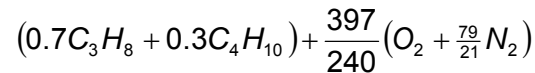
$C_4H_{10}$  = Butano  $\implies y/x=10/4$



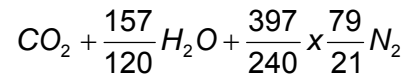
Las ecuaciones de los gases que componen el combustible deben multiplicarse por la proporción en la que se encuentra presentes. Los reactivos de combustión del combustible resultan así:



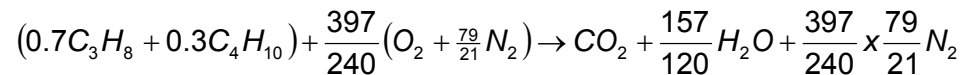
Reagrupando y ordenando se tiene:



Al realizar el mismo proceso para los productos se tiene lo siguiente:



Con lo cual la ecuación finalmente queda:



ec. 4.38

De la ecuación 4.38 se saca la relación aire-combustible en porcentaje volumen (R):

$$R = \frac{397}{240} \left( 1 + \frac{79}{21} \right) = 7.9$$

**TABLA 7**  
**LÍMITES DE INFLAMABILIDAD DE SUSTANCIAS GASEOSAS**

Gases Fórmula (nombre)	Límites de inflamabilidad	
	Inferior (% vol/ vol)	Superior (% vol/ vol)
H <sub>2</sub>	4.0	75.0
CH <sub>4</sub>	5.0	15.0
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	3.2	12.45
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2.4	9.5
<i>i</i> C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	1.8	8.4
<i>n</i> C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	1.9	8.4
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> (Pentano)	1.4	7.8
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> (Hexano)	1.25	6.9
C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> (Heptano)	1.0	6.0
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (Etileno)	3.05	28.6
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> (Propileno)	2.0	11.1
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> (Butadieno)	2.0	11.5
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (Acetileno)	2.5	81.0
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (Benceno)	1.4	6.75
CO	12.5	74.2
NH <sub>3</sub>	15.5	27.0
SH <sub>2</sub>	4.3	45.5

$$L = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{L_i}} \quad \text{ec. 4.39}$$

L = Límites de inflamabilidad de la mezcla

L<sub>i</sub> = Límites de inflamabilidad de especie que compone el combustible

(Tabla 7)

La relación aire-combustible(R) debe estar dentro de los límites de inflamabilidad para que la combustión se de forma segura. Para determinar los límites de inflamabilidad superior e inferior de la mezcla se hará uso de la ec. 4.39.

$$L = \frac{1}{\frac{0.7}{2.4} + \frac{0.3}{1.8}} = 2.18 \text{ es el limite inferior}$$

$$L = \frac{1}{\frac{0.7}{9.5} + \frac{0.3}{8.4}} = 9.14 \text{ es el limite superior}$$

Como se puede observar la relación esta dentro de los límites seguros.

$$R = 0.75 \left( \frac{d_s}{d_f} - 1 \right) \sqrt{\rho_r} k_1 k_2 \quad \text{ec. 4.40}$$

$$L_{ig} = 2.22 d_g + 15 \quad \text{ec. 4.41}$$

$d_s = d_{\max}$  [mm] (Figura 4.5)

$L_{ig}$  [mm] (Ver Figura 4.5)

$d_g =$  Diámetro de Garganta [mm] (Ver Figura 4.5)

$$K_1 = 1 + \log \left( \frac{d_f X_m}{d_g} \right); \text{ si } \frac{d_f X_m}{d_g} > 1 \text{ entonces } K_1 = \frac{d_g}{d_f X_m}$$

$$K_2 = 1 + \log \left( \frac{d_f X_m}{d_s} \right)$$

**TABLA 8**  
**VALORES DE X**

Tipo de Gas	X
Gas Manufacturado	6
Propano	14
Gas Natural	9
Butano	16

Para el  $X_m$  se recurre a la tabla 8 donde se tiene los X de cada elemento del combustible y se tiene lo siguiente:

$$X_m = (0.7 \times 14) + (0.3 \times 16) = 14.6$$

Con la ec 4.39 se determinara el diámetro de la garganta ( $d_g$ ) y el diámetro del tubo ( $d_s$ ) que hará las veces de quemador. Ya que estos diámetros no se los puede despejar se debe asumir valores e iterar hasta que se de con la relación deseada (R); luego varias iteraciones se dio con los valores que satisfacen con los requerimientos que son:

$$d_g = 8.03 \text{ mm}$$

$$d_s = 13.5 \text{ mm}$$

Al reemplazar estos valores en la condición de que  $K_1$  se obtiene:

$$\frac{0.93 \times 14.6}{8.03} = 1.69$$

Como es mayor que uno entonces:

$$K_1 = \frac{8.03}{0.93 \times 14.6} = 0.592$$

$$K_2 = 1 + \log\left(\frac{0.93 \times 14.6}{13.5}\right) = 1$$

Estos valores se reemplazan en la ec. 4.40

$$R = 0.75 \left( \frac{13.5}{0.93} - 1 \right) \sqrt{1.713 \times 0.592 \times 1} = 7.9$$

Ahora reemplazando valores en la ec. 4.41:

$$L_{ig} = 2.22 \times 8.03 + 15 = 32.83 \text{ mm}$$

El quemador será hecho a partir de un tubo de diámetro interior 9.2 mm se calculará el área total por donde saldrá el gas para la combustión. Esto se hará mediante la ec. 4.42:

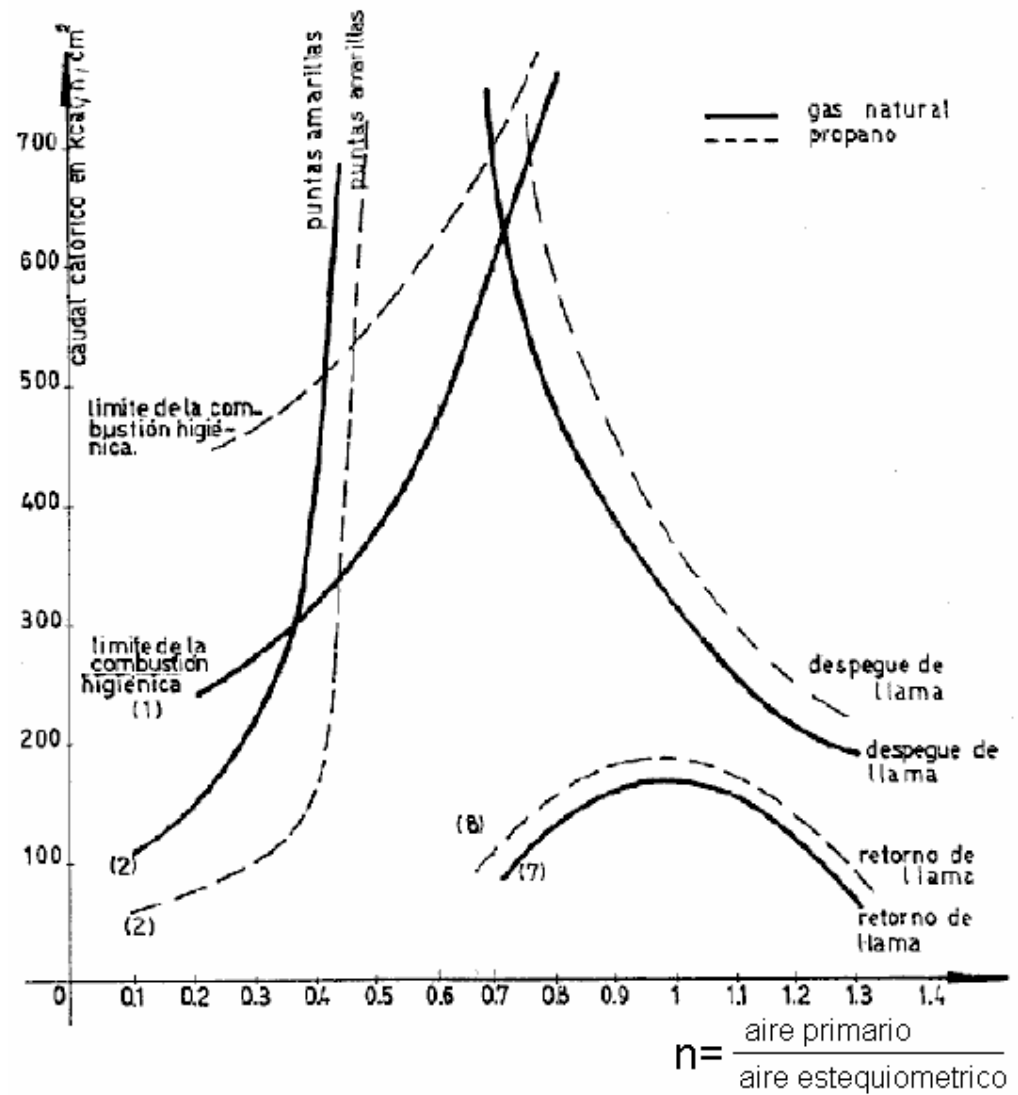
$$A_t = \frac{Q_T}{Q_u} \quad \text{ec. 4.42}$$

Donde:

$A_t$  = Area total [ $\text{cm}^2$ ]

$Q_T$  = Calor [W]

$Q_u$  = Calor Unitario [ $\text{W}/\text{cm}^2$ ] (Ver Figura 4.7)



**FIGURA 4.7 DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DE UN QUEMADOR ATMOSFÉRICO**

La zona de funcionamiento satisfactorio del quemador está limitada por curvas límites (Figura 4.7) que, si se sobrepasan, dan lugar a la aparición de alguno de los siguientes fenómenos indeseables:

- Desprendimiento de llama, como consecuencia de sobrepasar la velocidad crítica correspondiente

- Retorno de llama, al reducirse el caudal calórico hasta valores inferiores al mínimo
- Combustión incompleta, con la presencia de CO en los gases de la combustión, en proporciones superiores a las admisibles
- Aparición de puntas amarillas que originan el fenómeno ya descrito

Se sabe que mientras más espaciadas se encuentren las portas (donde se inicia la combustión) entre sí, mejor será la combustión ya que habrá suficiente aire secundario para cada flama. Pero el espaciar demasiado los agujeros trae como consecuencia la disminución de su número y por lo tanto del área de salida, lo cual incide en la potencia total del quemador. Lo recomendado es un espacio mayor a 2 mm de distancia entre portas. Para esta adaptación se selecciona un espaciado entre portas de 6 mm entre centros, ya que al estar mas cerca una flama de la otra, se vuelve insuficiente el aire secundario para cada flama lo que provoca mala combustión (altos niveles de CO).

El aire estequiometrico es el que se calcula mediante la reacción química (ec. 4.38), el aire primario es el que se premezcla con el combustible. De la figura 4.7, para  $n$  igual a *uno* se tiene un  $Q_u$  de  $350 \text{ Kcal/h cm}^2$  ( $406.79 \text{ W/cm}^2$ ).

Haciendo uso de la ec. 4.42 se tiene el área total por donde debe salir la llama el calor que debe entregar el gas es 5800 W este se entregara por medio de dos tubos ubicados a los lados de las cadenas transportadoras así que el calor que debe entregar cada tubo es aproximadamente 2900 W:

$$A_t = \frac{2900W}{406.79W/cm^2} = 7.13 \text{ cm}^2$$

Si cada orificio tendrá un diámetro de 2 mm entonces el número orificios debe ser:

$$\text{Numero de Orificios} \geq \frac{7.13cm^2 \times 4}{\pi(0.2cm)^2} = 227$$

Como se puede apreciar del resultado obtenido arriba se ve que se necesitan 227 agujeros, el primer y último agujero se hará a 20 mm del extremo del tubo.

### 4.3. Diseño de Sistema de Transportación

En esta sección se seleccionara los piñones y demás elementos utilizados en el sistema de transportación.

#### 4.3.1. Calculo y Selección de Transportador de Botella

En la industria de las bebidas se usa comúnmente cadenas de acero inoxidable aprobados por la FDA (Food and Drug



Administration). Para determinar la cadena apropiada es importante tener cuenta las condiciones medio ambientales en las que va a funcionar como son: temperatura del medio, si esta en contacto con químicos corrosivos, cargas electro-estáticas o magnéticas, etc.; en este caso usaremos cadenas Rexnord de acero inoxidable (AISI 304) serie 815, SS815 cuyo paso es 38.1 mm.

Para hacer la selección de la cinta es necesaria la tensión ajustada de la misma, la cual se hará con la ecuación 4.43.

$$T_A = (2W_c + W_m) \times L \times f_w \times 9.8 \quad \text{ec. 4.43}$$

$T_A$  = Tensión Ajustada [N]

$W_c$  = Peso por longitud de la Cadena [kg/m]

$W_m$  = Peso por longitud de Material [kg/m]

$f_w$  = Coeficiente de Fricción entre Cadena y Guía de Desgaste

$L$  = Longitud entre centros de engranes [m]

De la sección 4.1.1 se determino la masa de cada componente de la carga:

Película:  $9.73 \times 10^{-3}$  Kg/Botella

Botella de PET:  $8.13 \times 10^{-2}$  Kg/ Botella

Líquido: 3.5 Kg/ Botella

Gas:  $1.12 \times 10^{-3}$  Kg/ Botella

Al sumar la masa de cada componente se obtiene la carga que es 3.59 Kg/Botella, se transportan 2 filas de botellas para esto se utilizan 2 cadenas, de ancho 190.5 mm cada una; con una distancia entre botellas del túnel de 154 mm/Botella. El peso por longitud de material ( $W_m$ ) es:

$$W_m = \frac{3.59 \frac{\text{Kg}}{\text{Botella}}}{154 \frac{\text{mm}}{\text{Botella}}} = 23.31 \times 10^{-3} \text{ Kg/mm}$$

$$= 23.31 \text{ Kg/m}$$

En la sección 3.2 se determino que el largo del túnel es de 1604 mm, se desea que la cadena se extienda 300 mm antes y después del horno, con lo que se tiene una longitud total entre centros de engranes de 2204 mm (2.204 m).

Para este ancho de cadena corresponde un peso de 5.1 Kg/m (apéndice H). El coeficiente de fricción ( $f_w$ ) entre la cadena (acero) y la guía de desgaste (acero) tiene un valor de 0.5 (apéndice I).

Se procederá a reemplazar estos valores en la ecuación 4.43:

$$T_A = \left[ \left( 2 \times 5.1 \frac{\text{Kg}}{\text{m}} \right) + 23.31 \frac{\text{Kg}}{\text{m}} \right] \times 2.204 \text{ m} \times 0.5 \times 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 361.89 \text{ N}$$

**TABLA 9**  
**CARGA LÍMITE**

Relación V/L(1/min)	Tensión Permisible (N)
0.2	2778.30
0.3	2489.36
0.5	2178.19
0.7	2000.38
1.0	1778.11
2.5	1422.49
5.0	1622.53
8.0	1022.41
15.0	866.83

De la sección 3.1.3 se tiene la velocidad de transportación de 3.85 m/min se lo dividirá para la longitud entre centros de engranes para así obtener la tensión permisible de la cadena de la tabla 9.

$$\frac{V}{L} = \frac{3.85 \frac{m}{\min}}{2.204m} = 1.75 \text{ 1/min}$$

Si se escoge una relación V/L igual a 1:

$$L_{\max} = \frac{3.85 \frac{m}{\min}}{1 \frac{1}{\min}} = 3.85 \text{ m}$$

La  $T_A$  recalculada con esta longitud es:

$$T_A = \left[ \left( 2 \times 5.1 \frac{\text{Kg}}{\text{m}} \right) + 23.31 \frac{\text{Kg}}{\text{m}} \right] \times 3.85 \text{ m} \times 0.5 \times 9.8 = 632.17 \text{ N}$$

Si se escoge un valor de 2.5 eso me permite tener una longitud de:

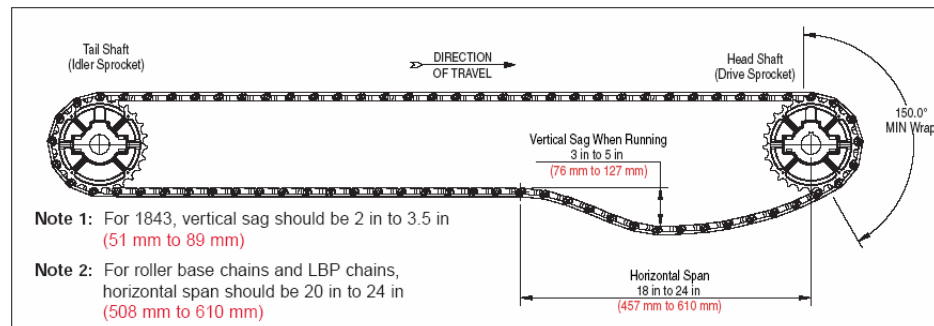
$$L_{\text{max}} = \frac{3.85 \frac{\text{m}}{\text{min}}}{2.5 \frac{1}{\text{min}}} = 1.54 \text{ m}$$

$$T_A = \left[ \left( 2 \times 5.1 \frac{\text{Kg}}{\text{m}} \right) + 23.31 \frac{\text{Kg}}{\text{m}} \right] \times 1.54 \text{ m} \times 0.5 \times 9.8 = 252.87 \text{ N}$$

En ambos casos la tensión ajustada es menor que la tensión permisible por tanto la cadena puede funcionar sin problema alguno dentro de este rango de longitud, que es el caso de esta tesis.

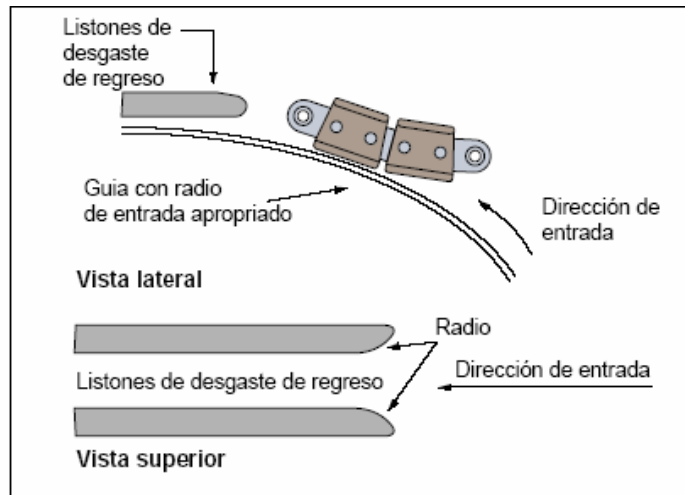
El siguiente paso es la selección de los engranes de tracción y reenvío de la cinta; del Anexo K se obtiene las características de los mismos como regla general un engrane entre mas dientes tenga mejor ya que implica menor desgaste del mismo, menos ruido y mejor transmisión. Por tanto se escogerá uno con 25 dientes NS815 T25 R... para el conductor y NXT820 T25 R... para el conducido.

El apropiado diseño del retorno de la cadena también es importante. La Figura 4.8 muestra un transportador típico. Después del piñón motriz, debe existir espacio para la catenaria. Durante la operación, la altura de la catenaria debe ser entre 76 y 127mm. Si se rebasa este parámetro, uno o más tablillas deben ser retirados. En transportadores sin catenaria, existe un mayor riesgo de desgastar las uniones de la cadena, ya que están sujetas a cargas mayores; lo que es absorbido por las chumaceras o por la cadena. Una altura excesiva de la catenaria reduce el ángulo de engrane y la habilidad de transmitir la potencia. Esto, a su vez, ocasiona que la cadena pulse.



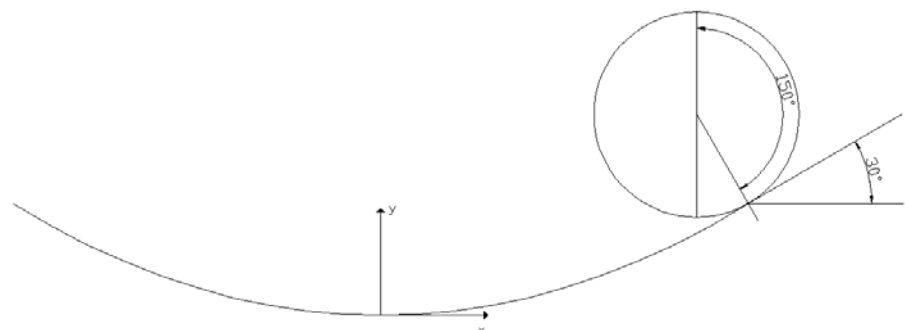
**FIGURA 4.8 TRANSPORTADOR TIPICO**

Las cadenas pueden ser guiadas en el retorno con guías de desgaste, se recomienda usar un radio mayor que el radio de flexión posterior mínimo de la cadena, como se muestra en la Fig. 4.9.



**FIGURA 4.9 RETORNO DE CADENA**

Asumiremos que la distancia entre el engrane y la guía de desgaste del retorno es 510 mm. Ahora se procederá a calcular la altura de la catenaria, sino esta en el rango mencionado en la Figura 4.8 debe escogerse otro valor hasta que quede dentro del rango buscado. En la misma figura se indica que el ángulo envolvente debe ser  $150^\circ$  y diámetro primitivo del engrane es 153.21 mm (apéndice J) por tanto desde el inicio de la catenaria en el engrane conductor hasta el centro del mismo se tiene horizontalmente:



**FIGURA 4.10 CATENARIA**

$$X_1 = \frac{153.21}{2} \text{Sen}30^\circ = 38.3 \text{ mm}$$

Este valor se suma a los 510 mm mencionados anteriormente con lo que se obtiene un total de 548.3 mm (0.5483 m).

$$y = \frac{T_o}{\omega} \left[ \cosh\left(\frac{\omega x}{T_o}\right) - 1 \right] \quad \text{ec 4.44}$$

Donde:

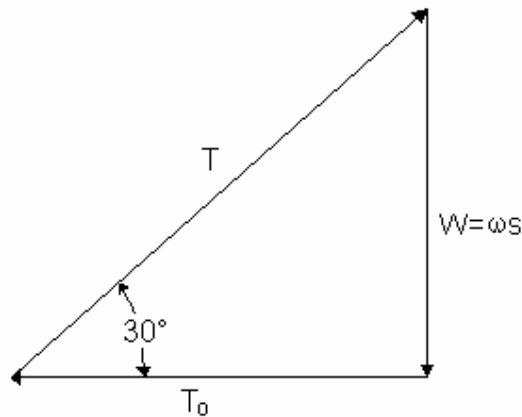
y= Altura de la Catenaria (Ver figura 4.10)

$\omega$  = 5.1 Kg/m

x = Distancia Horizontal

$T_o$  = Tensión Horizontal (Constante) [Kg]

Si en el engrane conductor se tiene un ángulo de envoltura de  $150^\circ$  entonces el que forma la cadena cuando es tangente al engrane es de  $30^\circ$  con la horizontal (Figura 4.10). Al estar operando a velocidad constante se tiene que las fuerzas que actúan sobre la cadena lo hacen como se muestra en la Figura 4.10.



**FIGURA 4.11 FUERZAS ACTUANTES SOBRE LA CADENA**

Por trigonometría se tiene lo siguiente:

$$\tan 30 = \frac{\omega s}{T_0} \quad \text{ec 4.45}$$

Donde  $s$  es la longitud de arco de la banda y es igual a:

$$s = \frac{T_0}{\omega} \operatorname{senh} \left( \frac{\omega x}{T_0} \right) \quad \text{ec 4.46}$$

Al despejar “ $s$ ” de la ec 4.45 e igualar con la ec 4.46 y simplificar se puede obtener  $T_0$ , ya que la catenaria es simétrica el origen se coloca en el punto mas bajo de la misma, la porción objeto de análisis sería la mitad de la longitud de la cinta.

$$T_0 = \frac{\omega x L / 2}{\operatorname{senh}^{-1}(\operatorname{tg} 30^\circ)} = \frac{5.1 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \times 0.5483 \text{ m} / 2}{\operatorname{senh}^{-1}(\operatorname{tg} 30^\circ)} = 2.55 \text{ kg}$$

Ahora es posible calcular la altura con la ec 4.44:



$$y = \frac{2.55}{5.1} \left[ \cosh \left( \frac{5.1 \frac{kg}{m} \times 0.5483 \frac{m}{2}}{2.55 kg} \right) - 1 \right] = 0.077 \text{ m}$$

$$= 77 \text{ mm}$$

Para determinar la longitud de arco de la catenaria desde el punto más bajo hasta uno de sus extremos se usara la ec. 4.46; esta distancia se deberá multiplicar por dos para obtener la longitud total de la catenaria de extremo a extremo.

$$s = \frac{2.55 \text{ Kg}}{5.1 \frac{\text{Kg}}{\text{m}}} \sinh \left( \frac{5.1 \frac{\text{Kg}}{\text{m}} \times 0.5483 \frac{\text{m}}{2}}{2.55} \right) = 0.288 \text{ m}$$

$$= 288 \text{ mm}$$

Por tanto la longitud total de la catenaria es  $228 \text{ mm} \times 2 = 576 \text{ mm}$ .

La porción de cadena que forma la envolvente de  $150^\circ$  ( $5\pi/6$ ) tiene una longitud de arco de:

$$s' = \frac{\theta D_p}{2} = \frac{(5\pi / 6) \times 153.21 \text{ mm}}{2} = 200.55 \text{ mm}$$

Si entre engranes hay 2204 mm y entre los engranes y guías de desgastes hay 510 mm, entonces la longitud de la guía es:

$$L = 2204 \text{ mm} - (2 \times 510 \text{ mm}) = 1184 \text{ mm}$$

Al sumar todas las distancias se tiene la longitud de retorno:

$$L_r = (2xs) + L + (2xs')$$

$$L_r = (2 \times 576 \text{ mm}) + 1184 \text{ mm} + (2 \times 200.55 \text{ mm})$$

$$L_r = 2737.1 \text{ mm (2.7371 m)}$$

Al sumar esta longitud a la de transporte se tiene la longitud total de cadena necesaria que es 4941.1 mm (4.9411 m).

#### 4.3.2. Cálculo y Selección de Motor y Caja Reductora

En esta sección se considero la posibilidad de usar motor y caja reductora, durante el proceso de análisis se encontró una opción más conveniente por lo que se decidió utilizar un moto-reductor. A continuación se hará los cálculos para determinar hacer la selección del equipo necesario.

Con la Tensión ajustada ( $T_A$ ) y la Velocidad de transportación hallaremos la Potencia con la ec. 4.47.

$$Pot. = \frac{V \times T_A \times \# \text{Cadena}}{60} \quad \text{ec. 4.47}$$

Donde:

V = Velocidad de Transportación [m/min]

$T_A$  = Tensión Ajustada [N]

Pot. = Potencia [W]

$$Pot. = \frac{3.85 \text{ m/min} \times 361.89 \text{ N} \times 2}{60} = 46.44 \text{ W}$$

$$= 0.063 \text{ Hp}$$

Teniendo una velocidad lineal de 3.85 m/min (0.064 m/s) y como se indica en el apéndice H el engrane seleccionado tiene un diámetro primitivo de 153.21 mm (0.15321 m) se tiene una velocidad angular de:

$$\omega = \frac{2V}{D_p} = \frac{2 \times 0.064}{0.15321} = 0.835 \text{ rad/s}$$

$$= 8 \text{ R.P.M.}$$

En base al apéndice K se determino que el motor necesario es un Z.18-M71C4.

#### 4.4. Selección de Cortinas de Aire

Originalmente se tenía pensado usar cortinas de aire (ventiladores) para crear una barrera que impidiera que los gases calientes salgan fácilmente del túnel pero se encontró una mejor alternativa; estas son cortinas teflonadas, este es un material térmico resistente a las temperaturas que alcanzara el túnel.

Los resultados de los cálculos realizados en este capítulo se resumen en el apéndice M.

# CAPITULO 5

## 5. ANALISIS DE COSTOS DEL TUNEL DE TERMOCONTRACCION

A continuación se procederá a determinar el costo de construir localmente la maquina y compararla con equipos similares construidos en el exterior e importados.

Este capitulo consta de dos partes:

- Costo de Construcción: Que incluye Costos de Materiales y Equipos, Mano de Obra y Dirección Técnica.
- Costo de Operación: Abarca Costos de Combustible y Energia Electrica.

**TABLA 10**  
**COSTOS DE MATERIALES Y EQUIPOS**

Descripción	Unidad	Cantidad	Valor Unit.(\$)	Valor (\$)
Tubería Acero Inoxidable Cedula 40 ¼ pulg.	m	3	1,40	4,20
Plancha AISI 304 e=2mm (1.22x2.44 m)	u	4	202,74	810,96
Eje AISI 304	kg	3,86	7,00	27,04
Fibra Mineral con Malla e=2 pulg. (2x4pie)	u	6	7,93	47,58
Perno M10x42 con Tuerca Acero Inoxidable	u	10	0,22	2,20
Perno M5x95 con Tuerca Acero Inoxidable	u	44	0,40	17,60
Anillo	u	130	0,04	5,20
Tornillo Allen M8x11	u	4	0,10	0,40
Tornillo Allen M5x11	u	8	0,12	0,96
Tornillo Plano con anillo, tuerca M5x15 Acero Inoxidable	u	24	0,07	1,68
Cadena SS815 K 7 ½	10 pie	2	458,60	917,20
Engrane NS 815 T25 R...	u	4	66,94	267,76
Barra Nylon f=45 mm L=170 mm	u	1	47,60	47,60
Tubería Acero Inoxidable Cedula 40 1¼ pulg.	m	3	30,00	90,00
Tela de Teflón 0.8 mm S/adhesivo	m2	1	25,26	25,26

Motoreductor Z18-M71C4 0.18 KW 57 RPM 3F 220/440V	u	1	440,97	440,97
Chumacera Cuadrada NTN-UCF 205 f=25 mm	u	2	18,80	37,60
Variador G110 1/2 HP 220V c/Panel	u	1	155,55	155,55
Termostato 0-120°C 250 V-HAN	u	1	13,50	13,50
Electro-válvula 2/2 ½" 220 V AC para Gas 0-5 Kg/cm2	u	1	195,35	195,35
Controls Switch de Flujo ½"	u	1	188,55	188,55
Cadena ANSI 25	10 pies	1	62,20	62,20
Piñón Tipo B 28 dientes	u	2	17,90	35,80
Unidad Rep. Termico P/53007-008	u	1	31,05	31,05
Unidad Rep. Taco de Fijacion P/53007-008	u	20	2,69	53,80
Ciclor(Inyector) f 0,3mm q 60°	u	2	0,60	1,20
Varios	Global	1	330,00	330,00
TOTAL				3.811,21

Análisis de Costos:

*Costos de Construcción*

**TABLA 11**

**MAQUINA CONTRUCCION LOCAL**

▪Costo de Materiales y Equipos	\$3.811,21
▪Costo de Mano de Obra Directa	\$2235
▪Dirección Técnica	\$900
TOTAL:	\$6946.21

**TABLA 12**

**MAQUINA IMPORTADA**

Costo de la Maquina	\$9000
Importación	\$1500
<b>TOTAL:</b>	<b>\$10500</b>

*Costos de Operación*

**TABLA 13**

**CONSTRUCCIÓN LOCAL-COMBUSTIBLE**

CONSUMO [m <sup>3</sup> /h]	CONSUMO/h [kg/h]	COSTO TANQUE 45 Kg (\$)	COSTO DE kg	COSTO LA HORA (\$)
0,194	0,427	40	0,89	0,38



**TABLA 14**

**CONSTRUCCIÓN LOCAL-ELECTRICIDAD**

CONSUMO DE ENERGIA [W]	COSTO DE kWh	COSTO LA HORA (\$)
46,44	1,487	0,07

**TABLA 15**

**CONSTRUCCIÓN LOCAL-TOTAL**

COMBUSTIBLE	0,38
MOTO REDUCTOR	0,07
TOTAL	0,45

**TABLA 16**

**Maquina Importada-Consumo Electrico**

CONSUMO DE ENERGIA [W]	COSTO DE kWh	COSTO LA HORA (\$)
5800	1,487	8.62

Basándose en el análisis de costos esta maquina presenta una alternativa de solución viable tanto en Costos de Construcción como en Costos de Operación para el proyecto que se plantea en esta tesis.

En base al consumo de combustible que es de 0.427 kg/h el tanque de 45 kg dura:

$$t = \frac{45\text{kg}}{0.427\text{kg/h}} = 105.39 \text{ horas}$$

Asumiendo el día laboral (8 horas) el tanque dura 13 días lo que significa que al mes se consumen 2 tanques de 45 kg.

# CAPITULO 6

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

- © El diseño del Túnel de Termocontracción realizado en este proyecto de grado se lo realizó específicamente para el etiquetado de botellas conteniendo agua, que a la vez puede ser utilizado en otros productos considerando las características de dicho producto para que no se afecte el contenido del mismo.

Para ello se enfatizó un completo análisis térmico del Horno que forma parte del Túnel buscando seleccionar bajo este análisis los materiales y dimensiones adecuados para minimizar las pérdidas de calor.

En lo que respecta a material para toda la máquina se eligió acero inoxidable AISI 304 que es un material que para el equipo tendrá un costo inicial mayor a que si se eligiera otros materiales pero que a

largo plazo es mas conveniente dado que gracias a sus propiedades no se corroerá y brinda una mejor presentación.

- © Dentro de los combustibles el GLP es el que produce la combustión más limpia, reduciendo las emisiones hasta en un 90%, por lo cual es el recomendado para usar los sistemas de convección. Los actuales precios nacionales de los combustibles, favorecen considerablemente el uso del GLP. Al utilizar estos sistemas en la producción, obtendremos unos índices de calidad que nos permitan competir con productos extranjeros y enmarcarnos en los nuevos conceptos de globalización.
  
- © Luego del análisis del capítulo anterior se observa que la fabricación nacional es mucho mas conveniente, ya que el diseño esta enfocado a las condiciones locales especialmente la temperatura donde va a funcionar logrando un considerable ahorro tanto en la inversión para la construcción como para los costos de operación, en comparación con maquinas fabricadas en el extranjero.
  
- © Se debe tener en cuenta que al comprar una maquina construida localmente se esta aportando al desarrollo del país generando fuentes de trabajo sin perder calidad.

## RECOMENDACIONES

® Si se va a trabajar las 24 horas, con turnos rotativos se debe tener 6 a 8 tanques de reserva ya que en este caso las 105.39 horas se repartirían en días de 24 horas lo que significa que cada tanque solo duraría 4.39 días.

® Debe darse las condiciones para que la concentración CO<sub>2</sub> se mantenga por debajo de 5000 ppm. Las opciones son: ponerlo donde haya la ventilación adecuada que permita que estas condiciones se den o usar ventiladores en este caso puede ser por ventilación diluidora o localizada.

Posterior a la instalación debe verificarse esto con el equipo en operación bajo las condiciones de diseño para así poder garantizar la salud de las personas que se encuentren cerca por tiempo prolongado. Una persona sometida a una concentración superior a la indicada sufrirá efectos que se indica en el Apéndice N.

® Las condiciones de operación deben regirse bajo Normas de Seguridad Industrial. Las normas relacionadas con la operación de esta maquina están en el Apéndice O.

## **APENDICES**

## APENDICE A

### DATOS TECNICOS DE PELICULA DE PVC

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	1.35 g/cc	0.0488 lb/in <sup>3</sup>	ASTM D792
Water Absorption	0.06 %	0.06 %	24 hrs.; ASTM D570
Water Absorption at Saturation	0.15 %	0.15 %	7 days; ASTM D570
<b>Mechanical Properties</b>			
Hardness, Rockwell R	94	94	ASTM D785
Hardness, Shore D	77	77	ASTM D2240
Tensile Strength, Ultimate	42 MPa	6090 psi	ASTM D638
Tensile Strength @ Yield	39.6 MPa	5750 psi	ASTM D638
Elongation at Break	160 %	160 %	
Modulus of Elasticity	2.319 GPa	336 ksi	
Flexural Modulus	2.39 GPa	347 ksi	ASTM D790
Flexural Yield Strength	64 MPa	9280 psi	ASTM D790
Compressive Yield Strength	55.2 MPa	8000 psi	ASTM D695
Ultimate Bearing Strength	37.9 MPa	5500 psi	ASTM D593
Shear Strength	31 MPa	4500 psi	ASTM D732
Izod Impact, Notched	9.53 J/cm	17.9 ft-lb/in	at 23°C; ASTM D256
Izod Impact, Notched, Low Temp	1.07 J/cm	2 ft-lb/in	at 32°F (0°C); ASTM D256
Tensile Impact Strength	158 kJ/m <sup>2</sup>	75 ft-lb/in <sup>2</sup>	ASTM D1822
Taber Abrasion, mg/1000 Cycles	0.038	0.038	ASTM D1044
<b>Electrical Properties</b>			
Dielectric Constant	2.46	2.46	800 MHz; ASTM D150
Dielectric Constant	2.8	2.8	1 GHz; ASTM D150
Dielectric Constant, Low Frequency	3.4	3.4	60 Hz; ASTM D150
Dielectric Strength	Min 16.9 kV/mm	Min 430 V/mil	ASTM D149
Dissipation Factor	0.013	0.013	1 GHz; ASTM D150
Dissipation Factor	0.023	0.023	800 MHz; ASTM D150
Dissipation Factor, Low Frequency	0.022	0.022	60 Hz; ASTM D150
Arc Resistance	80 sec	80 sec	ASTM D495
Comparative Tracking Index	Min 600 V	Min 600 V	UL PLC 0 at 3.05 mm
Hot Wire Ignition, HWI	60 - 120 sec	60 - 120 sec	UL PLC 1 at 2.03 through 6.33 mm
High Amp Arc Ignition, HAI	30 - 60 arcs	30 - 60 arcs	UL PLC 2 at 1.57 through 6.33 mm
High Voltage Arc-Tracking Rate, HVTR	Min 150 mm/min	Min 5.91 in/min	UL PLC 4 at 1.57 through 6.33 mm

<b>Thermal Properties</b>			
CTE, linear 20°C	75.6 µm/m-°C	42 µin/in-°F	at 60°F (16°C); R&H P-4
Specific Heat Capacity	1.21 J/g-°C	0.289 BTU/lb-°F	R&H P-37
Thermal Conductivity	0.16 W/m-K	1.11 BTU-in/hr-ft²-°F	ASTM C177
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	78 °C	172 °F	annealed; ASTM D648
UL RTI, Electrical	50 °C	122 °F	at 1.57 through 6.33 mm
UL RTI, Mechanical with Impact	50 °C	122 °F	at 1.57 through 6.33 mm
UL RTI, Mechanical without Impact	50 °C	122 °F	at 1.57 through 6.33 mm
Flammability, UL94	V-0	V-0	V-0, 5V; Underwriter's Lab; UL Standard 94
Oxygen Index	37.5 %	37.5 %	ASTM D2863
<b>Processing Properties</b>			
Processing Temperature	163 - 200 °C	325 - 392 °F	Forming Temperature



## APENDICE B

### DATOS TECNICOS PET

#### PROPIEDADES FISICAS

Viscosidad Intrínseca	0,81 ± 0,02 dl/g
Punto de fusión	cerca de 260 °C
Acetaldehído	< 1,5 ppm
Contenido de Grupo de Carboxilo	25 - 45 mval/Kg
Densidad	± 1,41 g/cm <sup>3</sup>
Densidad en granel	± 0,9 Kg/dm <sup>3</sup>

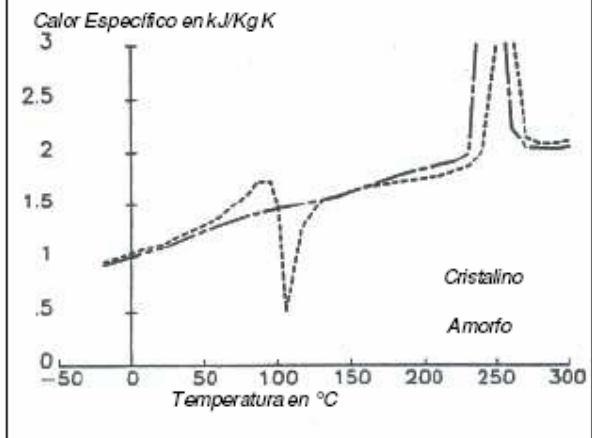
#### RESISTENCIA FISICA

Propiedad	Valor	Método
Resistencia a la tensión (specimen no orientado)	7 500 psi 520 bar	ASTM D638
<i>Bend Creep Modulus</i>	340 000 psi 24 000 bar	ASTM D690
Tensión flexural límite	11 000 psi 750 bar	

#### PROPIEDADES TERMICAS

Propiedad	Valor	Método
Temperatura de Vitrificación	74 °C	DTA
Temperatura de Cristalización	260 °C	DTA
Conductividad Térmica	0,21 W/K m °K	ASTM C177
Calor Especifico	ver Figura 1	

**Figura 1 - Calor Específico del PET  
versus Temperatura**



## APENDICE C

Propiedades termofísicas de agua saturada

Temperatura, $T$ (K)	Presión $P$ (bars) <sup>a</sup>	Volumen específico (m <sup>3</sup> /kg)		Entalpia de vapo- rización $h_{fg}$ (kJ/kg)	Calor específico (kJ/kg · K)		Viscosidad (N · s/m <sup>2</sup> )		Conductividad térmica (W/m · K)		Número de Prandtl		Tensión superficial $\sigma_f \cdot 10^3$ (N/m)	Coeficiente de expan- sión $\beta_f \cdot 10^6$ (K <sup>-1</sup> )	Tempe- ratura $T$ (K)
		$v_f \cdot 10^3$	$v_g$		$c_{p,f}$	$c_{p,g}$	$\mu_f \cdot 10^6$	$\mu_g \cdot 10^6$	$k_f \cdot 10^3$	$k_g \cdot 10^3$	$Pr_f$	$Pr_g$			
273.15	0.00611	1.000	206.3	2502	4.217	1.854	1750	8.02	569	18.2	12.99	0.815	75.5	-68.05	273.15
275	0.00697	1.000	181.7	2497	4.211	1.855	1652	8.09	574	18.3	12.22	0.817	75.3	-32.74	275
280	0.00990	1.000	130.4	2485	4.198	1.858	1422	8.29	582	18.6	10.26	0.825	74.8	46.04	280
285	0.01387	1.000	99.4	2473	4.189	1.861	1225	8.49	590	18.9	8.81	0.833	74.3	114.1	285
290	0.01917	1.001	69.7	2461	4.184	1.864	1080	8.69	598	19.3	7.56	0.841	73.7	174.0	290
295	0.02617	1.002	51.94	2449	4.181	1.868	959	8.89	606	19.5	6.62	0.849	72.7	227.5	295
300	0.03531	1.003	39.13	2438	4.179	1.872	855	9.09	613	19.6	5.83	0.857	71.7	276.1	300
305	0.04712	1.005	29.74	2426	4.178	1.877	769	9.29	620	20.1	5.20	0.865	70.9	320.6	305
310	0.06221	1.007	22.93	2414	4.178	1.882	695	9.49	628	20.4	4.62	0.873	70.0	361.9	310
315	0.08132	1.009	17.82	2402	4.179	1.888	631	9.69	634	20.7	4.16	0.883	69.2	400.4	315
320	0.1053	1.011	13.98	2390	4.180	1.895	577	9.89	640	21.0	3.77	0.894	68.3	436.7	320
325	0.1351	1.013	11.06	2378	4.182	1.903	528	10.09	645	21.3	3.42	0.901	67.5	471.2	325
330	0.1719	1.016	8.82	2366	4.184	1.911	489	10.29	650	21.7	3.15	0.908	66.6	504.0	330
335	0.2167	1.018	7.09	2354	4.186	1.920	453	10.49	656	22.0	2.88	0.916	65.8	535.5	335
340	0.2713	1.021	5.74	2342	4.188	1.930	420	10.69	660	22.3	2.66	0.925	64.9	566.0	340
345	0.3372	1.024	4.683	2329	4.191	1.941	389	10.89	668	22.6	2.45	0.933	64.1	595.4	345
350	0.4163	1.027	3.846	2317	4.195	1.954	365	11.09	668	23.0	2.29	0.942	63.2	624.2	350
355	0.5100	1.030	3.180	2304	4.199	1.968	343	11.29	671	23.3	2.14	0.951	62.3	652.3	355
360	0.6209	1.034	2.645	2291	4.203	1.983	324	11.49	674	23.7	2.02	0.960	61.4	697.9	360
365	0.7514	1.038	2.212	2278	4.209	1.999	306	11.69	677	24.1	1.91	0.969	60.5	707.1	365
370	0.9040	1.041	1.861	2265	4.214	2.017	289	11.89	679	24.5	1.80	0.978	59.5	728.7	370
373.15	1.0133	1.044	1.679	2257	4.217	2.029	279	12.02	680	24.8	1.76	0.984	58.9	750.1	373.15
375	1.0815	1.045	1.574	2252	4.220	2.036	274	12.09	681	24.9	1.70	0.987	58.6	761	375
380	1.2869	1.049	1.337	2239	4.226	2.057	260	12.29	683	25.4	1.61	0.999	57.6	788	380
385	1.5233	1.053	1.142	2225	4.232	2.080	248	12.49	685	25.8	1.53	1.004	56.6	814	385

## APENDICE D

Propiedades termofísicas de Aire a presión atmosférica

$T$ (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m <sup>2</sup> )	$\nu \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$Pr$
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	238	0.719
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688
1700	0.2049	1.267	611	298	113	435	0.685
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.683
1900	0.1833	1.307	663	362	128	534	0.677
2000	0.1741	1.337	689	396	137	589	0.672
2100	0.1658	1.372	715	431	147	646	0.667
2200	0.1582	1.417	740	468	160	714	0.655
2300	0.1513	1.478	766	506	175	783	0.647
2400	0.1448	1.558	792	547	196	869	0.630
2500	0.1389	1.665	818	589	222	960	0.613
3000	0.1135	2.726	955	841	486	1570	0.536

## APENDICE E

### VARIACION DE DISTRIBUCION DE TEMPERATURA DE LA CARGA A TRAVES DEL TIEMPO

p	t[seg]	T <sub>PVC</sub> [°C]	T <sub>PET</sub> [°C]	T <sub>AIRE</sub> [°C]	T <sub>LIQUIDO</sub> [°C]
0	0,00	27	27	27	27
1	0,0887	28,52	27,00	27	27
2	0,18	28,54	27,17	27	27
3	0,27	28,71	27,33	27	27
4	0,35	28,87	27,48	27	27
5	0,44	29,02	27,64	27	27
6	0,53	29,18	27,80	27	27
7	0,62	29,33	27,95	27	27
8	0,71	29,49	28,11	27	27
9	0,80	29,64	28,26	27	27
10	0,89	29,80	28,42	27	27
11	0,98	29,95	28,58	27	27
12	1,06	30,10	28,73	27	27
13	1,15	30,26	28,89	27	27
14	1,24	30,41	29,04	27	27
15	1,33	30,57	29,19	27,01	27
16	1,42	30,72	29,35	27,02	27
17	1,51	30,87	29,50	27,02	27
18	1,60	31,02	29,66	27,02	27
19	1,68	31,18	29,81	27,02	27
20	1,77	31,33	29,96	27,03	27
21	1,86	31,48	30,12	27,03	27
22	1,95	31,63	30,27	27,03	27
23	2,04	31,78	30,42	27,04	27
24	2,13	31,94	30,57	27,04	27
25	2,22	32,09	30,73	27,04	27
26	2,30	32,24	30,88	27,05	27
27	2,39	32,39	31,03	27,05	27
28	2,48	32,54	31,18	27,06	27
29	2,57	32,69	31,33	27,06	27
30	2,66	32,84	31,48	27,07	27
31	2,75	32,99	31,64	27,07	27
32	2,84	33,14	31,79	27,07	27
33	2,93	33,29	31,94	27,08	27
34	3,01	33,44	32,09	27,08	27
35	3,10	33,59	32,24	27,09	27
36	3,19	33,74	32,39	27,09	27
37	3,28	33,89	32,54	27,10	27
38	3,37	34,04	32,69	27,11	27
39	3,46	34,18	32,84	27,11	27

40	3,55	34,33	32,99	27,12	27
41	3,63	34,48	33,13	27,12	27
42	3,72	34,63	33,28	27,13	27
43	3,81	34,78	33,43	27,14	27
44	3,90	34,92	33,58	27,14	27
45	3,99	35,07	33,73	27,15	27
46	4,08	35,22	33,88	27,16	27
47	4,17	35,36	34,02	27,16	27
48	4,26	35,51	34,17	27,17	27
49	4,34	35,66	34,32	27,18	27
50	4,43	35,80	34,47	27,19	27
51	4,52	35,95	34,61	27,19	27
52	4,61	36,10	34,76	27,20	27
53	4,70	36,24	34,91	27,21	27
54	4,79	36,39	35,05	27,22	27
55	4,88	36,53	35,20	27,22	27
56	4,96	36,68	35,35	27,23	27
57	5,05	36,82	35,49	27,24	27
58	5,14	36,97	35,64	27,25	27
59	5,23	37,11	35,78	27,26	27
60	5,32	37,26	35,93	27,27	27
61	5,41	37,40	36,07	27,28	27
62	5,50	37,54	36,22	27,29	27
63	5,59	37,69	36,36	27,29	27
64	5,67	37,83	36,51	27,30	27
65	5,76	37,97	36,65	27,31	27
66	5,85	38,12	36,79	27,32	27
67	5,94	38,26	36,94	27,33	27
68	6,03	38,40	37,08	27,34	27
69	6,12	38,55	37,23	27,35	27
70	6,21	38,69	37,37	27,36	27
71	6,29	38,83	37,51	27,37	27
72	6,38	38,97	37,65	27,38	27
73	6,47	39,11	37,80	27,39	27
74	6,56	39,26	37,94	27,41	27
75	6,65	39,40	38,08	27,42	27
76	6,74	39,54	38,22	27,43	27
77	6,83	39,68	38,37	27,44	27
78	6,91	39,82	38,51	27,45	27
79	7,00	39,96	38,65	27,46	27
80	7,09	40,10	38,79	27,47	27
81	7,18	40,24	38,93	27,48	27
82	7,27	40,38	39,07	27,50	27
83	7,36	40,52	39,21	27,51	27
84	7,45	40,66	39,36	27,52	27
85	7,54	40,80	39,50	27,53	27

86	7,62	40,94	39,64	27,55	27
87	7,71	41,08	39,78	27,56	27
88	7,80	41,22	39,92	27,57	27
89	7,89	41,36	40,06	27,58	27
90	7,98	41,50	40,19	27,60	27,00
91	8,07	41,63	40,33	27,61	27,00
92	8,16	41,77	40,47	27,62	27,00
93	8,24	41,91	40,61	27,64	27,00
94	8,33	42,05	40,75	27,65	27,00
95	8,42	42,19	40,89	27,66	27,00
96	8,51	42,32	41,03	27,68	27,00
97	8,60	42,46	41,17	27,69	27,00
98	8,69	42,60	41,30	27,70	27,00
99	8,78	42,74	41,44	27,72	27,00
100	8,87	42,87	41,58	27,73	27,00
101	8,95	43,01	41,72	27,75	27,00
102	9,04	43,15	41,85	27,76	27,01
103	9,13	43,28	41,99	27,78	27,01
104	9,22	43,42	42,13	27,79	27,01
105	9,31	43,55	42,27	27,81	27,01
106	9,40	43,69	42,40	27,82	27,01
107	9,49	43,82	42,54	27,84	27,01
108	9,57	43,96	42,67	27,85	27,01
109	9,66	44,10	42,81	27,87	27,01
110	9,75	44,23	42,95	27,88	27,01
111	9,84	44,36	43,08	27,90	27,01
112	9,93	44,50	43,22	27,91	27,01
113	10,02	44,63	43,35	27,93	27,01
114	10,11	44,77	43,49	27,95	27,01
115	10,20	44,90	43,62	27,96	27,01
116	10,28	45,04	43,76	27,98	27,01
117	10,37	45,17	43,89	27,99	27,01
118	10,46	45,30	44,03	28,01	27,01
119	10,55	45,44	44,16	28,03	27,01
120	10,64	45,57	44,29	28,04	27,01
121	10,73	45,70	44,43	28,06	27,01
122	10,82	45,84	44,56	28,08	27,01
123	10,90	45,97	44,70	28,09	27,01
124	10,99	46,10	44,83	28,11	27,01
125	11,08	46,23	44,96	28,13	27,01
126	11,17	46,37	45,10	28,15	27,01
127	11,26	46,50	45,23	28,16	27,01
128	11,35	46,63	45,36	28,18	27,01
129	11,44	46,76	45,49	28,20	27,01
130	11,52	46,89	45,63	28,22	27,01
131	11,61	47,02	45,76	28,24	27,01

132	11,70	47,15	45,89	28,25	27,01
133	11,79	47,29	46,02	28,27	27,01
134	11,88	47,42	46,15	28,29	27,01
135	11,97	47,55	46,28	28,31	27,01
136	12,06	47,68	46,42	28,33	27,01
137	12,15	47,81	46,55	28,35	27,01
138	12,23	47,94	46,68	28,37	27,01
139	12,32	48,07	46,81	28,38	27,01
140	12,41	48,20	46,94	28,40	27,01
141	12,50	48,33	47,07	28,42	27,01
142	12,59	48,46	47,20	28,44	27,01
143	12,68	48,59	47,33	28,46	27,01
144	12,77	48,71	47,46	28,48	27,01
145	12,85	48,84	47,59	28,50	27,01
146	12,94	48,97	47,72	28,52	27,01
147	13,03	49,10	47,85	28,54	27,01
148	13,12	49,23	47,98	28,56	27,01
149	13,21	49,36	48,11	28,58	27,01
150	13,30	49,49	48,24	28,60	27,01
151	13,39	49,61	48,36	28,62	27,01
152	13,48	49,74	48,49	28,64	27,01
153	13,56	49,87	48,62	28,66	27,01
154	13,65	50,00	48,75	28,68	27,01
155	13,74	50,12	48,88	28,70	27,01
156	13,83	50,25	49,00	28,72	27,01
157	13,92	50,38	49,13	28,75	27,01
158	14,01	50,50	49,26	28,77	27,01
159	14,10	50,63	49,39	28,79	27,01
160	14,18	50,76	49,51	28,81	27,01
161	14,27	50,88	49,64	28,83	27,01
162	14,36	51,01	49,77	28,85	27,01
163	14,45	51,13	49,89	28,87	27,01
164	14,54	51,26	50,02	28,90	27,01
165	14,63	51,39	50,15	28,92	27,01
166	14,72	51,51	50,27	28,94	27,01
167	14,80	51,64	50,40	28,96	27,01
168	14,89	51,76	50,53	28,98	27,01
169	14,98	51,89	50,65	29,01	27,01
170	15,07	52,01	50,78	29,03	27,01
171	15,16	52,14	50,90	29,05	27,01
172	15,25	52,26	51,03	29,07	27,01
173	15,34	52,38	51,15	29,10	27,01
174	15,43	52,51	51,28	29,12	27,01
175	15,51	52,63	51,40	29,14	27,01
176	15,60	52,76	51,53	29,16	27,01
177	15,69	52,88	51,65	29,19	27,01



178	15,78	53,00	51,77	29,21	27,01
179	15,87	53,13	51,90	29,23	27,01
180	15,96	53,25	52,02	29,26	27,02
181	16,05	53,37	52,15	29,28	27,02
182	16,13	53,49	52,27	29,31	27,02
183	16,22	53,62	52,39	29,33	27,02
184	16,31	53,74	52,52	29,35	27,02
185	16,40	53,86	52,64	29,38	27,02
186	16,49	53,98	52,76	29,40	27,02
187	16,58	54,11	52,89	29,43	27,02
188	16,67	54,23	53,01	29,45	27,02
189	16,76	54,35	53,13	29,47	27,02
190	16,84	54,47	53,25	29,50	27,02
191	16,93	54,59	53,37	29,52	27,02
192	17,02	54,71	53,50	29,55	27,02
193	17,11	54,83	53,62	29,57	27,02
194	17,20	54,95	53,74	29,60	27,02
195	17,29	55,08	53,86	29,62	27,02
196	17,38	55,20	53,98	29,65	27,02
197	17,46	55,32	54,10	29,67	27,02
198	17,55	55,44	54,22	29,70	27,02
199	17,64	55,56	54,35	29,72	27,02
200	17,73	55,68	54,47	29,75	27,02
201	17,82	55,80	54,59	29,77	27,02
202	17,91	55,92	54,71	29,80	27,02
203	18,00	56,04	54,83	29,83	27,02
204	18,09	56,15	54,95	29,85	27,02
205	18,17	56,27	55,07	29,88	27,02
206	18,26	56,39	55,19	29,90	27,02
207	18,35	56,51	55,31	29,93	27,02
208	18,44	56,63	55,43	29,96	27,02
209	18,53	56,75	55,55	29,98	27,02
210	18,62	56,87	55,66	30,01	27,02
211	18,71	56,99	55,78	30,04	27,02
212	18,79	57,10	55,90	30,06	27,02
213	18,88	57,22	56,02	30,09	27,02
214	18,97	57,34	56,14	30,12	27,02
215	19,06	57,46	56,26	30,14	27,02
216	19,15	57,57	56,38	30,17	27,02
217	19,24	57,69	56,49	30,20	27,02
218	19,33	57,81	56,61	30,22	27,02
219	19,41	57,93	56,73	30,25	27,02
220	19,50	58,04	56,85	30,28	27,02
221	19,59	58,16	56,96	30,31	27,02
222	19,68	58,28	57,08	30,33	27,02
223	19,77	58,39	57,20	30,36	27,02

224	19,86	58,51	57,32	30,39	27,02
225	19,95	58,62	57,43	30,42	27,02
226	20,04	58,74	57,55	30,45	27,02
227	20,12	58,86	57,67	30,47	27,02
228	20,21	58,97	57,78	30,50	27,02
229	20,30	59,09	57,90	30,53	27,02
230	20,39	59,20	58,01	30,56	27,02
231	20,48	59,32	58,13	30,59	27,02
232	20,57	59,43	58,25	30,62	27,02
233	20,66	59,55	58,36	30,64	27,02
234	20,74	59,66	58,48	30,67	27,02
235	20,83	59,78	58,59	30,70	27,03
236	20,92	59,89	58,71	30,73	27,03
237	21,01	60,01	58,82	30,76	27,03
238	21,10	60,12	58,94	30,79	27,03
239	21,19	60,23	59,05	30,82	27,03
240	21,28	60,35	59,17	30,85	27,03
241	21,37	60,46	59,28	30,88	27,03
242	21,45	60,57	59,40	30,91	27,03
243	21,54	60,69	59,51	30,93	27,03
244	21,63	60,80	59,62	30,96	27,03
245	21,72	60,91	59,74	30,99	27,03
246	21,81	61,03	59,85	31,02	27,03
247	21,90	61,14	59,97	31,05	27,03
248	21,99	61,25	60,08	31,08	27,03
249	22,07	61,37	60,19	31,11	27,03
250	22,16	61,48	60,31	31,14	27,03
251	22,25	61,59	60,42	31,17	27,03
252	22,34	61,70	60,53	31,20	27,03
253	22,43	61,81	60,64	31,23	27,03
254	22,52	61,93	60,76	31,26	27,03
255	22,61	62,04	60,87	31,30	27,03
256	22,70	62,15	60,98	31,33	27,03
257	22,78	62,26	61,09	31,36	27,03
258	22,87	62,37	61,21	31,39	27,03
259	22,96	62,48	61,32	31,42	27,03
260	23,05	62,59	61,43	31,45	27,03
261	23,14	62,71	61,54	31,48	27,03
262	23,23	62,82	61,65	31,51	27,03
263	23,32	62,93	61,76	31,54	27,03
264	23,40	63,04	61,87	31,57	27,03
265	23,49	63,15	61,98	31,60	27,03
266	23,58	63,26	62,10	31,64	27,03
267	23,67	63,37	62,21	31,67	27,03
268	23,76	63,48	62,32	31,70	27,03
269	23,85	63,59	62,43	31,73	27,03

270	23,94	63,70	62,54	31,76	27,03
271	24,02	63,81	62,65	31,79	27,03
272	24,11	63,91	62,76	31,83	27,03
273	24,20	64,02	62,87	31,86	27,03
274	24,29	64,13	62,98	31,89	27,03
275	24,38	64,24	63,09	31,92	27,03
276	24,47	64,35	63,20	31,95	27,03
277	24,56	64,46	63,31	31,99	27,03
278	24,65	64,57	63,41	32,02	27,03
279	24,73	64,68	63,52	32,05	27,03
280	24,82	64,78	63,63	32,08	27,03
281	24,91	64,89	63,74	32,12	27,03
282	25,00	65,00	63,85	32,15	27,04

## APENDICE F

### Propiedades de sólidos metálicos

Composición	Punto de fusión (K)	Propiedades a 300 K				Propiedades a varias temperaturas (K)							
		$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg · K)	$k$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^4$ (m <sup>2</sup> /s)	$k$ (W/m · K)/ $c_p$ (J/kg · K)							
						100	200	400	600	800	1000	1200	1500
Acero puro	1810	7870	447	80.2	23.1	134 216	94.0 384	69.5 490	54.7 574	43.3 680	32.8 975	28.3 609	32.1 654
Aceros al carbón													
Carbón ordinario (Mn ≤ 1%, Si ≤ 0.1%)		7854	434	60.5	17.7			56.7 487	48.0 559	39.2 685	30.0 1169		
AISI 1010		7832	434	63.9	18.8			58.7 487	48.8 559	39.2 685	31.3 1168		
Carbón-silicio (Mn ≤ 1%, 0.1% < Si ≤ 0.6%)		7817	446	51.9	14.9			49.8 501	44.0 582	37.4 699	29.3 971		
Carbón-manganeso-silicio (1% < Mn ≤ 1.65%, 0.1% < Si ≤ 0.6%)		8131	434	41.0	11.6			42.2 487	39.7 559	35.0 685	27.6 1090		
Aceros con cromo (bajo)													
1 Cr-1 Mo-Si (0.18% C, 0.65% Cr, 0.23% Mo, 0.6% Si)		7822	444	37.7	10.9			38.2 492	36.7 575	33.3 688	26.9 969		
1 Cr-1 Mo (0.16% C, 1% Cr, 0.54% Mo, 0.39% Si)		7858	442	42.3	12.2			42.0 492	39.1 575	34.5 688	27.4 969		
1 Cr-V (0.2% C, 1.02% Cr, 0.15% V)		7836	443	48.9	14.1			46.8 492	42.1 575	36.3 688	28.2 969		
Aceros inoxidables													
AISI 302		8055	480	15.1	3.91			17.3 512	20.0 559	22.8 585	25.4 606		
AISI 304	1670	7900	477	14.9	3.95	9.2 272	12.6 402	16.6 515	19.8 557	22.6 582	25.4 611	28.0 640	31.7 682
AISI 316		8238	468	13.4	3.48			15.2 504	18.3 550	21.3 576	24.2 602		
AISI 347		7978	480	14.2	3.71			15.8 513	18.9 559	21.9 585	24.7 606		

## APENDICE G

### Aislamiento Industrial

Descripción/ composición	Temperatura máxima de servicio (K)	Densidad típica (kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad térmica típica, $k$ (W/m · K), a varias temperaturas (K)														
			200	215	230	240	255	270	285	300	310	365	420	530	645	750	
<b>Mantas</b>																	
Manta, fibra mineral de metal reforzada	920	96-192										0.038	0.046	0.056	0.078		
Manta, fibra mineral, vidrio; fibra fina, unión orgánica	815	40-96										0.035	0.045	0.058	0.088		
	450	10				0.036	0.038	0.040	0.043	0.048		0.052	0.076				
		12				0.035	0.036	0.039	0.042	0.046	0.049	0.069					
		16				0.033	0.035	0.036	0.039	0.042	0.046	0.062					
		24				0.030	0.032	0.033	0.036	0.039	0.040	0.053					
		32				0.029	0.030	0.032	0.033	0.036	0.038	0.048					
		48				0.027	0.029	0.030	0.032	0.033	0.035	0.045					
Manta, fibra de óxido de silicio-alúmina	1530	48												0.071	0.105	0.150	
		64												0.059	0.087	0.125	
		96												0.052	0.076	0.100	
		128												0.049	0.068	0.091	
Filtro, semirrígido;	480	50-125							0.035	0.036	0.038	0.039	0.051	0.063			
filtro de unión orgánica laminado;	730	50	0.023	0.025	0.026	0.027	0.029	0.030	0.032	0.033	0.035	0.051	0.079				
sin unión	920	120											0.051	0.065	0.087		
<b>Aislantes de bloques, tableros y tubería</b>																	
Papel asbestino, laminado y corrugado																	
4-pliegues	420	190									0.078	0.082	0.098				
6-pliegues	420	255									0.071	0.074	0.085				
8-pliegues	420	300									0.068	0.071	0.082				
Óxido de magnesio,	590	185										0.051	0.055	0.061			
Silicato de calcio	920	190										0.055	0.059	0.063	0.075	0.089	0.104

## APENDICE H

### Ficha Técnica Cadena Rexnord SERIE 815 y 812

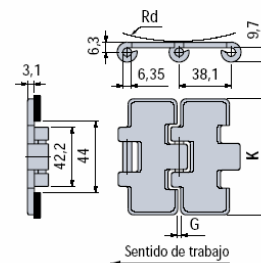
812 - 815

**Rex - OPTI-Plus®** = Capacidad de carga superior en un 40%. Acabado especial



Recorridos rectilíneos: Bisagra única. Paso 38,1 mm (inch 1 1/2")

Código Rexnord Nr.	Rugosidad $\mu\text{m}$	Material placa	Anchura K mm	Juego placas G mm	Radio min. Rd mm	Peso kg/m
S 815 - K 325 *	0,6	Acero al carbón tratamiento térmico	82,5	1,8	150	2,6
S 815 - K 450			114,3			3,3
S 815 - K 750			190,5			5,1
SS 812 - K 325	0,6	Acero inox ferrítico AISI 430	82,5	2,8	75	2,6
SSR 812 - K 325	0,5	<b>Rex - OPTI-Plus®</b>	82,5	2,8	75	2,6
SSX 812 - K 325	0,3		82,5	2,8	75	2,6
SSY 812 - K 350	0,3		88,9	1,6	150	2,7
SSC 812 - K 250	0,5		63,5	1,6	150	2,4
SSC 812 - K 263 *			66,8			2,4
SSC 812 - K 300 *			76,2			2,5
SSC 812 - K 325 *			82,5			2,6
SSC 812 - K 330 *			83,8			2,6
SSC 812 - K 350			88,9			2,7
SSC 812 - K 400			101,6			3,0
SSC 812 - K 450			114,3			3,3
SSC 812 - K 600			152,4			4,2
SSC 812 - K 750			190,5			5,1
SS 815 - K 325 *	0,5	Acero inox austenítico AISI 304 (18/8)	82,5	1,6	150	2,6
SS 815 - K 400			101,6			3,0
SS 815 - K 450			114,3			3,3
SS 815 - K 600 *			152,4			4,2
SS 815 - K 750 *			190,5			5,1



\* = Bajo pedido para cantidad adecuada.  
 Material del perno de la cadena S 815: acero endurecido  
 Material del perno de la cadena SS 815: acero inox AISI 304.  
 Material del perno para todas las otras cadenas: acero inox AISI 431.  
 Paquete: 80 pasos (3,048 m).



## APENDICE I

### Tabla de Coeficiente Fricción entre Cadena y Guía de Desgaste ( $f_w$ )

Chain Material		Wearstrip Material		
Chain Material	Lubrication Conditions	Steel and Stainless Steel	UHMWPE	Nylatron®
AS	Dry	0.30	0.25	0.25
	Water	0.23	0.21	0.21
	Soap & Water	0.15	0.15	0.15
	Oil	0.10	0.10	0.10
BWR	Dry	0.28	0.22	0.22
	Water	NR	NR	NR
	Soap & Water	NR	NR	NR
	Oil	0.10	0.10	0.10
CR	Dry	0.30	0.25	0.25
	Water	0.23	0.21	0.21
	Soap & Water	0.15	0.15	0.15
	Oil	0.10	0.10	0.10
D, WD	Dry	0.30	0.25	0.25
	Water	0.23	0.21	0.21
	Soap & Water	0.15	0.15	0.15
	Oil	0.10	0.10	0.10
DUV	Dry	0.30	0.25	0.25
	Water	0.23	0.21	0.21
	Soap & Water	0.15	0.15	0.15
	Oil	0.10	0.10	0.10
ESD	Dry	0.35	0.30	0.30
	Water	0.25	0.25	0.25
	Soap & Water	0.20	0.20	0.20
	Oil	0.10	0.10	0.10
FR	Dry	0.30	0.25	0.25
	Water	0.23	0.21	0.21
	Soap & Water	0.15	0.15	0.15
	Oil	0.10	0.10	0.10
HP*, WHP	Dry	0.22	0.17	0.17
	Water	0.20	0.16	0.16
	Soap & Water	0.15	0.14	0.14
	Oil	0.10	0.10	0.10
HS	Dry	0.30	0.28	0.28
	Water	0.25	0.23	0.23
	Soap & Water	0.18	0.18	0.18
	Oil	0.10	0.10	0.10
LF, WLF	Dry	0.25	0.20	0.20
	Water	0.20	0.18	0.18
	Soap & Water	0.15	0.15	0.15
	Oil	0.10	0.10	0.10
MR	Dry	0.30	0.28	0.28
	Water	NR	NR	NR
	Soap & Water	NR	NR	NR
	Oil	0.10	0.10	0.10
P	Dry	0.30	0.25	0.25
	Water	0.23	0.21	0.21
	Soap & Water	0.15	0.15	0.15
	Oil	0.10	0.10	0.10
PS*	Dry	0.18	0.17	0.17
	Water	0.16	0.16	NR
	Soap & Water	0.13	0.14	NR
	Oil	0.10	0.10	0.10
S	Dry	0.50	0.40	0.40
	Water	NR	NR	NR
	Soap & Water	NR	NR	NR
	Oil	0.20	0.20	0.20
SS, SSB	Dry	0.50	0.40	0.40
	Water	0.40	0.30	0.30
	Soap & Water	0.20	0.20	0.20
	Oil	0.20	0.20	0.20
WX	Dry	0.25	0.20	0.20
	Water	NR	NR	NR
	Soap & Water	NR	NR	NR
	Oil	0.10	0.10	0.10

✓  $f_m$  for LBP3000 TableTop® chain (typically) = 0.10;  $f_m$  for LBP1503 TableTop® chain (typically) = 0.11

## APENDICE J

### Engranés Rexnord de Tracción y Reenvío para Serie 815

**Pinones de tracción: En dos mitades, en poliamida reforzada PAFV (negra)**

Código Rexnord Nr.	Nr. dientes Z	Reales	Efectivos	Ø primitivo d mm	Ø externo da mm	Ø orificio acabado con alojamiento lengüeta d1	L mm	Ln mm	Peso kg
--------------------	---------------	--------	-----------	------------------	-----------------	--	------	-------	---------

Orificio (mm)

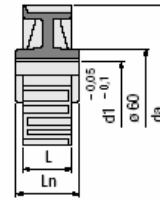
NS 815 T21 R...	21	10,5		129,28	129,5	25 30 35 40 45	52	51	0,47
NS 815 T23 R...*	23	11,5		141,22	142	25 30 35 40 45	52	51	0,55
NS 815 T25 R...	25	12,5		153,21	154,2	25 30 35 40 45	54	58,5	0,60

Orificio (inch)

NS 815 T21 R...*	21	10,5		129,28	129,5	1" 11/4" 2"	52	51	0,47
NS 815 T23 R...	23	11,5		141,22	142	1" 11/4" 1 1/2" 1 3/4" 2"	52	51	0,55
NS 815 T25 R...	25	12,5		153,21	154,2	1" 11/4" 1 1/2" 2"	54	58,5	0,60

\* = Bajo pedido para cantidad adecuada.  
Tomillería: tornillos de acero inox AISI 304,  
tuercas de latón níquelado.

Alojamiento lengüeta: UNI 6604-69. Véase pág. 101.  
Par máximo de apriete aconsejado: 1 kgm.



NS815

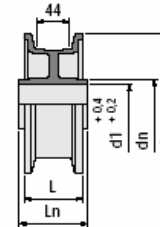


**Ruedas de reenvío: En poliamida PA (negra)**

Código Rexnord Nr.	Correspondiente Nr. dientes	Ø externo da mm	Ø orificio acabado d1	dn mm	L mm	Ln mm	Peso kg
--------------------	-----------------------------	-----------------	-----------------------	-------	------	-------	---------

Orificio (mm)

NXT 820 T15 R...	15	95,5	25 30	40	55	92	0,20
NXT 820 T17 R...	17	106,5	25 30	42	53	57	0,18
NXT 820 T18 R...*	18	113	25 30	40	57	92	0,24
NXT 820 T19 R...	19	118	25 30 40	42*	57	57	0,20
NXT 820 T21 R...	21	130	25 30 35 40	d1+10	60	61,5	0,22
NXT 820 T23 R...	23	142,5	25 30 35 40 45 50	d1+10	59,5**	61,5	0,27
NXT 820 T25 R...	25	154,5	25 30 35 40	d1+10	59	61,5	0,30



NXT 820

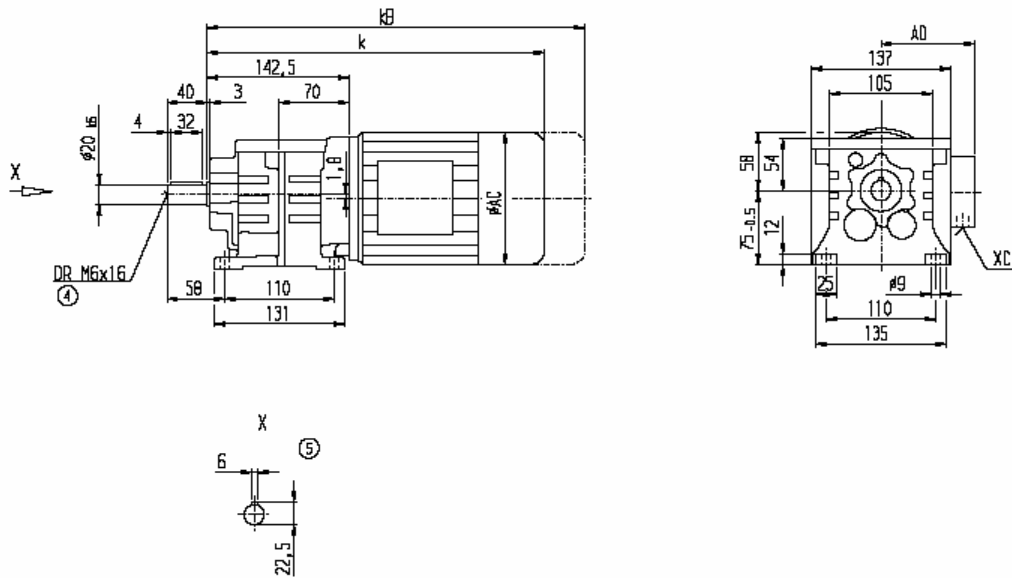




## APENDICE K

### Tabla de datos técnicos Moto-Reductores FLENDER

P <sub>Motor</sub> [kW]	n <sub>2</sub> (50 Hz) [1/min]	n <sub>2</sub> (60 Hz) [1/min]	T <sub>2</sub> [Nm]	f <sub>B</sub> [-]	i <sub>ges</sub> [-]	Getriebemotor Gear Motor	
0,18 kW (50 Hz) 0,22 kW (60 Hz)	28	34	62	1,5	50,51	★	D.18-M71C4
	32	38	53	1,7	43,15		Z.18-M71C4
	38	46	46	2	37,23	★	
	44	53	39	2,3	31,98		
	48	58	36	2,5	29,45	★	
	52	62	33	2,7	26,77		
	59	71	29	3,1	23,69	★	
	70	84	24	3,7	19,85		
	83	100	21	4,3	16,92	★	
	97	116	18	5,1	14,38	★	
	112	134	15	5,9	12,5		
	129	155	13	6,5	10,88	★	
	143	172	12	6,9	9,81		
	162	194	11	7,5	8,66		
	189	227	9,1	6	7,42	★	
	217	260	7,9	6,7	6,45		
	250	300	6,9	7,4	5,61	★	
	277	332	6,2	7,9	5,06		
	313	376	5,5	8,9	4,47		
	391	469	4,4	10,5	3,58	★	
	150	180	12	2,8	9,33	★	E.38-M71C4
	169	203	10	3,1	8,3		
	194	233	8,8	4,3	7,2	★	
0,25 kW (50 Hz) 0,3 kW (60 Hz)	0,08	0,1	24812	0,81	18039		D.188-D48-M71S4
	0,09	0,11	20504	0,98	14907		
	0,09	0,11	22504	0,89	16361	★	
	0,11	0,13	17577	1,1	12504		D.188-Z48-M71S4
	0,13	0,16	15556	1,3	11066	★	
	0,15	0,18	12703	1,6	9037	★	
	0,18	0,22	10889	1,8	7746		
	0,2	0,24	9851	2	7008	★	
	0,13	0,16	15256	0,92	10853		D.168-Z48-M71S4
	0,14	0,17	13803	1	9819	★	
	0,15	0,18	12741	1,1	9064		
	0,18	0,22	11078	1,3	7881	★	
	0,19	0,23	10059	1,4	7156		
	0,21	0,25	9185	1,5	6534	★	
	0,23	0,28	8427	1,7	5995		
	0,25	0,3	7764	1,8	5523	★	
	0,28	0,34	7051	2	5016		
	0,21	0,25	9278	0,86	6600		D.148-Z38-M71S4
	0,24	0,29	8190	0,98	5826		
	0,26	0,31	7388	1,1	5256		
0,29	0,35	6701	1,2	4767			
0,32	0,38	6105	1,3	4343			
0,35	0,42	5583	1,4	3972			
0,39	0,47	4993	1,6	3552			
0,43	0,52	4584	1,7	3261			
0,47	0,56	4131	1,9	2939			
0,33	0,4	5894	0,87	4193		D.128-Z38-M71S4	
0,37	0,44	5346	0,95	3803	★		
0,4	0,48	4871	1	3465			
0,44	0,53	4455	1,1	3169	★		
0,49	0,59	3984	1,3	2834			
0,53	0,64	3658	1,4	2602	★		
0,59	0,71	3296	1,5	2345			
0,69	0,83	2827	1,8	2011	★		
0,69	0,83	2835	1,8	2017	★		
0,77	0,92	2527	2	1798			
0,53	0,64	3672	0,84	2612		D.108-Z38-M71S4	
0,6	0,72	3229	0,96	2297			
0,69	0,83	2828	1,1	2012			



Motor	Z18 / D18		Gewicht/Weight				
	k	kB	AC	AD	XC	Z18	D18
M71	330	374	138	118,5	2xM20x1,5	10	10
M71MP	345	400	138	118,5	2xM20x1,5	12	12

© DIN 332

© Paßfeder / -nut DIN 6885  
Key / Keyway DIN 6885

## APENDICE L

**Cuadro 31: Costos de consumo de energía eléctrica\* (US\$ por Kwh)**

Categorías	Quito	Guayaquil	Cuenca
<b>Servicio residencial:</b>			
Bloques de consumo (9 escalas)	0.068 a 0.089	0.068 a 0.093	0.081 a 0.114
<b>Comerciales:</b>			
0-300 Kwh	0.061	0.062	0.072
Superior	0.084	0.090	0.099
<b>Industrial artesanal:</b>			
0-300 Kwh	0.052	0.054	0.063
Superior	0.084	0.090	0.099
<b>Alta tensión: (voltaje 40 KV)</b>			
de 07h00-22h00	0.051	0.046	0.620
de 22h00-07h00	0.045	0.041	0.560
* En cada planilla se añade el cargo de US\$1.414 por comercialización. En Guayaquil este valor sube hasta US\$7.066 en consumo superiores a 300 Kwh			

Fuente: CONELEC

**Cuadro 32: Costos adicionales de energía eléctrica (cargo por planilla, US\$ y %)**

Alumbrado Público	Quito	Guayaquil	Cuenca
Servicio residencial	8.4%	3% a 7%	14%
Comerciales	9.2%	6%	18.5%
Industrial / Artesanal	6.1%	6%	3.5%
<b>Recolección de basura</b>			
Servicio residencial	10%*	4.5% a 12.5%	US\$0.0934
Las demás categorías	10%	12.5%	US\$1.4013
<b>Seguro contra incendios</b>			
Residencial	US\$0.75**	0.5%	US\$0.75
Comercial	US\$2.25**	1.5%	US\$2.25
Pequeña industria	US\$4.50**	3%	US\$4.50
Industrial	US\$9.00**	6%	US\$9.00
<b>Fondo de Electrificación Rural-Marginal (FERUM)</b>			
Servicio residencial	exento	exento	exento
Industrial, comercial	10%	10%	10%
<b>Subsidio Solidario</b>			
Residencial (mayor a 161 kwh/mes en Quito)	10%		
* Más tasa adicional que va de US\$0.57 a US\$1.177 para consumos superiores a 51 Kwh. ** Valor para Cuerpo de Bomberos más tasa de seguro contra incendio por consumos superiores a 100Kwh, que va de US\$0.0047 a US\$0.0141. En Guayaquil esta tasa va de US\$0.0047 a US\$0.0094			

Fuentes: Empresas eléctricas que sirven a las ciudades indicadas

## APENDICE M

### Resumen de cálculos realizados

Masa de cada componente	
Elemento	Masa[Kg/Botella]
PVC	$9,73 \times 10^{-3}$
PET	$8,13 \times 10^{-2}$
AGUA	3,5
AIRE	$1,12 \times 10^{-3}$

Flujo Masico de cada componente	
Elemento	Masa[Kg/s]
PVC	$8,11 \times 10^{-3}$
PET	$67,75 \times 10^{-3}$
AGUA	2,915
AIRE	$935 \times 10^{-6}$

Distribución de Temperatura de Botella	
Elemento	Temperatura [°C]
PVC	65
PET	63,85
AGUA	27,04
AIRE	32,15

Requerimiento de Calor	
Elemento	Calor[W]
PVC	372,79
PET	3120,44
AGUA	428,24
AIRE	4,86
TOTAL	3926,33

PERDIDAS		Temperaturas [°C]			CALOR [W]
		PLANCHA INTERIOR	AISLANTE	PLANCHA EXTERIOR	
	PAREDES	200,44	124,83	49,21	123,72
	TECHO	203,91	126,04	48,17	67,66
	CADENA TRANSPORTADORA	73,19			341,45
	TOTAL				532,83

**APENDICE N**  
**Efectos nocivos de la exposición al CO<sub>2</sub>**

%CO <sub>2</sub>	EFFECTOS
0.5-1.9	Afecta al balance electrolítico del cuerpo
2	Mareos y dolores de cabeza moderados
3	Muchos dolores de cabeza
5	Depresión mental
6	Defectos visuales
10	Inconciencia

**APENDICE O**  
**Normas de Seguridad Concernientes al equipo basado en Norma  
Técnica Ecuatoriana INEN 2260**

- La mayoría de los proveedores de estas piezas venden sus productos en medidas definidas de antemano, deberá entonces seleccionar el diámetro inmediato superior al teórico.
- No se debe permitir la instalación cercana a tuberías de otros tipos de gases (oxígeno, hidrógeno, acetileno, etc.)
- No se debe permitir el paso de las tuberías por los ductos de gases quemados, ductos de ventilación, tubos de evacuación de basuras, huecos de ascensores o montacargas, locales de recipientes y depósitos de combustibles líquidos, tubería de vapor, agua caliente o cables eléctricos.
- Los recipientes deben ser instalados en el exterior de edificios, sean estos portátiles, reemplazados por recambio (cilindros de 45 kg) o instalados de modo permanente (tanques) y recargados de gas combustible en la instalación.
- Los cilindros de 45 kg de capacidad deben asegurarse en forma vertical.
- Conexión a tierra: Todo tanque de gas combustible, ubicado sobre la superficie, debe estar conectado a tierra por medio de un cable de

cobre desnudo de 35 mm<sup>2</sup> de sección y una pica de acero galvanizado.

La resistencia de puesta a tierra debe ser inferior a 20 ohmios.

- Estas instalaciones deberán colocar un extintor de polvo químico seco de, por lo menos, 10 kg. de capacidad y, un letrero con la leyenda "PELIGRO GAS INFLAMABLE".

# BIBLIOGRAFIA

1. INCROPERA FRANK P, Fundamentos de Transferencia de Calor, Cuarta Edición, Prentice Hall, México, 1996.
2. GUERRERO A. ARTURO F, "Adaptación de un Quemador para Cocinas a Gas en la Empresa Mabe Ecuador" (Tesis, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2002)
3. CANTOS M. MARIA ELISA, "Rediseño de un Molino para Plásticos de Construcción Nacional" (Tesis, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2005)
4. MAYANCELA C. RONALD E, "Diseño de un Túnel de Termocontracción para películas Termoencogibles usado en el Embalaje de Productos" (Tesis, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2004)
5. SHIGLEY JOSEPH E, Diseño en Ingeniería Mecánica, Quinta Edición, McGraw-Hill, México, Septiembre de 1990.
6. ROMERO CH. ALVARO B, "Diseño de una Máquina llenadora Lineal para Botellas Tipo Pet" (Tesis, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2005)
7. [www.flender.com](http://www.flender.com)
8. [www.isamar.com](http://www.isamar.com)
9. [www.matweb.com](http://www.matweb.com)



10. [www.profilex.com](http://www.profilex.com)

11. [www.rexnord.com](http://www.rexnord.com)

12. [www.siemens.com.co](http://www.siemens.com.co)