

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“REDISEÑO Y ADECUACIÓN DE UN HORNO DE SECADO
PARA EL PROCESO DE PINTADO EPÓXICO DE MULTIPLACAS
CON UNA TEMPERATURA A 170 °C, PARA LA EMPRESA
NOVACERO ACEROPAXI”**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

PAULO SANTIAGO GONZÁLEZ CUMBA

DIRECTOR: ING. ERNESTO SORIA.

CODIRECTOR: ING. JOSÉ PÉREZ.

Sangolquí, junio del 2005

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DE PROYECTO

El proyecto **“REDISEÑO Y ADECUACIÓN DE UN HORNO DE SECADO PARA EL PROCESO DE PINTADO EPÓXICO DE MULTIPLACAS CON UNA TEMPERATURA A 170 °C, PARA LA EMPRESA NOVACERO ACEROPAXI”** fue realizado en su totalidad por el Sr. Paulo Santiago González Cumba, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Ing. Ernesto Soria
DIRECTOR

Ing. José Pérez.
CODIRECTOR

Sangolquí, 2005- 06 - 13

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

“REDISEÑO Y ADECUACIÓN DE UN HORNO DE SECADO PARA EL PROCESO DE PINTADO EPÓXICO DE MULTIPLACAS CON UNA TEMPERATURA A 170 °C, PARA LA EMPRESA NOVACERO ACEROPAXI”

ELABORADO POR:

Paulo Santiago González Cumba

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

Mayor. Ing. Hugo Ruiz

DECANO

Sangolquí, 2005- 06 - 13

DEDICATORIA

Dedicado a mi esposa,
padres, hermanos y
sobrinos, por ser
las personas
más importantes
en mi vida.

AGRADECIMIENTO.

Quiero dejar mi más sincero agradecimiento a la Escuela Politécnica del Ejército, especialmente a los docentes de la facultad de Ingeniería Mecánica quienes me brindaron sus conocimientos y valores. Al Ing. Ernesto Soria y al Ing. José Pérez, siendo los colaboradores directos de este proyecto.

Quiero también expresarles un enorme agradecimiento a la empresa NOVACERO ACEROPAXI S.A., a su Gerente General, el Sr. Ing. Ramiro Garzón, por seguir creyendo en el potencial de los jóvenes de este país. Por último, de manera muy especial al Sr. Ing. Mauricio Franco quién estuvo evidenciando y apoyando día a día el desarrollo de este proyecto en dicha empresa.

*La valentía de empezar y la voluntad de seguir siempre
son los requisitos para el éxito. (Benn)*

Índice de Contenido.

Nomenclatura utilizada	23
I. Generalidades	29
1.1 Introducción	29
1.2 Antecedentes	30
1.3 Objetivo general	31
1.4 Objetivos específicos	32
1.5 Justificación	32
1.6 Alcance	35
II Descripción del proceso de pintado epóxico	37
2.1 Horno de secado	38
2.2 Pre – tratamiento	39
2.2.1 Desengrasado	42
2.2.2 Decapado	42
2.2.3 Fosfatizado	43
2.2.4 Enjuague	44
2.3 Carga y descarga	44
2.4 Proceso de secado	44
2.4.1 Cabina	45
2.4.2 Cámara de transferencia de calor	45
2.4.3 Chimenea	45
2.5 Proceso de pintado	46
2.5.1 Cabina	46
2.5.2 Pistolas del pintado electrolítico	46
2.5.3 Polvo	47
2.6 Ciclones	50
2.6.1 Principio del funcionamiento	50
2.7 Proceso de curado	51

III Análisis y diagnóstico del proceso de secado	53
3.1 Determinación de los parámetros: temperatura, espesor y velocidad de la placa y material de la misma; y puntos críticos del proceso	53
3.1.1 Parámetros y puntos críticos	54
3.2 Diagnóstico de la cámara de combustión	57
3.2.1 Hogar	58
3.2.2 Arreglo de tubos	59
3.2.3 Cámara de transferencia de calor o carcasa de la cámara de combustión	60
3.3 Determinación de la capacidad del quemador	61
3.4 Sistema de recirculación de flujos	62
3.4.1 Parte crítica	62
3.5 Determinación de la capacidad del ventilador	63
3.5.1 Parte crítica	63
3.6 Estudio de las cortinas de aire	64
3.7 Selección de maquinaria y tecnología	66
IV Diseño Térmico	67
4.1 Análisis energético del horno secado	67
4.1.1 Análisis termodinámico y de transferencia de calor	71
4.1.2 Cálculo de la temperatura del interior del horno de secado	74
4.1.3 Análisis del calor necesario para calentar la placa	77
4.1.4 Análisis del calor por combustión	78
4.1.5 Análisis del flujo de combustible y gases de combustión	84
4.1.6 Cálculo del flujo másico del aire	90
4.1.7 Análisis de recirculación del aire	92
4.1.8 Diseño del intercambiador de calor	94
4.1.9 Diseño de chimenea	106
4.1.10 Selección de quemador	110
4.1.11 Selección del ventilador	115

V Proceso de construcción, montaje y operación	125
5.1 Proceso constructivo de la cámara de combustión	125
5.1.1 Secuencia de actividades principales	131
5.1.2 Maquinaria, herramientas, materiales y personal	133
5.1.3 Esquema de construcción	137
5.1.4 Procedimiento de soldadura	138
5.2 Montaje de la cámara de combustión	140
5.3 Montaje del quemador	146
5.4 Montaje de los ventiladores	148
5.5 Guía de operación	149
VI Pruebas y evaluación	153
6.1 Pruebas de temperatura	153
6.2 Cálculo de la eficiencia térmica y de la combustión	155
6.3 Inspección preliminar del proceso	157
6.4 Inspección producto pintado	158
6.5 Calificación del producto	160
VII Análisis económico financiero	161
7.1 Inversión en equipos y materiales	161
7.2 Inversión en la construcción y montaje	162
7.3 Inversión total	162
7.4 Depreciación y recuperación de la inversión	163
7.4.1 Cálculo del TIR y el VAN, relación Costo – beneficio	166
VIII Conclusiones y recomendaciones	169
8.1 Bibliografía	173
8.2 Anexos	175
8.3 Planos constructivos	255

Índice de Figuras

Fig. 1.1 Esquema del proceso de pintado epóxico	34
Fig. 2.1 Esquema del proceso de pintado epóxico	38
Fig. 2.2 Diagrama de pre – tratamiento.	40
Fig. 3.1 Gráfico de arreglo de tubos y hogar	57
Fig. 3.2 Diagrama de producción de la cámara de transferencia de calor	61
Fig. 3.3 Esquema de las cortinas de aire (vista Frontal)	65
Fig. 3.4 Esquema de las cortinas de aire (vista lateral)	65
Fig. 4.1 Diagrama de flujo de calor en el horno de secado.	69
Fig. 4.2 Diagrama de flujo de calor en la cámara de transferencia de calor.	69
Fig. 4.3 Gráfico de dirección de flujo del aire en la cámara de transferencia de calor	72
Fig. 4.4 Gráfico de circulación del aire.	74
Fig. 4.5 Pérdidas de fronteras.	87
Fig. 4.6 Parte del ducto de circulación de aire caliente (vista frontal)	93
Fig. 4.7 Parte del ducto de circulación de aire caliente (vista lateral)	94
Fig. 4.8 Arreglo de tubos en un banco.	98
Fig. 4.9 Descripción de partes de los ductos de recirculación	119
Fig. 5.1 Rolado de placa de hogar.	127
Fig. 5.2 Esquema de arreglo de tubos.	127
Fig. 5.3 Esquema de radio de curvatura del lado de prensa de 400 Ton.	129
Fig. 5.4 Ubicación del intercambiador de calor.	129
Fig. 5.5 Configuración de máquinas y sistemas de la cámara de Transferencia de calor	130
Fig. 5.6 Esquema del desarmado.	143
Fig. 5.7 Perfiles construidos en planta.	144
Fig. 5.8 Ubicación frontal de carcasa de cámara de transferencia de calor	145

Fig. 5.9 Ubicación lateral de carcasa de cámara de transferencia de calor.	145
Fig. 5.10 Esquema del quemador	147
Fig. 5.11 Diagrama de ventiladores	148
Fig. 5.12 Esquema de ventiladores	149
Fig. 5.13 Esquema de encendido del tablero.	151
Fig. 5.14 Esquema de apagado del tablero.	152
Fig. 6.1 Esquema de medición por medio del termógrafo.	154

Índice de Tablas.

Tabla 1.1 Descripción del proceso de pintado epóxico	34
Tabla 2.1 Estado de proceso en el pintado epóxico.	37
Tabla 2.2 Datos de cubas en el pre – tratamiento	41
Tabla 2.3 Resistencia a los productos químicos.	49
Tabla 4.1. Cálculo de entalpías de los reactantes y productos	82
Tabla 4.2. Entalpías de productos del aire (1075°K).	83
Tabla 4.3. Entalpías de productos del aire (1495°K).	84
Tabla 4.2 Propiedades de los gases de combustión.	96
Tabla 5.1 Características de electrodo utilizados en la construcción	139
Tabla 5.2 Características del alambre utilizado en la construcción.	140
Tabla 5.3 Pesos de materiales para construcción.	141
Tabla 5.4. Indicadores de operaciones en tablero.	150
Tabla 7.1. Inversión total.	163
Tabla 7.2. Depreciación.	164
Tabla 7.3. Costo de producción en el proceso de pintado epóxico del 2003.	165
Tabla 7.4. Costo de producción en el proceso de pintado epòxico del 2004.	165
Tabla 7.5. Datos económicos del proceso.	166
Tabla 7.6. Flujo neto de caja.	167
Tabla 7.7. Flujo neto de caja.	168
Tabla 7.8. Flujo neto de caja	168
Tabla 7.8. Cálculo del TIR.	169

Nomenclatura Utilizada

Mayúsculas

C1	Constante para flujo de aire sobre un banco de tubos de diez o más líneas.
C2	Factor correlación cuando el número de filas en el arreglo de tubos es menor a diez.
F	Factor de corrección para un intercambiador de calor de un solo paso en flujo cruzado con un fluido mezclado y el otro sin mezclar.
L	Longitud del conducto en m.
M	Constante para flujo de aire sobre un banco de tubos de diez o más líneas.
D	Diámetro del ducto.
TIR	Tasa interna de retorno.
VAN	Valor actual neto.
U	Coefficiente global de transferencia de calor.
SL	Distancia longitudinal de los tubos más cercanos.
ST	Distancia en diagonal de los tubos más cercanos.

Minúsculas

hair@15 °C	Coefficiente de convección del aire a 15°C.
hair@170°C	Coefficiente de convección del aire a 170 °C.
t enfriamiento	Tiempo de enfriamiento.
t calentamiento	Tiempo de calentamiento.
ap	Ancho de placa.
lp	Largo de placa.
ep	Espesor de placa.

\bar{h}_f°	Entalpía de formación.
$h_{t298^\circ K}$	Entalpía sensible en el estado especificado 15°C la cual es la temperatura del aire.
$h_{t288^\circ K}$	Entalpía sensible en el estado de referencia estándar de 25°C y 1 atm.
$h_{t754^\circ K}$	Entalpía sensible en el estado especificado 556°C la cual es la temperatura de salida de los gases.
m_{diesel}	Masa de diesel.
$m_{gases\ de\ combustión}$	Masa de gases de combustión del diesel.
h_{ac}	Coeficiente de transferencia de calor por convección del acero.
h_{af}	Coeficiente de transferencia de calor por convección de la lana de vidrio.
k_{fv}	Coeficiente de transferencia de calor por conducción de la lana de vidrio.
k_a	Coeficiente de transferencia de calor por conducción del acero.
q_x	Calor de pérdida por frontera.
m_{acero}	masa de acero.
m_{cabina}	Masa de acero que existe en la cabina.
$m_{cámara\ de\ transferencia\ de\ calor}$	Masa de acero que existe en la cámara de transferencia de calor.
$flujo\ de\ Diesel$	Cantidad de galones que se queman por hora.
m_{gcomb}	masa de gases de combustión.
m_{aire}	masa de aire necesario para los ventiladores.
$flujo\ de\ aire$	Cantidad de CFM necesaria para los dos ventiladores.
k_g	Conductividad térmica de los gases.
A_t	Área de tubos.
h_{comb}	coeficiente de transferencia de calor de los gases de combustión.
h_{aire}	Coeficiente de transferencia de calor del aire.
q_g	Caudal de gases de la chimenea.
g	Gravedad.

fch	Factor de rozamiento.
f	Rugosidad de la superficie interior.
d	Diámetro del conducto circular equivalente a otro rectangular.
V	Velocidad del aire en m/s.
x	Factor de correlación.
n	Factor de velocidad.
hv	diferencia de presión dinámica.

Mixtas

Aplaca	Área de placa.
Vel placa	Velocidad de placa.
L _{etapa de enfriamiento}	Longitud de la etapa de enfriamiento.
L _{etapa de calentamiento}	Longitud de la etapa de calentamiento.
T _{enfriamiento}	Temperatura de enfriamiento.
T _{calentamiento}	Temperatura de calentamiento.
Bi	Número de Biot.
C _p acero	Calor específico del acero.
N _{placa}	Número de placas.
T _{oplaca}	Temperatura de salida de la placa.
T _{iplaca}	Temperatura de entrada de la placa.
V _{placa}	Velocidad de la placa.
M _{placa}	Masa de la placa.
M _{tplaca}	Masa total de las placas en una hora.
Q _{pplaca}	Calor para calentar las placas de una hora.
C _c	Calor de combustión del Diesel Kj/Kg.
T _{amb}	Temperatura ambiente.
P _{maire}	Peso molecular del aire.
P _{aire}	Presión del aire.
P _{sat@15°C}	Presión de saturación a temperatura (15°C).
N _{total}	Número de moles del aire.

$P_{\text{v aire}}$	Presión parcial de la humedad en el aire.
$N_{\text{v aire}}$	Número de moles de aire en el aire.
AC_{real}	Relación aire combustible real.
$AC_{\text{estequiométrica}}$	Relación aire combustible estequiométrica.
$H_{\text{productos}}$	Sumatoria de entalpías de productos.
$H_{\text{reactivos}}$	Sumatoria de entalpías de reactivos.
H_{total}	Sumatoria total de entalpías.
H_{promedio}	Entalpía promedio.
$T_{\text{flama adiabática}}$	Temperatura de flama adiabática.
$Q_{\text{combustión}}$	Calor de combustión.
$Q_{\text{gases de combustión}}$	Calor de los gases de combustión.
C_{pg}	Poder calórico de los gases de combustión.
T_{sh}	Temperatura de salida de los gases de combustión del horno.
A_{horno}	Área del horno.
A_{cabina}	Área de la cabina.
$A_{\text{cámara de transferencia de calor}}$	Área de la cámara de transferencia de calor.
L_{a}	Largo del acero.
L_{fv}	Largo de la lana de vidrio.
T_{aire}	Temperatura de salida del aire.
T_{aire}	Temperatura de entrada del aire.
T_{igcomb}	Temperatura entrada de los gases de combustión.
$Q_{\text{masa aire}}$	Calor necesario para calcular masa de aire.
T_{ogcomb}	Temperatura salida de los gases de combustión.
T_{igcomb}	Temperatura de entrada de los gases de combustión.
G_{t}	Velocidad de gases de combustión.
Re_{comb}	Número de reynolds de los gases de combustión.
D_{i}	Diámetro del interior de los tubos de acero inoxidable.
Pr_{comb}	Número de prandt de los gases de combustión.
K_{pg}	Conductividad térmica de los gases de combustión.
Nu_{comb}	Número de Nusselt de gases de combustión.
D_{h}	Diámetro nominal de los tubos.
S_{d}	Distancia diagonal de los tubos más cercanos.
H_{tubos}	Altura de arreglo de los tubos.

Nspecies	Número de espacios entre filas de tubos.
Ltubo	Longitud del tubo.
Vaire	Velocidad del aire a través del paso de los tubos.
Apaire	Área del paso de aire.
De	Diámetro exterior del tubo.
Vmax	Velocidad máxima en el recorrido del aire.
Nuaire	Número de Nusselt del aire.
Reaire	Número de reynolds del aire.
Praire	Número de prandt del aire.
Nt	Número de tubos por paso.
Cmax	Capacitancia máxima.
Qmin	Transferencia de calor mínima.
Cmin	Capacitancia mínima.
Qmax	Transferencia de calor máxima.
Cr	Relación de capacidad de calor.
Nut	Número de unidades de transferencia de calor.
Atn	Área de transferencia de calor.
Hint calor	Altura de intercambiador de calor.
A flujo aire	Área de flujo del aire.
P	Tiro disponible (diferencial de presión).
Pc	Carga de velocidad a la salida.
Pf	Pérdidas por rozamiento.
Pb	Pérdidas totales debidas a las curvaturas y cambios de sección.
Tg	Temperatura media de los gases de la chimenea.
Hch	Altura de la chimenea por encima de la entrada.
D	Diámetro del ducto.
Vg	Velocidad de gases de combustión.
Ach	Area disponible.
Pr	Perdida rozamiento.
Dch	Diámetro de la chimenea.

Símbolos.

δ_{acero}	Densidad del acero.
ΔT_p	Variación de temperatura de las placas.
ϕ_{aire}	humedad relativa.
$\Sigma Q_{\text{entrada}}$	Sumatoria de calores de entrada.
ΣQ_{salida}	Sumatoria de calores de salida.
<u>$C_{\text{aire}@t}$</u>	Poder calórico del aire a cierta temperatura.
μ_g	Viscosidad de los gases dinámica.
δ_g	Densidad de los gases.
ν	Viscosidad cinemática de los gases.
δ_{aire}	Densidad del aire.
ΔT_{ml}	Diferencia de temperatura media logarítmica.
ε	eficiencia del intercambiador de calor.
δ_{mcomb}	Densidad de los gases de combustión.
Δp	Caída de presión.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

El presente proyecto detalla el rediseño y la adecuación que se realiza al horno de secado del proceso de pintado epóxico en la empresa NOVACERO ACEROPAXI. La optimización de este horno tendrá como principal objetivo su

sistema de producción de calor, el sistema de transferencia calor y el sistema de transmisión de flujo del aire caliente hacia la cabina, para por último calentar la placa.

Para lograr esta optimización se ha hecho un diagnóstico del funcionamiento de los siguientes sistemas: quemador, hogar, tubos de gases de hogar o intercambiador de calor, cortinas de aire, ventilador y los aparatos para la recirculación de aire caliente. Este diagnóstico permitió descartar o no el uso de los aparatos que se encontraban en el horno antes del proyecto. Esto dio también una opción de disminuir costos para la empresa.

Luego de este diagnóstico se empezará con el análisis energético del horno de secado, logrando recolectar la mayor información posible para entrar en el rediseño propiamente dicho.

Este rediseño se realizará partiendo de la información previamente obtenida por el personal técnico de la empresa, y con el análisis realizado durante el desarrollo de los capítulos 2 y 3.

La transferencia de calor que se produce en la carcasa de la cámara de combustión debe lograr el objetivo de llegar a una temperatura de 170 °C en la cabina del horno. Dicha transferencia de calor va a depender del buen diseño logrado, y con la información del diseño realizar la apropiada selección de los aparatos a implementarse.

La adecuación del horno será analizada en el capítulo 5 donde se determinará cual es el método de trabajo más óptimo para la instalación de los diferentes aparatos e instrumentos, de acuerdo a sus especificaciones.

Las pruebas del horno serán controladas en base a los parámetros que necesita la empresa, para cumplir con las condiciones de funcionamiento, tales como: gases de combustión emitidos, niveles de consumo de combustible, calidad de producto, etc.

Al final se realiza el análisis económico financiero del proyecto, determinando cuanto invirtió la empresa y que porcentaje de mejora se obtuvo en el proceso de pintado epóxico.

1.2 ANTECEDENTES

Actualmente NOVACERO ACEROPAXI no puede cumplir con el proceso de pintado epóxico, ya que la temperatura del horno de secado no tiene la capacidad de generar una temperatura de 140°C en la placa, por lo tanto se debe realizar el proceso de secado y curado en el horno de curado, como consecuencia el producto recorre un primer ciclo para realizar el secado y pintado, y un segundo ciclo para realizar el curado, completando así el proceso. Hay que tomar en cuenta que al momento el proceso se encuentra adaptado para su funcionamiento; esta adaptación incluye la traslación de la cámara de pintado hacia la boca de salida del producto SECADO-CURADO.

Por lo expuesto anteriormente, NOVACERO ACEROPAXI, empresa que está a la vanguardia, ha decidido realizar las adecuaciones necesarias para cumplir con el diagrama de proceso, acompañado de un control de calidad estricto y funcional.

Una de estas adecuaciones, es el horno de secado para el proceso de pintado epóxico, cuya reingeniería se presenta como tema de este proyecto para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Para poder cumplir con el producto epoxicado, es necesario realizar el proceso de la siguiente manera: Se produce dos pasos por toda la cadena de proceso, ocupando solo el horno de curado, para realizar las dos fases de curado y secado, obviamente se está trabajando a un ritmo nada productivo para la empresa, pues el tiempo muerto de la producción ha aumentado; y se está desperdiciando energía, ya que el horno de curado, de acuerdo al consumo de diesel y electricidad en el caso de los ventiladores, es mayor consumidor de

energía, situación que disminuirá notablemente con la rehabilitación del horno de secado.

Los resultados que espera lograr la empresa NOVACERO ACEROPAXI, con la implantación de este proyecto se resumen a continuación:

- Obtener una temperatura en el horno de 170°C.
- Lograr una eficiente recirculación de aire caliente.
- Incrementar el porcentaje de aprovechamiento de la llama del quemador.
- Lograr una mejor utilización del calor a través del diseño de la cámara de combustión.
- Incrementar la productividad con el mejoramiento del proceso.

1.3 OBJETIVO GENERAL

Rediseñar y adecuar el horno de secado del proceso de pintado epóxico para tener la capacidad de calentar multiplacas a una temperatura de 170 °C, logrando ser eficiente tanto en su funcionamiento como en su consumo energético .

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- ❖ Analizar los parámetros necesarios para el buen funcionamiento del horno y por ende del proceso de pintado epóxico.
- ❖ Estudiar el diseño óptimo de la cámara de combustión, aprovechando la acción del quemador, sus ventiladores y la recirculación de gases.
- ❖ Cuantificar el porcentaje de productividad y la disminución de costos de producción, a través de un análisis térmico económico del horno de secado rediseñado.

- ❖ Evaluar las condiciones de funcionamiento del horno de secado reconstruido con relación a las condiciones que requiere la empresa.

1.5 JUSTIFICACIÓN

El interés de la empresa de mejorar al máximo sus procesos, tiene como prioridad el proceso de pintado epóxico, constituyendo el punto crítico el proceso de secado. Por consiguiente la reingeniería del horno de secado, acompañado de un análisis técnico y económico del costo de la misma, es necesario.

El horno de secado actualmente esta calentando a una temperatura de 105 °C y la temperatura en la placa es de 80 °C; el requerimiento en el proceso de secado, es de 170 °C en el horno de secado, para obtener alrededor de 140 °C en la placa, para que esta ingrese a la cabina de pintado con 110 °C. La misma que tiene un espesor máximo de 3,5 mm, y una velocidad máxima de 13 mm/s.

El horno cumple un papel muy importante a la hora de producirse el pintado epóxico, llega a una temperatura a la cual se produce su primer objetivo, evaporar los residuos de agua una vez que la placa haya pasado por el fosfatizado, y como segundo objetivo, permitir una mejor adherencia del polvo epóxico para llegar a una capa de 150 micras.

En el ámbito económico debemos considerar los costos de producción y el nivel de productividad. En los costos de producción están, el consumo de energía eléctrica y calórico (Diesel) y la mano de obra, estos costos alcanzan aproximadamente el 200%, en comparación a lo que requiere este proceso en óptimas condiciones. Los gastos que se registraron en el 2003 fueron los siguientes.

Mano de obra	3572 USD
Energía eléctrica	1578 USD
Combustible	4364 USD
TOTAL	9514 USD

Fuente: NOVACERO ACEROPAXI

Lo que quiere decir que el ahorro sería aproximadamente de 3000 USD por año solo en costos de producción, una vez que entre en funcionamiento el horno de secado. Adicionalmente los tiempos de producción se estima se reducirían aproximadamente a la mitad, lo cual permitirá una atención rápida y oportuna a los clientes.

Por otra parte el costo de materia prima, se reduciría principalmente por el ahorro del polvo epóxico, pues este se disminuirá en un 15% al año, estos datos fueron facilitados del departamento de control de calidad. Es importante señalar que en polvo, se gasta 35000 USD/año, esto quiere decir un ahorro de aproximadamente 5250 USD/año.

Cuantificando estos ahorros daría un total de aproximadamente 8250 USD/año. Por lo tanto considerando la inversión del proyecto que asciende a 12500 USD, ésta se recuperaría cerca de 3 años.

PROCESO DE PINTADO EPÓXICO

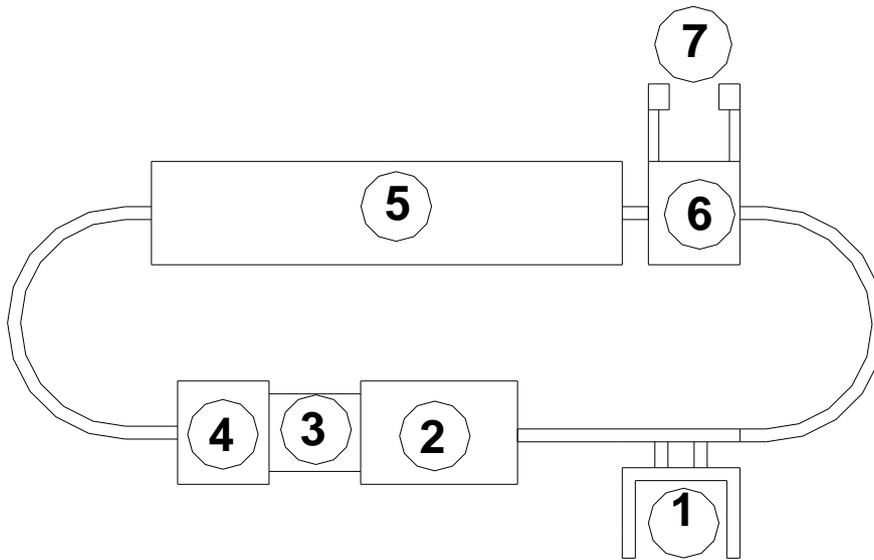


Fig. 1.1 Esquema del proceso de pintado epóxico.

Tabla.1.1 Descripción del proceso de pintado epóxico

Número	Proceso	Funcionamiento
1	Carga y Descarga	Si
2	Horno de Secado	No
3	Cámara de Transición	No
4	Cabina de Pintado	No
5	Horno de Curado	Si
6	Cabina de Pintado	Si
7	Ciclones	Si

Fuente: Novacero Aceropaxi

Como se puede observar la reingeniería de este horno es muy importante, pues su implementación dará como resultado la adecuación del horno con su

nuevo diseño. Logrando con esto la optimización de todo el proceso de pintado epóxico.

Una empresa como NOVACERO ACEROPAXI, debe realizar sus procesos con eficiencia y eficacia para lograr una mayor productividad; y un servicio en excelencia.

Construir un nuevo horno de secado sería una alternativa, pero todas las instalaciones existentes se re-ubicarían, elevando el costo significativamente para la empresa.

1.6 ALCANCE

El presente proyecto tiene por alcance rediseñar y adecuar el horno de secado del proceso de epóxico para llegar a una temperatura de 170 °C en la cabina del horno. Por tanto la cámara de combustión, el ventilador de entrada de aire a la cámara, el quemador con su respectivo hogar y tubos de pasos de los gases de combustión, las cortinas de aire y la recirculación de aire caliente; todos serán sistemas a los cuales se los realizará un estudio de funcionamiento y alternativas tomando en cuenta los parámetros y puntos críticos para llegar a un excelente funcionamiento del horno.

CAPITULO 2

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE PINTADO EPÓXICO

El proceso de pintado epóxico es un recubrimiento que posee excelentes ventajas físico-químicas, se aplica a superficies metálicas. La empresa NOVACERO ACEROPAXI aplica a sus productos denominados placas, o multiplacas de alcantarillado, los cuales van a estar funcionando en condiciones de alta conductividad, es decir que el ambiente contiene sustancias que son conductores eléctricos.

Por ser alcantarillas deben estar bajo el nivel del suelo, es por eso que su utilización generalmente se la realiza en el oriente o en la costa, sitios donde existe alta salinidad en sus suelos. Este tipo de recubrimiento no es aplicable cuando su funcionamiento será con caudales abrasivos.

Para lograr el pintado epóxico se debe seguir un proceso compuesto por: pre-tratamiento, carga y descarga, proceso de secado, pintado epóxico y proceso de curado. Cada uno de estos procesos tiene sus parámetros de funcionamiento.

Tabla 2.1. Estado de Procesos en el Pintado epóxico.

Proceso	Número Asignado	En funcionamiento
Carga y descarga	1	Si
Horno de secado	2	No
Cabina de transición	3	No
Cabina de Pintado	4	No
Horno de Curado y de Secado (temporalmente)	5	Si
Cabina de Pintado	6	Si
Ciclones	7	Si

Fuente: Inspección en planta.

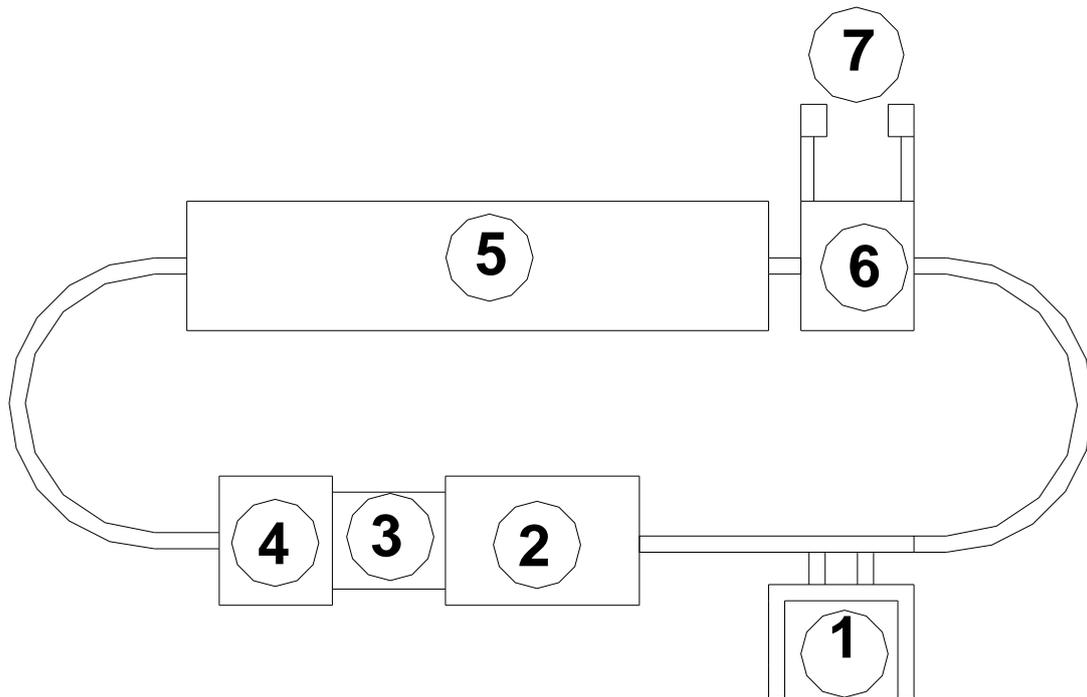


Fig. 2.1 Esquema del proceso de pintado epóxico antes del rediseño.

Primero se empezará con una revisión global de lo que son los hornos de secado en la industria, luego veremos cada uno de los procesos para el pintado.

2.1 HORNOS DE SECADO.

Los hornos para calentamiento se clasifican ordinariamente según: 1) el fin para el cual se calienta el material; 2) la naturaleza de la transmisión de calor al material; 3) el modo como se calienta el horno, y 4) el método de manipulación del material a través del horno.

En este caso el fin de calentamiento es para secado como su nombre lo indica. La naturaleza de la transmisión de calor al material se da por convección forzada, lo que quiere decir que el aire caliente es impulsado por ventiladores. El horno es calentado por medio de combustión de diesel, y su llama es indirecta, lo que quiere decir que existe una cámara de combustión.

El método de manipulación del material es continuo, por lo que se alimenta al horno continuamente de placas. Los hornos de secado son utilizados en diferentes ámbitos de la industria. El tipo de cabina es adaptado de acuerdo a su aplicación.

Como sectores de aplicación tenemos el sector metal-mecánico, el sector alimenticio, el sector maderero e incluso en el sector textil. Cabe recalcar que los hornos de secado cada vez con mayor frecuencia se utilizan, pues las investigaciones siempre descubren diferentes tipo de procesos.

Su trabajo es secar, en este caso placas, por obtener cierto tipo de humedad en su superficie, y el principio es igual para las demás aplicaciones, en la madera de igual manera, se calienta para disminuir la humedad de la misma, dependiendo de su aplicación, y así en todos los sectores de uso del calor para secar cualquier tipo de objeto.

2.2 PRE – TRATAMIENTO.

El pre-tratamiento consiste en un proceso de limpieza, en el cual se remueve la suciedad, herrumbre y el óxido natural de la superficie del acero; y de recubrimiento, obteniendo una capa de fosfato de zinc. Las superficies metálicas que han recibido este pre-tratamiento cumplirán posteriormente con procesos tales como Galvanizado y Pintado Epóxica.

La empresa, NOVACERO ACEROPAXI, cuenta con 8 piscinas o cubas que contiene distintas mezclas necesarias para el proceso. El mismo se lo realiza por inmersión en caliente, ya que las mezclas contenidas en las cubas son calentadas a temperaturas específicas para su función y mezcla.

La utilización de las cubas es muy importante, en ellas se sumerge a las piezas que serán pre-tratadas. Estas cubas contienen su respectiva mezcla dependiendo de la fase. Miden aproximadamente 3.5 X 1.8 x 4.5 metros de largo, ancho y profundidad respectivamente.

Para realizar el pre-tratamiento existen 3 fases con sus enjuagues respectivos que son: desengrasado, decapado y fosfatizado.

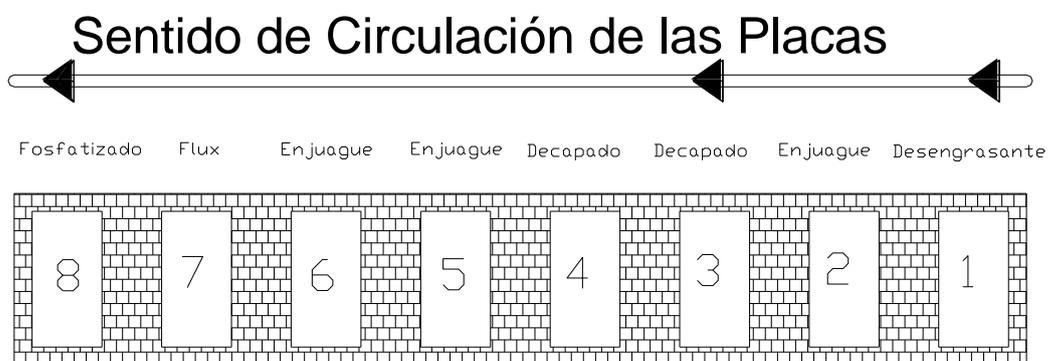


Fig. 2.2 Diagrama de pre-tratamiento.

Tabla 2.2 Datos de cubas en el pre-tratamiento

Pre – Tratamiento				
Número	Proceso	Temperatura (C)	Tiempo (min)	Post- Proceso
1	Desengrasado	66	Por Observación Visual Placa	Fosfatizado - Galvanizado
2	Enjuague	T. Amb	Por Observación Visual Placa	Fosfatizado - Galvanizado
3	Decapado	T. Amb	Por Observación Visual Placa	Fosfatizado - Galvanizado
4	Decapado	T. Amb	Por Observación Visual Placa	Fosfatizado - Galvanizado
5	Enjuague	T. Amb	Por Observación Visual Placa	Fosfatizado - Galvanizado
6	Enjuague	T. Amb	Por Observación Visual Placa	Fosfatizado - Galvanizado
7	Flux	40	Por Observación Visual Placa	Galvanizado
8	Fosfatizado	70 - 80	5	Fosfatizado

Fuente: Normas de Calidad de Novacero Aceropaxi

2.2.1 DESENGRASADO

Es la primera etapa del pre-tratamiento, en la cual al momento de la inmersión en la cuba, reacciona con la mezcla contenida, produciéndose el desengrasado.

La mezcla está compuesta por un limpiador altamente alcalino a base de un producto cáustico que es el Hidróxido de sodio, con porcentajes pequeños de silicatos, carbonatos, tenso activos, emulsificantes solubles al agua. Logrando con esta mezcla limpiar superficies de acero con grasas y aceites.

2.2.1.1 Condiciones de trabajo.

Concentración del baño: 38 a 45 puntos de alcalinidad.

Temperatura: mínimo de 66 °C

2.2.2 DECAPADO:

El objetivo de este proceso es la eliminación de la común cascarilla de óxido que se forma por naturaleza del acero, dejando al acero limpio y libre de óxido.

Un buen decapado de la superficie del acero permite obtener una óptima preparación para mejorar la adherencia de la pintura epóxica. Lo que quiere decir que el recubrimiento se apoyará en un buen decapado.

2.2.2.1 Condiciones de trabajo:

H Cl 32% (puro)

H Cl 18% mezclada con agua.

Temperatura: Temperatura ambiente

Concentración: Mínimo: 60gr. HCl / lt.

Concentración de Fe: Máximo: 120gr Fe / lt.

2.2.2.2 Uso de aditivos:

Es necesario añadir inhibidores, para que una vez que se haya eliminado el óxido de la pieza no se produzca el ataque del ácido al metal base (sobre decapado), así como evitar un consumo excesivo de ácido.

En cambio el humectante (MERPOL) forma una capa viscosa de espuma que reduce la emanación de gases y vapores ayudando a reducir la contaminación y consumo del ácido.

2.2.3 FOSFATIZADO

En esta última parte del proceso se produce un recubrimiento de fosfato de zinc, cuya función es muy importante al momento de aplicar la pintura epóxica. La pintura epóxica al ser aplicada al metal (placas) se enlaza químicamente con el recubrimiento de fosfato de zinc, logrando obtener óptimas condiciones al momento de estar en su ambiente de trabajo.

Este enlace químico se produce gracias a la siguiente mezcla:

El Pyrene 4-80 es proceso de fosfatizado de zinc calcio, modificado para tratamiento metálico de substratos ferrosos previo procesos de pintura.

También fosfatina metálica para formar un recubrimiento cristalino no-metálico resistente a la corrosión de excelentes prestaciones para pintura convencional o en polvo.

2.2.3.1 Condiciones de trabajo:

Densidad: 30 gr / lt.

Temperatura: 70 – 80 °C.

Ph: 3.8 – 4.2.

Tiempo de inmersión: 5 minutos.

Concentración:

Acidez Total: 19 – 24

Acidez Libre: 2 – 3.7

2.2.4 Enjuague

En el proceso de enjuague las placas son sumergidas en las diferentes cubas de enjuague, logrando así retirar todo líquido acumulado en las placas. Esto disminuye la mezcla de sustancias de un proceso desengrase a un proceso de decapado, o de proceso de decapado a un proceso de fosfatizado. Logrando así aumentar el tiempo de utilización de los reactivos.

2.3 CARGA Y DESCARGA.

Es el proceso en el cual se realizan la carga y descarga de las piezas. Se compone de una riel con su cadena de transportación, la cual está instalada por todo el proceso. Es regulable su velocidad de paso.

2.4 PROCESO DE SECADO.

Está compuesto por su respectivo horno, donde se realiza el secado y el precalentamiento de las piezas que serán pintadas. El secado y el precalentamiento de la pieza tienen dos objetivos en este proceso respectivamente:

- Llegar a una temperatura a la cual se pueda evaporar todo residuo líquido proveniente del pre-tratamiento, puesto que la total adherencia de la pintura depende de su completo secado.
- Obtener una mayor capa de recubrimiento, llegando a un espesor de la capa normal hasta las 100 μm , y siendo el espesor de capa deseado de 150 μm .

El proceso de secado tendrá que cumplir con los parámetros de la pintura epóxica, por ejemplo llegar a una temperatura al momento de pintar de 110 °C, la cual será suficiente para llegar a los 150 μm de recubrimiento.

El horno de secado tiene tres ambientes la cabina, chimenea y cámara de transferencia de calor.

2.4.1 Cabina

La cabina es donde se produce el intercambio de calor del horno hacia las placas, las cuales son transportadas por la cadena de carga y descarga. La cabina tiene dos accesos, el de entrada y salida.

Al no poseer puertas sólidas, ya que no es funcional por el proceso, posee unas cortinas de aire, las cuales hacen la función de conservar el calor. La cabina del horno tiene las siguientes dimensiones: Largo 7 m, altura 4.8 m y de ancho 2.4 m y un volumen de aproximadamente 43.2 m³. Sus paredes son de dos láminas de acero las cuales poseen un aislante de lana de vidrio de un espesor de 150 mm.

2.4.2 Cámara de transferencia de calor.

La cámara de combustión es donde se genera el calor para luego transferirlo a la cabina. Esta requiere de un diseño complejo ya que su funcionamiento debe ser lo suficientemente óptimo para transferir el calor necesario para llegar a la temperatura requerida en la cabina.

Posee un quemador, el cual produce el calor por medio de la combustión de diesel. Dicho calor, por medio de su hogar y su sistema de tubos, será transferido hacia el ambiente por la chimenea de gases de combustión. El hogar y su sistema de tubos están ubicados en la cámara de transferencia de calor. El fluido que transportará el calor hacia la cabina será el aire, este fluido circulará dentro de la cámara de transferencia de calor, ganando el calor que circula por el hogar y el conjunto de tubos.

2.4.3 Chimenea

La chimenea es un ducto que permite eliminar los gases producidos en la cámara de combustión. El diámetro de dicho ducto es de 300 mm. Este diámetro nos da cierta holgura al momento de cuantificar las pérdidas que se producirán en el ducto al circular los gases de combustión.

2.5 PROCESO DE PINTADO.

En este proceso se desarrolla el pintado electrostático. Donde existen varios aparatos en interacción. La cabina de pintado, las pistolas de pintado electrostático y el polvo.

2.5.1 La cabina

En nuestro caso tenemos una cabina de pintado grande ya que el pintor trabaja en su interior. Se usan para pintar piezas grandes, tales como: láminas, muebles, placas etc. En estas cabinas es frecuente el uso de dispositivos de suministro de oxígeno para facilitar la respiración del pintor.

Esta cabina está compuesta de dos aberturas grandes por las que transitan las placas que serán pintadas. También posee dos aberturas pequeñas en las cuales se conecta los ductos de los ciclones y por último posee dos compresores que al ubicarse en su parte superior ayudan a la recolección del polvo con mayor rapidez.

2.5.2 Pistolas del pintado electrostático

La pintura epóxica necesita tener una polaridad para lograr el enlace necesario. La pistola electrostática hace este trabajo, con lo cual mientras más alta sea la carga electrostática de las partículas del polvo, mejor será la adherencia de este último.

2.5.2.1 Características

Presión máxima de entrada:	12 bar.
Presión óptima de entrada:	6 bar.
Corriente alterna monofásica	
Frecuencia:	50 – 60hz.
Pistolas:	70 – 100 kv.
Polaridad:	Negativa.

2.5.3 Polvo

EL polvo epóxico está compuesto por una mezcla de resinas sólidas termoestables epóxicas y poliéster. Sus características son:

- Alta resistencia mecánica, química y a la corrosión en general.
- No contiene disolvente, lo que permite aplicar de una vez, grandes espesores de película, completamente exenta de porosidad.
- Adherencia total sobre metales ferrosos o no.
- Buena elasticidad
- Resistencia a los rayos ultravioleta.
- Reducción del riesgo de incendios.
- Alto rendimiento de aplicación, gracias a la recuperación del polvo.
- Buena resistencia al rozamiento, golpes e impactos.

Los productos que tienen el recubrimiento epóxico poseen propiedades muy importantes:

Resistencia al impacto(NTC-877): Directo e inverso

Dureza al lápiz (NTC-912): HB – 2H

Flexibilidad (NTC-1115):

Acabados brillantes y lisos: Pasa mandril cónico 1/8”

Acabados Mate y Texturizados: Pasa mandril cónico ¼”

Cámara Salina (NTC-1156):

Acabados brillantes y lisos: Menos de 1/8" de penetración después de 1000 horas.

Acabados mate y texturizados Menos de 1/8" de penetración después de 500 horas.

Adherencia – Cuadrícula (NTC – 811) Pasa 100%

Resistencia a la intemperie: Baja.

2.5.3.1 Preparación de la superficie:

La superficie a recubrir debe estar seca, libre de grasas, óxidos, polvo, pintura vieja y otros contaminantes.

Es indispensable tener en cuenta el tipo de pre-tratamiento a utilizar dependiendo del material a recubrir.

2.5.3.2 Datos de aplicación:

Voltaje: 50-100 kilovoltios

Curado típico: 170 °C * 15 minutos (338 °F)
Temperatura del metal

Temperatura mínima de curado 160 °C (320 °F)
Temperatura del metal

Espesor de película: 2.0-4.0 mils (50-101 micras)

Tabla 2.3 Resistencia a los productos químicos

Producto Químico	Concentración	24 h	1 mes	6 meses	1 año
Ácido fosfórico	0.5	+	+	+	+
	0.2	+	+	+	+
	0.1	+	+	+	+
Ácido nítrico	0.5	+	+	-	-
	0.2	+	+	+	+
	0.1	+	+	+	+
Ácido fórmico	0.1	+	+	+	+
	0.05	+	+	+	+
Ácido acético	0.2	+	+	+	+
	0.1	+	+	+	+
Ácido clorhídrico	0.5	+	+	+	+
	0.2	+	+	+	+
	0.1	+	+	+	+
Ácido sulfúrico	0.5	+	+	+	+
	0.2	+	+	+	+
	0.1	+	+	+	+
Butano		+	±	±	±
Ácido crómico	0.2	+	+	+	o
	0.1	+	+	+	o
Ácido cítrico	0.05	+	+	+	+
Ácido láctico	0.05	+	+	+	+
Hidróxido potásico	0.2	+	+	+	+
	0.1	+	+	+	+
Hidróxido sódico	0.2	+	+	+	+
Amoniac	0.35	+	+	+	+
	0.1	+	+	+	+
(desnal)		+	+	+	x
Isopropanol		+	+	+	±

Fuente: J. Valls, R. Fuster, Tecnología de recubrimiento en polvo.

Simbología

+	Película intacta	-	Película cuarteada
±	Película reblandecida	o	Película destruida
X	Película hinchada y con ampollas	=	Película en ensayo

2.6 CICLONES.

Los aparatos diseñados para recolectar pintura electrostática son los ciclones o separadores de ciclón. Por tanto funciona directamente con la cabina de pintado. Los ciclones están conectados a dicha cabina, donde extraen el polvo no adherido a las placas por succión.

La recuperación de la pintura en polvo es muy importante por dos razones, tanto por el medio ambiente, como en el ámbito económico.

La contaminación ambiental se produce por el tamaño de las partículas, que van de 37 a 40 micrones. Estas partículas se esparcirían por el aire al no ser recuperadas, afectando a la respiración de las personas de los alrededores.

Económicamente a la empresa le representa una importante cantidad de dinero al momento de disminuir el desperdicio del polvo, ya que este polvo recuperado será reutilizado en su mayoría. Cabe recalcar que siempre habrá desperdicio, pero gracias a los ciclones es mínimo y controlado.

2.6.1 Principio de funcionamiento

Los ciclones son mecanismos que funcionan sin movimientos de partes, utilizando la fuerza centrífuga para separar partículas sólidas de una corriente de aire. La fuerza centrífuga, resultado de la componente tangencial de la velocidad dada al aire cargado de polvo en la parte superior del ciclón, expulsa las partículas (por el movimiento del vórtice circular) hacia la pared del ciclón, y siguen una trayectoria descendente hasta llegar a un receptor.

El gas sin partículas sale como un vórtice axial ascendente hacia el interior, pasando por el tubo de salida del gas. Los ciclones pueden trabajar a elevadas temperaturas.

Los Ciclones funcionan con un sistema de extracción local, en la cual el gas es extraído en el sitio mismo donde se está haciendo la operación. Este sistema es preferible porque ofrece un mejor control de la contaminación con un mínimo volumen, bajo costo de operación y mantenimiento.

2.7 PROCESO DE CURADO.

Este proceso, luego de la aplicación de la pintura epóxica, se encarga de curar el polímero epoxídico base de este recubrimiento en polvo. El curado de la pintura se produce a una temperatura llamada de polimerización o de curado, la cual es de 200 °C en la placa. El horno de curado tiene una cabina que tiene de largo aproximadamente 15 metros, produciendo una temperatura ambiente de 240 - 285 °C, tiene al igual que el horno de secado una cámara de transferencia de calor, una chimenea y su cabina. La combustión se produce con Diesel.

CAPITULO 3

ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DEL PROCESO DE SECADO.

El análisis y diagnóstico del proceso de secado determinará todas las características de dicho proceso. Dentro de este análisis se encuentra los parámetros de funcionamiento del proceso, y dentro del diagnóstico se encuentra los sistemas o aparatos que funcionan en el horno de secado.

Los parámetros del proceso han sido determinados gracias al conocimiento de los ingenieros de planta, y la presencia principalmente de los problemas que se han suscitado a lo largo de las producciones de pintado epóxico.

Para el diagnóstico utilizaremos los datos técnicos de los sistemas o aparatos, que se utilizan en el proceso, como por ejemplo: quemador, ventilador, cámara de transferencia de calor, cortinas de aire, sistemas de recirculación, etc.

3.1 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS: TEMPERATURA, ESPESOR Y VELOCIDAD DE LA PLACA Y MATERIAL DE LA MISMA; Y PUNTOS CRÍTICOS DEL PROCESO.

Los parámetros son factores que afectan al desarrollo del proceso de secado en distinta magnitud. En este proceso se tienen varios parámetros y son los siguientes: temperatura, tipo de material, espesor y velocidad de transportación de la placa.

Hay que señalar que el volumen es un parámetro muy importante al momento de construir la cabina, en nuestro caso la cabina del horno esta construida y no se va a rediseñar ni tampoco a adecuar.

Estos parámetros serán analizados individualmente para determinar sus puntos críticos los cuales serán los momentos críticos del proceso. Estos puntos críticos serán muy importantes al momento de realizar los cálculos para el rediseño, ya que las exigencias mas altas en este proceso se van a producir en dichos puntos.

3.1.1 PARÁMETROS Y PUNTOS CRÍTICOS.

La información de cada parámetro ha sido determinada por recopilación de datos de los registros de producciones de alcantarillas con recubrimiento epóxico en la empresa NOVACERO ACEROPAXI. Los datos son los siguientes:

PARÁMETROS

Temperatura ambiente: 10 °C a 20 °C.

Tipo de Material: Acero A36.

Espesores:
1.5 mm.
2.0 mm.
2.5 mm.
3.0 mm.
3.5 mm.

Velocidad de

Transportación de la placa: 9 mm/s a 13 mm/s.

A continuación serán analizados cada uno de los parámetros, en que condiciones se determinan los puntos críticos y como afecta en el proceso.

3.1.1.1 Temperatura ambiente.

En la ubicación de la empresa NOVACERO ACEROPAXI la temperatura ambiente varía aproximadamente desde 5 a 20 ° C. La temperatura ambiente es un factor influyente, ya que esta temperatura a su vez tendrá la placa; por lo tanto mientras más baja sea la temperatura ambiente, más energía necesitaremos para calentar la placa a una temperatura de aproximadamente 160 °C.

En este horno la transferencia de calor se da por convección. La diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura objetivo (170 ° C) se determinará el gradiente térmico. Este gradiente es uno de los factores que va a determinar la cantidad de energía, y a su vez será uno de los condicionantes para determinar el tiempo que se demorará en calentar la cabina hasta llegar a su temperatura óptima.

Por tanto la temperatura de 5 ° C es un punto crítico. Hay que decir que la parte más importante para aprovechar el calor es precisamente tener un excelente sistema de recirculación de aire.

3.1.1.2 Tipo de material de la placa.

Siendo el Acero ASTM A36 (A6M – 84), por sus características físicas y químicas, el más óptimo para la aplicación en el alcantarillado. Se utilizarán sus condiciones de comportamiento en este proceso para determinar el o los puntos críticos.

La condición establecida de calentamiento para la placa esta fijada una temperatura de 160 °C, esta temperatura no afectará a las características físicas, ni químicas del material (acero).

Por lo tanto la característica primordial es la conductividad térmica, la cual va a determinar que facilidad tiene este material para conducir el calor. En el caso del acero ASTM A 36 en caliente su conductividad es de $27 \text{ BTU} / (\text{h} * \text{ft} * ^\circ\text{C})$. Esta conductividad térmica es muy importante al momento de calcular la cantidad de calor necesaria para elevar la placa a los $160 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.1.1.3 Espesor de la placa.

Este parámetro al momento de calentar la placa va a incidir en el calentamiento de dos maneras, cuando la placa absorbe calor y cuando la placa pierde calor. El rango de parámetro de espesor de las placas es de 1.5 mm a 3.5 mm.

Hay dos objetivos en el proceso de secado, secar por completo la placa, evaporando las más pequeñas partículas de agua presentes por el pre-tratamiento y precalentar la placa, para en el momento de pintado obtener una prematura capa fundida y con esto lograr una mayor capa de recubrimiento epóxico llegando a un mínimo $150 \text{ }\mu\text{m}$.

Para cumplir con el proceso de secado no influye el espesor, ya que las partículas se encuentran en la superficie de la placa y pasados los $100 \text{ }^\circ\text{C}$ es suficiente para evaporar dichas partículas. Para precalentar la placa se debe tomar en cuenta el espesor, pues la rapidez con la que se gana y se pierde calor es muy importante.

En el espesor mínimo de las placas se produce una mayor rapidez al ganar calor y de igual forma en la pérdida de calor, mientras que en espesores de 3 mm el tiempo de calentamiento es mayor y de igual manera el tiempo de enfriamiento. En este proyecto el punto crítico será de 3mm de espesor, ya que por tener definido el espacio de la cabina del horno tenemos un tiempo definido en el cual tenemos que llegar a los $160 \text{ }^\circ\text{C}$ en la superficie de la placa.

3.1.1.4 Velocidad de transportación de la placa.

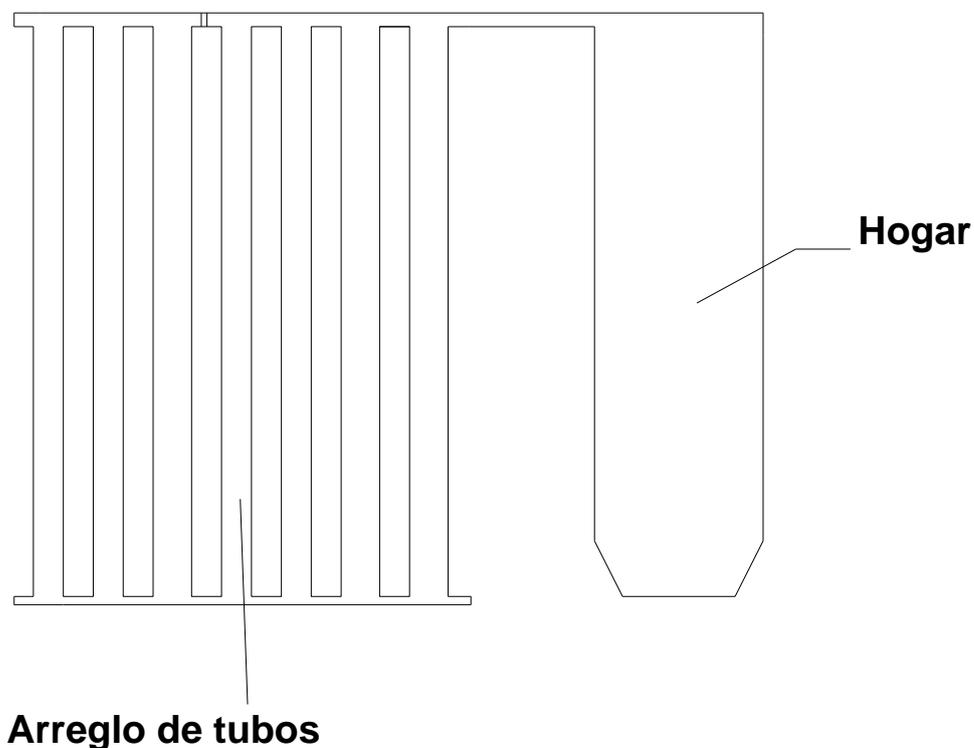
La velocidad de transportación de la placa va a influir al momento de determinar la temperatura ambiente de la cabina, pues la placa debe ser capaz de absorber el suficiente calor para llegar a la temperatura deseada de 160 ° C.

Por lo tanto va a estar directamente relacionada con el espesor. La velocidad de transportación de la placa tiene un rango de 9 a 13 mm/s. En este caso el punto crítico será de 13 mm/s.

3.2 DIAGNÓSTICO DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN.

La cámara de combustión se a denominado al sistema de intercambiador de calor, el cual esta compuesto por el hogar y su intercambiador propiamente dicho que es un arreglo de tubos de acero inoxidable, visto en el gráfico

Fig. 3.1 Gráfico de arreglo de tubos y hogar.



La cámara de combustión tiene el mayor interés al momento de diseño y costos. El sistema de intercambiador de calor esta en su totalidad compuesta por acero inoxidable, el costo de este acero es muy elevado.

Por esto el análisis de la cámara de combustión tiene que ser preciso al momento de decidir el espesor de los tubos o el espesor de la plancha para el hogar.

El diseño de la cámara de combustión es muy complejo, ya que el calor necesario para obtener la temperatura de 170°C en la cabina del horno, va a salir de la transferencia eficiente de calor en el interior de esta cámara, hacia el flujo de aire y el aprovechamiento de la recirculación de aire caliente. También tiene que tener la característica de evacuar rápidamente y eficientemente los gases de combustión que circulan internamente.

3.2.1 HOGAR

El hogar es de forma cilíndrica y tiene las siguientes dimensiones, de diámetro 400 mm y de largo 2000 mm, esta construido de acero inoxidable de 2 mm de espesor. En el hogar se produce la combustión, esta se da por medio del quemador y su combustible que funciona a base de diesel. Tomando en cuenta que el hogar y el arreglo de tubos son intercambiadores de calor.

El acero del cual esta formado el hogar debe tener un bajo porcentaje de dilatación, mientras que en el caso del coeficiente de conductividad térmica al no tener una amplia gama de variedad de aceros que resistan altas temperaturas y que además sean buenos conductores térmicos, se debe elegir el acero inoxidable, Acero AISI – 304 para soldar.

3.2.1.1 Parte crítica.

En el hogar tenemos un problema en la utilización de sistemas anexos como el quemador. El hogar está operando con un quemador de tiro forzado, lo que quiere decir que para su óptimo funcionamiento, necesita un ventilador extra para poder impulsar la llama del quemador. El ventilador instalado tiene una dirección de flujo, desde arriba del quemador hacia la parte inferior del mismo. Por esta razón y por la geometría del hogar, el hollín producido por la combustión del diesel se acumula en la parte inferior del hogar, produciéndose así una acumulación de hollín y con esto un área que no transmitía calor eficientemente.

3.2.2 ARREGLO DE TUBOS

En los tubos van a circular los gases de combustión producidos en el hogar y que luego de pasar por los tubos serán expulsados hacia la chimenea. Los tubos utilizados para este arreglo son de acero inoxidable AISI 304 y son 42 tubos de las siguientes dimensiones: 76,2 mm o 3 pulg de diámetro y 2000 mm de largo.

Al igual que el hogar, debe tener buenas cualidades termo-conductivas y un porcentaje de dilatación muy bajo. Al ser este arreglo de tubos un intercambiador de calor, la eficiencia con que trabaje, va a ser preponderante al momento de cuantificar el aprovechamiento del calor producido por el quemador en el hogar y transportado por los tubos hacia la chimenea.

3.2.2.1 Parte Crítica

El diámetro, el espesor y el número de tubos es la parte más importante de este sistema, ya que determinará el tipo de flujo que vamos a tener, el área de transferencia de calor, la velocidad con la que se puede transmitir calor por unidad de área y por último la configuración que se utilizará para la recirculación del aire caliente.

3.2.3 CÁMARA DE TRANSFERENCIA DE CALOR O CARCAZA DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN.

En la cámara de transferencia de calor del horno de secado, excepto las cortinas de aire, intervienen todos los sistemas anexos a dicha cámara del horno. Estos sistemas anexos son el quemador, el ventilador, el hogar y sus tubos y la recirculación de aire caliente. Gracias a estos sistemas anexos se produce en dicha cámara la transferencia de calor al aire, el cual será transportado hacia la cabina donde se produce la transferencia de calor de el aire caliente hacia la placa.

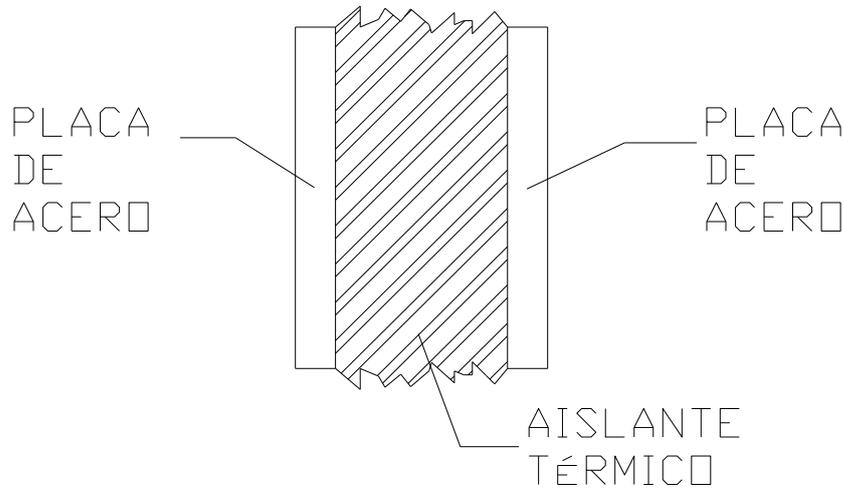
Por tanto esta cámara debe tener algunas características muy importantes. Una de ellas es el aislamiento térmico, donde tenemos una interacción entre dos placas de acero y una capa intermedia de aislante térmico propiamente dicho.

La transferencia de calor se produce por flujo cruzado, en el cual los gases de combustión circulan por el arreglo de tubos y el aire pasa por el exterior de este arreglo.

3.2.3.1 Aislante Térmico

El aislante térmico es un material que ayuda a la retención del calor, ya que los aislantes térmicos tienen la característica de tener un bajo coeficiente de conductividad térmica. En nuestro caso tenemos como aislante térmico a la fibra de vidrio cuyo coeficiente de conductividad térmica es de $0.033 \text{ Kcal}\cdot\text{m}/(\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{h})$. El espesor del aislante es de 20.3 cm. El espesor del aislante va a depender del calor que se produzca dentro de la cámara de transferencia de calor. Esto quiere decir que si el calor es intenso, el espesor del aislante será mayor y si el calor es muy bajo el espesor del aislante será menor.

Fig. 3.2 Diagrama de pared de la cámara de transferencia de calor



El acero de las placas es de tipo A36, tiene una conductividad térmica 27 btu/h*ft*°F, es galvanizada y tiene un espesor de 2 mm.

3.3 DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DEL QUEMADOR.

El quemador es el aparato que va a producir el calor requerido para el funcionamiento óptimo del horno de secado. Este quemador es de marca **CARLING** y produce la combustión del diesel. La capacidad del quemador es 4 – 8 gal/h. Tiene una boquilla de 7.5 gal/h con un ángulo de 45°, el motor gira a 3450 RPM, el amperaje de funcionamiento es de 4.8 Apm., la potencia es de ¼ de HP.

Este quemador es de tiro forzado, lo que quiere decir que necesita un mayor impulso la llama del quemador para tener una eficiente combustión. Pues esto ayuda para la atomización del combustible. Ahora, realmente no fue hecho un previo análisis de que flujo necesitaba el quemador para su óptimo funcionamiento y tampoco cual es la dirección adecuada del impulso del ventilador.

3.4 SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE FLUJOS.

Estos sistemas ayudan en la eficiencia del funcionamiento y aprovechamiento del calor. Como su nombre lo indica la recirculación es una reutilización de algo, en este caso, del aire caliente.

Lo óptimo sería obtener un sistema de recirculación tan eficiente, que se pueda hablar de un sistema cerrado de transferencia de calor. El objetivo es aprovechar al máximo, el calor transferido hacia el aire, por eso hemos hecho un análisis de la recirculación de flujos.

Actualmente hay dos ductos de recirculación, los cuales conectan la cabina con la carcasa de transferencia de calor. Al momento se encuentra tapados pues en este sistema no existe recirculación de aire caliente. Lo que va a determinar algunos problemas en cuanto a pérdidas de calor. Como lo detallaremos a continuación.

Cabe destacar que al no haber recirculación, la cabina al llenarse de aire caliente se sobrecalienta y prácticamente las cortinas de aire no son suficiente para retener el calor en la cabina. Es por eso que en la entrada y salida de las placas se produce una importante pérdida de calor.

3.4.1 Parte crítica

No existe ningún tipo de recirculación del aire caliente, siendo esta la parte más importante del horno, es por eso que el estudio para lograr un aprovechamiento del calor ganado en la carcasa de la cámara de combustión será muy a fondo.

Hay que decir que el diseño del sistema de recirculación de aire caliente es una parte creativa del ingeniero, con el soporte de los diferentes cálculos realizados para definir o seleccionar los aparatos o sistemas.

3.5 DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DEL VENTILADOR.

El flujo másico actual determinó la selección de este ventilador, cuyas características son las siguientes:

Flujo máximo	21000	CFM
Potencia	6.5	HP
Revoluciones	1760	RPM
Tipo	J	
Voltaje	220	V
Fan Code	30 J 1/3	

Este ventilador se encuentra ubicado en la parte posterior de la carcasa de la cámara de combustión. El mismo que ingresa a esta carcasa aire del ambiente constantemente.

Por lo tanto el aire caliente no tiene un sistema de recirculación, pero además el flujo másico es muy grande como para lograr que en un solo ciclo de circulación, el flujo absorba el suficiente calor para llegar a los 170 ° C, cabe recalcar que el calor ganado también depende del área y configuración de los tubos del intercambiador.

3.5.1 PARTE CRÍTICA

El flujo de funcionamiento del ventilador es grande, y además la no presencia de un sistema de recirculación de aire caliente perjudica aún más la eficiencia del aprovechamiento del calor. También, la cabina al estar saturada de aire caliente, se produce una superación de flujo de aire caliente a través de las cortinas, perdiendo el calor de la cabina.

3.6 ESTUDIO DE LAS CORTINAS DE AIRE.

Las cortinas de aire permiten retener el aire caliente en la cabina. Este sistema opera de la siguiente manera. El ventilador tiene unos ductos internos en la cabina, los cuales tienen rejillas cada 10 cm.

Entonces el ventilador tipo J, impulsa flujo de aire caliente de la cabina lateralmente logrando detener la salida del aire caliente por la entrada y salida de las placas de la cabina.

En el horno de secado están instalados dos ventiladores para la entrada y salida del horno. Sus características son las siguientes:

Flujo máximo	11000	m ³ / h
Potencia	12	CV
Tipo	J	

Estas cortinas de aire serían efectivas si se tuviera un sistema estable de flujo, pues por el momento el flujo en la cabina está sobre cargado. Para lo cual es muy importante llegar a un sistema donde el aire caliente recircule, siendo un sistema cerrado.

Fig. 3.3 Esquema de las cortinas de aire V.F.

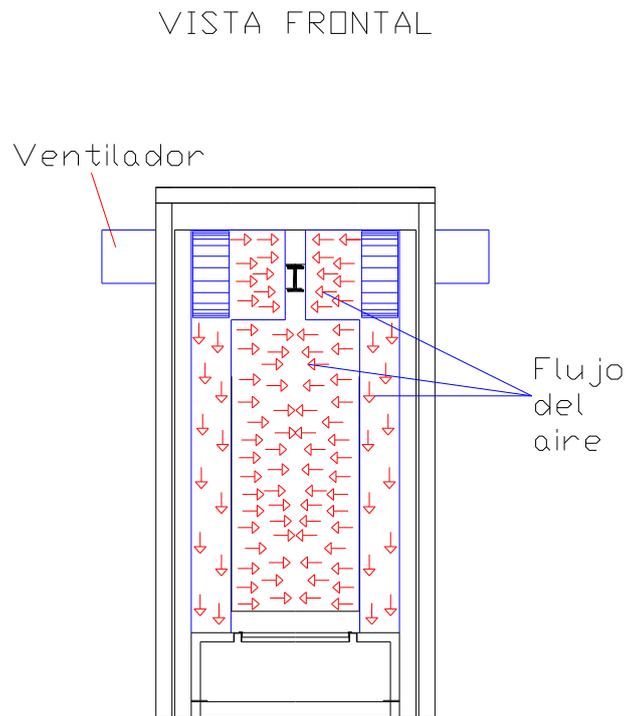
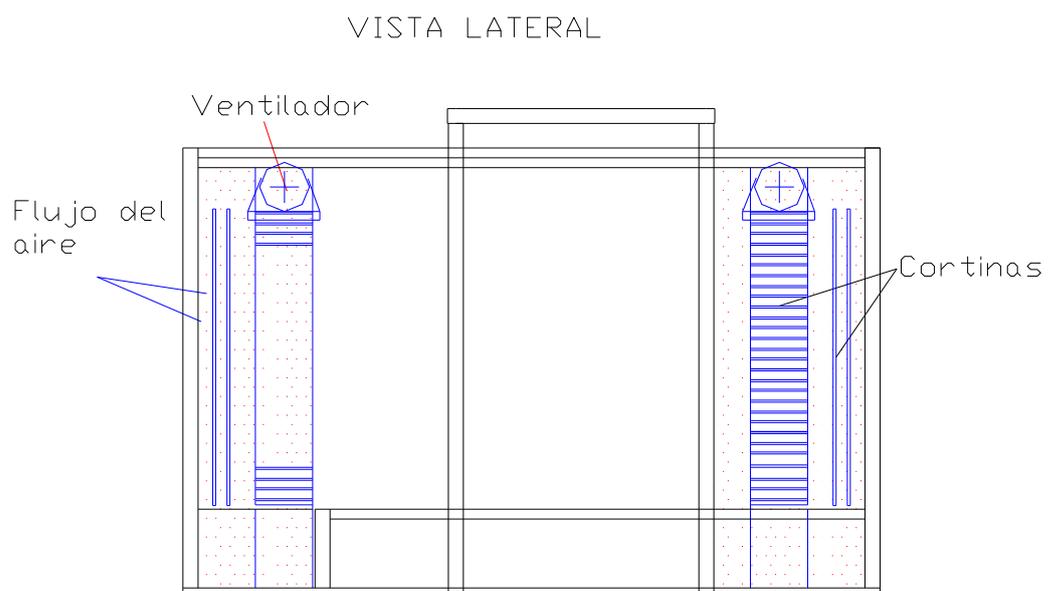


Fig. 3.4 Esquema de cortinas de aire V.L.



3.7 SELECCIÓN DE MAQUINARIA Y TECNOLOGÍA.

En el horno de secado todos los aparatos o sistemas dependen directa o indirectamente de cualquiera de estos mismos sistemas o aparatos. Por lo cual hay que seleccionar con un criterio singular, todos los sistemas o aparatos.

Los sistema de producción de calor por medio de un quemador, la transferencia de calor, tendrán el mismo principio de funcionamiento, tomando en cuenta que la utilización de los mismos será analizada y optimizado de acuerdo a nuestros resultados y criterios.

La recirculación al ser primordial en este diseño, da la pauta para decir lo siguiente: el ventilador por su alta capacidad de flujo para está aplicación, deberá ser reemplazado por dampers colocados en la carcaza, los mismos que serán conectados a unos ductos que estarán conectados con la cabina, esto servirá para absorber por medio de los dampers el aire caliente de la cabina y reutilizarlo en la carcaza, aprovechando el calor con mayor eficiencia.

El quemador deberá ser analizado en el capítulo de diseño para obtener una determinación en la selección del quemador. La cámara de combustión está directamente relacionada con el flujo de combustible que se va ha quemar, entonces sus dimensiones irán de acuerdo con el flujo de combustible que se necesite quemar para la producción de calor en el intercambiador.

La carcaza por su geometría deberá ser reconstruida, esperando todas las dimensiones de los sistemas o aparatos seleccionados.

Todas las especificaciones técnicas van a depender de los cálculos realizados en la parte de diseño, pues se verá los flujos, temperaturas, características físicas y químicas y los espesores, etc., de todos los aparatos y sistemas.

CAPITULO IV.

DISEÑO TÉRMICO.

Este capítulo será el más importante para el resultado final del proyecto, se definirán todas las características de los sistemas y aparatos del horno y se implementarán nuevos modelos de sistemas para el mejoramiento de la eficiencia del proceso.

La elección de los métodos, teorías, información, etc. Será de acuerdo a los criterios, conveniencia y conocimientos obtenidos durante la carrera de ingeniería mecánica

Los parámetros y puntos críticos serán tomados en cuenta al momento que sean necesarios para realizar cálculos que estén directamente relacionados con estos datos. Mientras que los diagnósticos servirán para comparar y luego determinar si se puede reutilizar los sistemas o aparatos del horno.

4.1 ANÁLISIS ENERGÉTICO DEL HORNO SECADO.

El horno de secado funciona en base a energía calórica. Esta energía calórica es transmitida por medio de un flujo gaseoso (aire), dicho flujo será el que absorba el suficiente calor en la cámara de transferencia de calor, para luego ser trasladado a la cabina en donde se deberá obtener una temperatura ambiente o de equilibrio de 170°C , con lo cual se logrará subir la temperatura de la placa aproximadamente a 160°C .

Como se sabe es un sistema energético, que tiene como objetivo ser muy eficiente en el aprovechamiento del calor. Mientras más eficiente sea el sistema, el consumo de energía, en este caso del combustible DIESEL 2, se disminuirá, y lo más importante será llegar a una mayor temperatura con mayor rapidez.

El diesel 2 que es el único combustible que se utiliza para generar calor en el horno de secado; será quemado por un quemador, dicho quemador transformará el combustible en una llama, la cual producirá gases de combustión. Estos gases de combustión circularán por los tubos, los cuales se calientan y transfieren calor al flujo de aire por medio de convección. Hay que señalar que el hogar, donde se produce la combustión del quemador, también es un área de transferencia de calor.

La fuente de calor del horno es el quemador, de ahí en adelante se produce lo que se llama la transferencia de calor. En este horno se va a producir la transferencia de calor por convección y conducción.

Gracias a la transferencia de calor y a la termodinámica se va a realizar un análisis de los sistemas que se ocupa en el horno para lograr la transferencia necesaria de calor a la cabina y con esto lograr la temperatura de 170°C.

En el horno de secado se produce ingreso y pérdidas de calor. Los consumos de energía, en este caso el flujo de diesel; y el fluido que va a transportar el calor (el aire) debe estar determinado por diagramas de flujo de la energía del horno y de la cámara de transferencia de calor. Estos diagramas servirán para dar la pauta de cómo se produce el intercambio de calor en el proceso, determinando los flujos de calor para luego de acuerdo a esto, cuantificar el calor necesario para lograr el equilibrio térmico entre la producción y las pérdidas de calor.

A continuación se detalla los diagramas de transferencia de calor, en el horno de secado y en la cámara de transferencia de calor, los cuales serán utilizados en los puntos siguientes para determinar numéricamente los resultados del flujo diesel y flujo de aire.

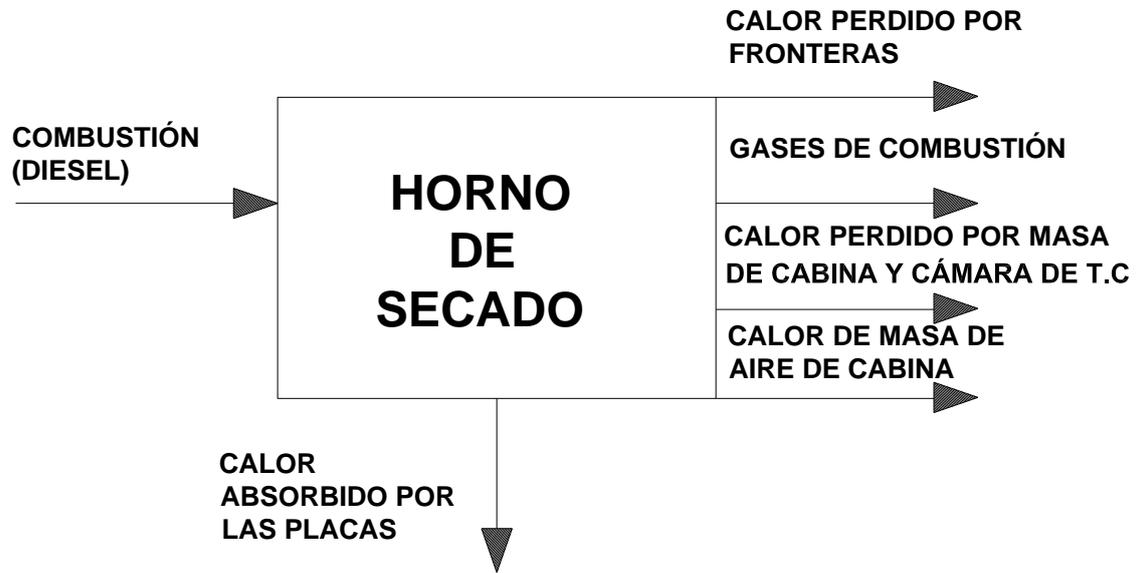


Fig. 4.1 Diagrama de flujo de calor en el horno de secado.

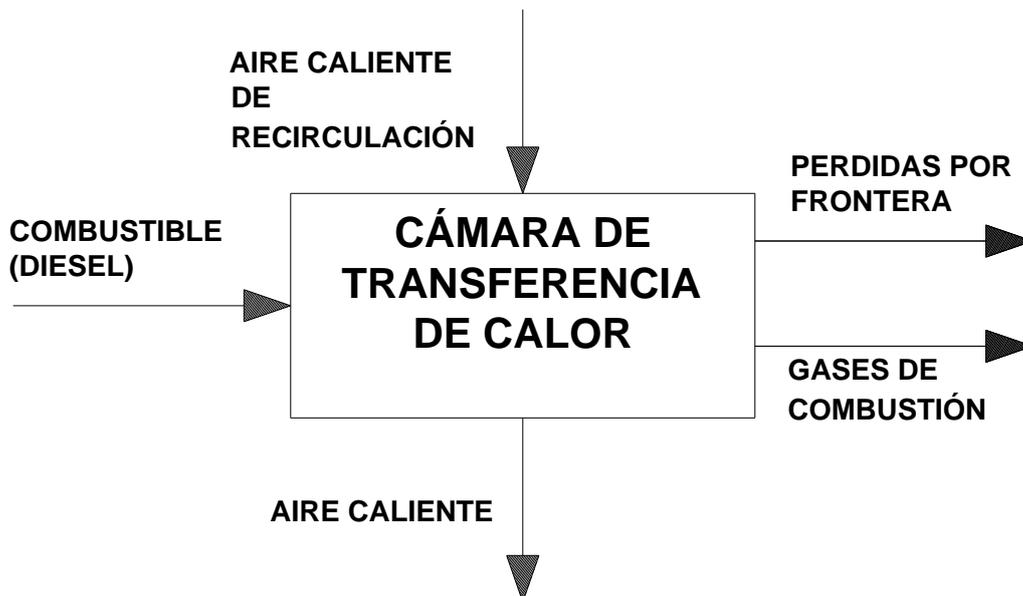


Fig. 4.2 Diagrama de flujo de calor en la cámara de transferencia de calor.

En estos diagramas se ejemplifica la energía que sale con una flecha en dirección hacia fuera del horno y la energía que ingresa viceversa. Teniendo así lo siguiente:

Diagrama del horno de secado.

Entra:

- Energía calórica que es producida por el quemador a través de la combustión del diesel.

Sale:

- Energía calórica por las fronteras, lo que quiere decir paredes y aberturas. En este caso se tiene dos aberturas la entrada y salida de la carga que circula por medio del proceso de pintado epóxico.
- Energía calórica por calentamiento de placas, es el calor que gana las placas que van a ser pintadas para lograr obtener la temperatura óptima.
- Energía calórica por gases de combustión, es el calor que se pierde por los gases de combustión ya que por ser un intercambiador de llama indirecta no se puede aprovechar el 100% el calor de los gases de combustión.
- Energía calórica por masa de aire, es el calor que se pierde por el aire que sale al ambiente por la entrada y salida de la carga, este tipo de perdida es mínima ya que gracias a las cortinas de aire el calor de la cabina se conserva eficientemente.

Diagrama de la cámara de transferencia de calor.

Entra:

- Energía calórica que es producida por el quemador a través de la combustión del diesel.
- Energía calórica del aire de recirculación, este calor es del aire caliente de la cabina que nuevamente es enviado por los ventiladores de recirculación a la cámara de transferencia de calor.

Sale:

- Energía calórica por gases de combustión, es el calor que se pierde por los gases de combustión ya que por ser un intercambiador de llama indirecta no se puede aprovechar el 100% el calor de los gases de combustión.
- Energía calórica por las fronteras, lo que quiere decir paredes.
- Energía calórica del aire, es el calor que se pierde por recalentar el aire re-circulado que viene de la cabina.

4.1.1 ANÁLISIS TERMODINÁMICO Y DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

El análisis termodinámico y de transferencia de calor abarcara la totalidad del funcionamiento del horno. Estas dos ciencias serán las que proporcionen las herramientas para realizar los cálculos necesarios y lograr el diseño óptimo.

En el horno de secado se va a realizar una transferencia de calor por medio de una convección forzada, ya que el fluido (aire) es forzado a fluir sobre una superficie por medios externos, en este caso el calor del hogar y su arreglo de tubos será dirigido hacia la cabina por dicho flujo de aire que será impulsado por un sistema de ventilación.

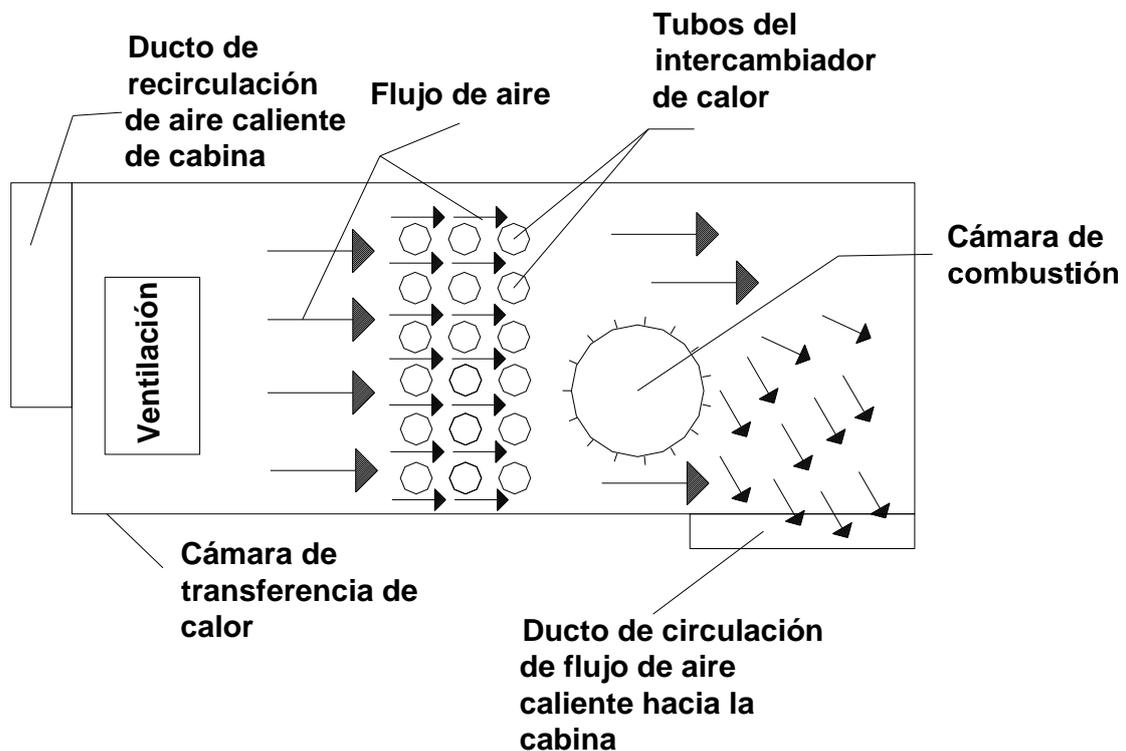


Fig. 4.3 Gráfico de dirección de flujo del aire en la cámara de transferencia de calor.

Uno de los objetivos primordiales es implementar un sistema de recirculación de aire caliente, que logre convertir este proceso en un sistema de transferencia de calor muy similar a un sistema cerrado. Lo que quiere decir que la eficiencia en el aprovechamiento del calor sea muy elevada.

Por tanto cada sistema y aparato del horno debe aprovecharse sus condiciones máximas de rendimiento. Este sistema será un sistema abierto por tener un volumen de control, entonces se hará un análisis termodinámico de un volumen de control.

4.1.1.1 Volumen de control en flujo permanente

Para realizar el análisis termodinámico se determinó de acuerdo a las características de funcionamiento del horno, que sé esta trabajando en un sistema de volumen de control en flujo permanente. El horno tiene dos sistemas de diferentes características pero de igual funcionamiento; el sistema de la cabina y el de la cámara de transferencia de calor.

Cabina.

En la cabina se tiene un sistema en volumen de control en flujo permanente, ya que por un lado circula el aire caliente y por otro lado las placas que van a ser calentadas, dichas placas están circulando con una velocidad constante en un volumen constante y masa constante. Esto quiere decir que las placas entran con una energía y salen con otra energía.

Cámara de transferencia de calor.

En la cámara de transferencia de calor también se tiene un sistema en volumen de control en flujo permanente. En este sistema se produce una circulación constante de gases de combustión y aire.

4.1.1.2 Transferencia de calor por convección forzada

La eficiencia del horno de secado esta determinada por la óptima transferencia de calor que se da en diferentes partes del horno. La más importante es en la cámara de transferencia de calor, pues se tiene ahí al intercambiador de calor.

La convección forzada se da al existir una transferencia de calor debido al movimiento de un fluido frío, en este caso el aire, adyacente a una superficie caliente, el intercambiador de calor. La característica de esta transferencia de ser forzada se debe a que el fluido frío es impulsado por un par de ventiladores.

Esta convección forzada también se produce en el interior de los tubos de acero inoxidable entre el gas de combustión y los propios tubos, con la diferencia que el fluido es caliente y la superficie es la fría.

Una de las implementaciones más importantes es la recirculación del aire caliente. Esto significa que el aire que pasa por la cámara de transferencia de calor hacia la cabina va a ser el mismo aire que será absorbido por un sistema de ventilación, de la cabina hacia la cámara de transferencia de calor, lo que quiere decir que no habrá ingreso de aire nuevo en el sistema. Este sistema de recirculación es una manera eficiente de aprovechar el calor.

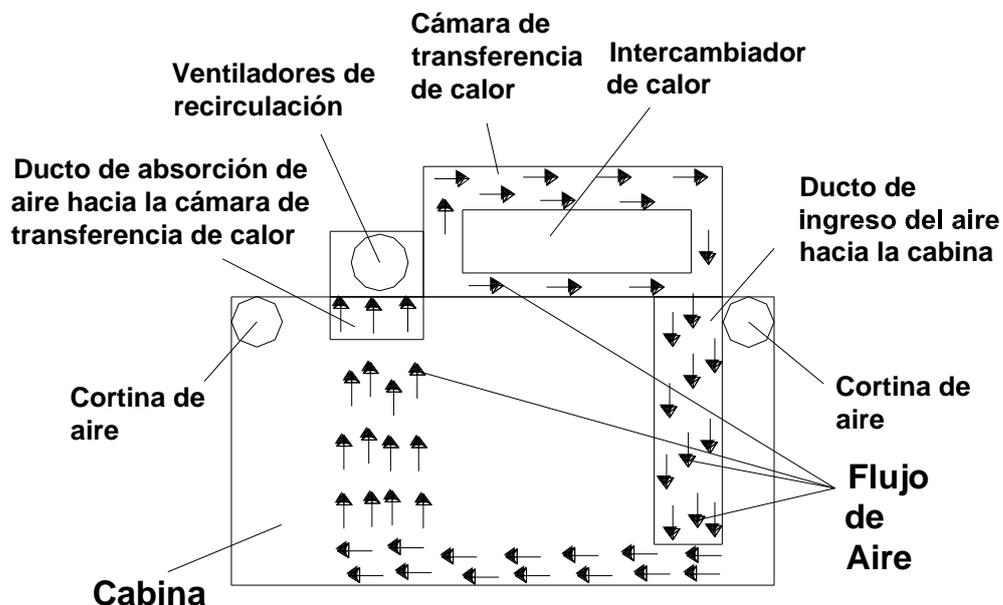


Fig. 4.4 Gráfico de recirculación del aire.

4.1.2 CÁLCULO DE LA TEMPERATURA DEL INTERIOR DEL HORNO DE SECADO.

Las placas que entran en este proceso tienen un espesor máximo de 3,5 mm, esto es muy importante en el análisis de la temperatura que deberá tener el horno para lograr que dicha placa llegue a los 160°C.

Se realizará el análisis con el método de la resistencia interna despreciable que dice lo siguiente; para cuerpos sólidos que están sometidos a procesos transitorios, y que además los gradientes de temperatura de dichos cuerpos son pequeños, lo que quiere decir que la temperatura del sólido es especialmente uniforme en cualquier instante durante el proceso transitorio; dicho cuerpo será tomado como una resistencia interna despreciable.

Dice también que la conducción de calor en ausencia de un gradiente de temperatura implica la existencia de una conductividad térmica infinita.

Es por eso que gracias a este análisis, la temperatura será diferente a los 170°C que se definió en un principio, pues se necesitara una temperatura más elevada.

4.1.2.1 Cálculo de la temperatura del interior del horno de secado.

Datos :

hair@15 =	8	w / (m ² * k)
hair@170 =	39	w / (m ² * k)
Aplaca =	7,4	m ²
Velplaca =	0,012	m/s
Letapa enfriamiento =	4,4	m
Letapa calentamiento =	7	m
Tpintado =	125	°C
Tambiente =	25	°C

Tiempo de enfriamiento se lo calcula con la longitud del tramo que la placa va a enfriarse, en este caso es la cámara de transición y la mitad de la cabina de pintado. La suma de estas dos distancias nos da 4.40 m de longitud.

$$L_{\text{etapaenfriamiento}} = 4.40 \text{ (m)}.$$

$${}^1 t_{\text{enfriamiento}} = \frac{L_{\text{etapaenfriamiento}}}{V_{\text{placa}}} \quad \text{Ec. 4.1}$$

Bi y Fo son números adimensionales.

$${}^2 Bi * Fo = \frac{h_{\text{air}} * A_{\text{placa}}}{M_{\text{placa}} * cp_{\text{placa}}} * t_{\text{enfriamiento}} \quad \text{Ec. 4.2}$$

$${}^3 T_{\text{enfriamiento}} = \frac{T_d - T_{\infty}}{e^{-Bi * Fo}} + T \quad \text{Ec. 4.3}$$

$$t_{\text{calentamiento}} = \frac{L_{\text{etapacalentamiento}}}{V_{\text{placa}}}$$

$$Bi * Fo = \frac{h_{\text{air}} * A_{\text{placa}}}{M_{\text{placa}} * cp_{\text{placa}}} * t_{\text{calentamiento}}$$

$$T_{\text{calentamiento}} = \frac{T_{\text{enfriamiento}} + e^{-Bi * Fo}}{1 - e^{-Bi * Fo}}$$

Temperatura del horno

t enfriamiento =	366,7	Seg.
Bi * Fo =	0,475	
T enfriamiento =	185,8	°C
t calentamiento =	583,3	Seg.
Bi * Fo =	3,7	
T calentamiento =	190,6	°C

La temperatura de calentamiento que es la del interior del horno, depende directamente de la temperatura del inicio del enfriamiento y de la multiplicación de Bi y Fo. De acuerdo a esto la temperatura de calentamiento debe ser 190.6°C.

¹ Frank P. Incropera, Fundamentos de transferencia de calor.

² Frank P. Incropera, Fundamentos de transferencia de calor.

³ Frank p. Incropera, Fundamentos de transferencia de calor.

4.1.3 ANÁLISIS DEL CALOR NECESARIO PARA CALENTAR LA PLACA.

Las placas que van a ser calentadas tienen aproximadamente una temperatura de 15 °C, su espesor crítico es de 3,5 mm, el tipo de material es el acero A36 y su recorrido por el horno se va a realizar a una velocidad de 12 mm/s. Las dimensiones de las placas han sido tomadas de la placa con mayor área. Este calor necesario en el análisis energético del horno se le toma como pérdidas.

El número de placas que se tomó para realizar los cálculos de las pérdidas por el calentamiento de las placas fue de 35 placas por hora. Este dato fue facilitado por el departamento de producción.

4.1.3.1 Cálculo del calor total de las placas.

El cálculo de calor que se pierde por el calentamiento de las placas es el siguiente:

Datos

C _{pacero} =	434	J / (Kg * K)
δ _{acero} =	0,00000813	Kg / mm ³
N _{placa} =	35	Placas / h
T _{oplaca} =	190.6	°C
T _{iplaca} =	15	°C
a _p =	1135	mm
l _p =	3240	mm
e _p =	3,5	mm

Se deberá calcular el volumen de acuerdo a su espesor, ancho liso y largo, para luego calcular el peso de la placa con la densidad.

Masa de la placa

$$M_{\text{placa}} = V * \delta_{\text{acero}}$$

Masa de cada placa

$$\begin{aligned} V_{\text{placa}} &= 12870900 \text{ mm}^3 \\ M_{\text{placa}} &= 104,7 \text{ Kg / placa} \end{aligned}$$

Masa total a calentar en una hora

$$M_{\text{tplaca}} = M_{\text{placa}} * N_{\text{placa}}$$

Masa total de las placas

$$M_{\text{tplacas}} = 3662,9 \text{ Kg.}$$

Calor

$${}^4 Q = m * c_p * \Delta T \quad \text{Ec. 4.4}$$

$$Q_{\text{placa}} = M_{\text{tplaca}} * C_{\text{pacero}} * \Delta T_p$$

Calor para calentar las placas.

$$Q = 279172.2 \text{ Kj / h}$$

4.1.4 ANÁLISIS DE CALOR POR COMBUSTIÓN.

La combustión es un tema muy importante en funcionamiento del horno, pues el combustible tiene que ser aprovechada al máximo de su eficiencia. En el horno de secado la única fuente de calor es el quemador, que en este caso quema diesel. En nuestro país no existe una información exacta de cual es la composición química del diesel y cual es el poder calórico de combustión, pues es demasiado fluctuante los valores que arroja el análisis del mismo combustible en diferentes bombas.

⁴ Yanus A. Cengel, Termodinámica, Tomo I

Por tanto hemos tomado los siguientes datos que son medias ponderadas.

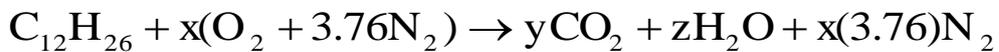
Poder calórico de combustión	41000 Kj / Kg.
Composición química	$C_{12} H_{26} S_{0.04}$
	$C_{12} H_{26}$

4.1.4.1 Cálculo de la temperatura de la flama adiabática de Diesel.

La reacción química del Diesel es primordial para llegar a la temperatura de la flama adiabática, ya que con la reacción química teórica y real podremos obtener la relación de aire combustible real y teórica, para luego determinar el exceso de aire con el cual se logrará una combustión eficiente. Para todo esto hay que tomar en cuenta la altura sobre el nivel del mar en donde se va a dar la combustión, la presión atmosférica y la humedad relativa del sitio. En este caso la altura del sitio es de 2800 mts sobre el nivel del mar, la presión atmosférica es de 73 Kpa y la humedad relativa es del 64 %.

A continuación se realizarán las ecuaciones químicas para su posterior igualación donde determinaremos cuantas moles de aire seco se necesita para que la reacción química sea completa.

Ecuación química para este proceso de combustión.

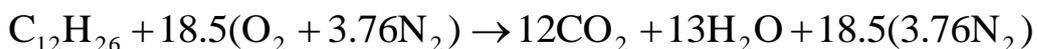


$$C: \quad 12 = y \quad \quad \quad y = 12$$

$$H: \quad 26 = 2 * z \quad \quad \quad z = 13$$

$$O: \quad 2 * x = 2 * y + z \quad \quad \quad x = 18.5$$

Ecuación estequiométrica



Para obtener la ecuación real

Cálculo de la temperatura de la flama adiabática de Diesel.

Datos :

Cc =	41000	kJ / kg
ϕ_{aire} =	0,64	
Tamb =	15	°C
Pm aire =	28,96	kg /mol
Paire =	73	kpa
Psat@15°C =	1,7	kpa
Ntotal =	101,3	Kmol

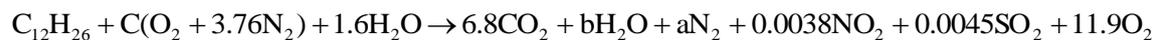
$$P_{\text{v aire}} = \phi_{\text{aire}} * P_{\text{sat @15°C}}$$

$${}^5 N_{\text{v aire}} = \left(\frac{P_{\text{v aire}}}{P_{\text{total}}} \right) * N_{\text{total}} \quad \text{Ec. 4.5}$$

Número de moles de agua en el aire

Pv aire =	1,1	kpa
Nv aire =	1,52	Kmol

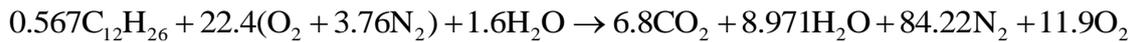
En los productos se colocan como coeficientes los porcentajes reales .



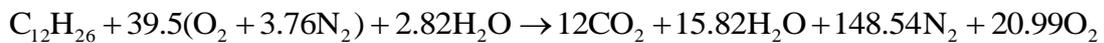
d:	$12d = 6.8$	$d = 0.567$
b:	$26d + 1.6 * 2 = 2 b$	$2b = 17.942 \quad b = 8.971$
c:	$2c + 1.6 = 6.8 * 2 + 0.0035 * 2 + 0.0045 * 2 + 11.9 * 2 + b$	
	$2c = 44.787$	
	$c = 22.4$	
a:	$3.76 * 2 * c = 0.0038 + 2 * a$	
	$168.44 = 2 * a$	
	$a = 84.22$	

Ecuación Real

⁵ Yanus A. Cengel, Termodinámica, Tomo II.



Ecuación por Kmol de combustible



Cálculo de las relaciones aire combustible.

Relación real:

$${}^6 A_{Creal} = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}} \quad \text{Ec. 4.6}$$

$$A_{Creal} = \frac{39.5 \text{KmolO}_2}{1 \text{kmolComb}} * \frac{1 \text{kmolComb}}{170 \text{kgComb}} * \frac{1 \text{kmolAire}}{0.21 \text{kmolO}_2} * \frac{28.96 \text{kgAire}}{1 \text{kmolAire}} = 32.04 \frac{\text{kgAire}}{\text{kgComb}}$$

Relación estequiométrica

$$A_{Cestequiométrica} = \frac{18.5 \text{KmolO}_2}{1 \text{kmolComb}} * \frac{1 \text{kmolComb}}{170 \text{kgComb}} * \frac{1 \text{kmolAire}}{0.21 \text{kmolO}_2} * \frac{28.96 \text{kgAire}}{1 \text{kmolAire}}$$

$$A_{Cestequiométrica} = 15.0 \frac{\text{kgAire}}{\text{kgComb}}$$

Cálculo del exceso de aire

Es la relación entre la relación de aire-combustible real sobre la de aire combustible estequiométrica.

$$\frac{A_{Creal}}{A_{Cestequiométrica}} = \frac{32.04}{15} = 2.136$$

El exceso de aire sería del 113.6%.

Para el cálculo de la temperatura de la flama adiabática, se determina primero que es un proceso de combustión de flujo permanente y se lo realiza de la siguiente manera:

⁶ Yanus A. Cengel, Termodinámica, Tomo II.

Tabla 4.1 Cálculo de entalpías de los reactantes y productos.

Tabla	Kj/Kmol	Kj/Kmol	Kj/Kmol	Kj/Kmol
Sustancia	\overline{hf}°	$h_{T288.15^\circ K}$	$h_{298.15^\circ K}$	$h_{556^\circ K}$
C12H26(l)	-291010	—	—	—
O2	0	8388.8	8682	16527.6
N2	0	8378.17	8669	16243.4.
H2O(g)	-241820	9569.03	9904	18815.8
CO2	-393520	8995.29	9364	20222.2

Fuente: Cengel II, tablas de propiedades, figuras y diagramas (unidades de SI).

Donde:

\overline{hf}° : entalpía de formación.

$h_{T288^\circ K}$: entalpía sensible en el estado especificado (15°C) temperatura de entrada del aire.

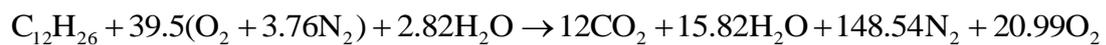
$h_{298^\circ K}$: entalpía sensible en el estado de referencia estándar de 25°C y 1 atm.

$h_{T754^\circ K}$: entalpía sensible en el estado especificado (556°C) temperatura de salida de los gases.

La ecuación que debe de cumplir

$${}^1 H_{\text{productos}} = H_{\text{reactivos}}$$

$${}^7 \sum N_{\text{prod}} \left[\overline{hf}^\circ + (\overline{h} - \overline{h}^\circ) \right]_{\text{prod}} = \sum N_{\text{reac}} \left[\overline{hf}^\circ + (\overline{h} - \overline{h}^\circ) \right]_{\text{reac}} \quad \text{Ec. 4.7}$$



$$12 * \overline{hCO_2} + 15.82 * \overline{hH_2O} + 148.54 * \overline{hN_2} + 20.99 * \overline{hO_2} = H_{\text{total}}$$

⁷ Yanus A. Cengel, Termodinámica, Tomo II.

Entalpías de productos y reactantes

$$\begin{aligned}
 H_r &= && -1028662,5 \\
 H_p &= && -10286637 && + && \Sigma h_{\text{productos}} * N_{\text{mol}} \\
 H_{\text{total}} &= && 9257974,3 && && \text{Kj /Kmol} \\
 H_{\text{promedio}} &= && 46916,2 && && \text{Kj /Kmol}
 \end{aligned}$$

Se suma todas las moles de productos para sacar un promedio de las entalpías de los productos de formación en Kj / Kmol.

Temperaturas aproximadas de los productos de acuerdo a las tablas de los **46916.2 Kj / Kmol.**

Productos	Temperaturas (°K)
O ₂	1434.81
N ₂	1495.41 mayor
CO ₂	1075.65 menor
H ₂ O	1257.54

Tabla 4.2 Entalpías de productos del aire (1075°K).

Productos	Entalpías 1075 (# de moles	
O ₂	34194	21	717732,1
N ₂	32762	148,5	4866467,5
CO ₂	47153	12	565836,0
H ₂ O	39223	15,8	620507,9
Entalpía de formación			6770543,4

Fuente: Cengel II, tablas de propiedades, figuras y diagramas (unidades de SI).

Tabla 4.2 Entalpías de productos del aire (1495°K).

Productos	Entalpías 1495 (°K)	# de moles	
O ₂	49292	21	1034639,1
N ₂	47073	148,5	6992223,4
CO ₂	71078	12	852936,0
H ₂ O	57999	15,8	917544,2
Entalpía de formación			9797342,7

Fuente: Cengel II, tablas de propiedades, figuras y diagramas (unidades de SI).

Entalpía final de formación:

Entalpía final de formación

	1495	K	9797342,7	Kj /Kmol
T flama adiabática =	1420,2	K	9258295,3	Kj /Kmol
	1075	K	6770543	Kj /Kmol

La temperatura de flama adiabática es

Temperatura teórica = 1420.2 (°K)

Temperatura real = 60 % de la temperatura teórica

Temperatura real de la flama adiabática = 852 (°K)

Esta temperatura va a ser la temperatura de entrada de los gases de combustión.

4.1.5 ANÁLISIS DE FLUJO DE COMBUSTIBLE Y GASES DE COMBUSTIÓN.

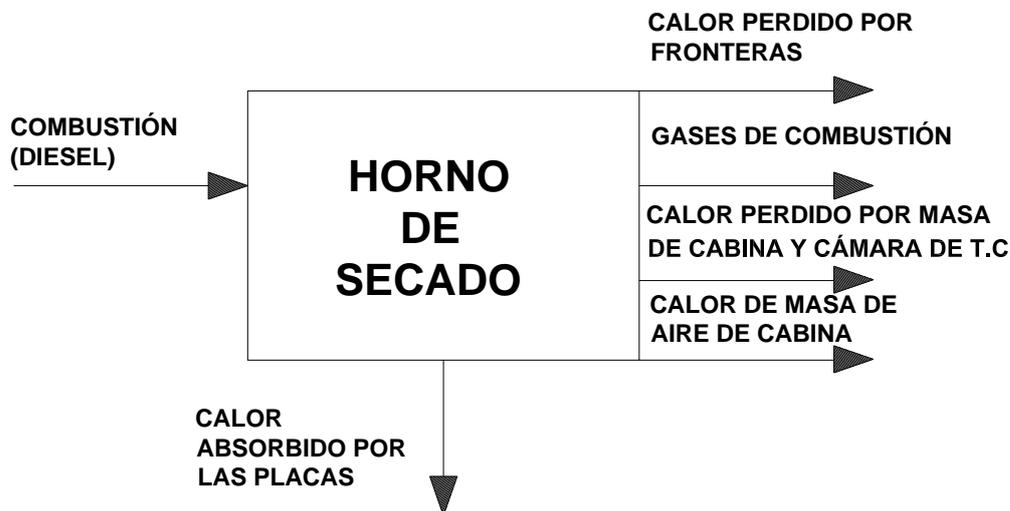
En el funcionamiento del horno habrá un flujo de combustible, el cual dará como resultado el poder calórico máximo del sistema. Por lo cual los cálculos deberán ser realizados a partir de esta energía.

Es por eso que se empezará realizando el análisis de los diagramas de flujo de calor del horno y de la cámara de transferencia de calor.

Utilizando el diagrama de flujo de calor para el horno de secado se obtendrá el consumo de diesel.

$$\sum Q_{\text{entrada}} = \sum Q_{\text{salida}}$$

$$Q_{\text{combustión}} = Q_{\text{gases combustión}} + Q_{\text{pérdidas por fronteras}} + Q_{\text{masa aire}} + Q_{\text{placa}} + Q_{\text{masa (Cabina+cámara de T.C.)}}$$



En este análisis todo estará en función del flujo de diesel (m_{diesel}).

$${}^8 Q_{\text{combustión}}: \quad m_{\text{diesel}} * c_{\text{cdiesel}} \quad \text{Ec. 4.8}$$

$$Q_{\text{gases combustión}}: \quad m_{\text{gases}} * c_{\text{pg}} * \Delta T.$$

En este caso se deberá aplicar la siguiente ecuación. Que relaciona el flujo de diesel con el flujo de gases de combustión.

⁸ Yanus A. Cengel, Termodinámica, Tomo II

Se aplicará la sumatoria de masas que entran es igual a masas que salen. La masa de gas que sale por la chimenea es igual a la suma de la masa de diesel y la masa de aire, a continuación se detalla.

$$m_{\text{gases}} = \frac{m_{\text{diesel}}}{\text{Masa de diesel}} + \frac{A_{\text{Cestequiométrica}} * \text{exceso de aire} * m_{\text{diesel}}}{\text{Masa de aire}}$$

$$m_{\text{gases}} = m_{\text{diesel}} + 15 \text{ Kg aire/Kg comb} * 2.136 * m_{\text{diesel}}$$

$$m_{\text{gases}} = (32.04 + 1) * m_{\text{diesel}}$$

$$m_{\text{gases}} = 33.04 * m_{\text{diesel}}$$

Reemplazando esta relación queda así:

$$Q_{\text{gases combustión}} = 33.04 * m_{\text{diesel}} * c_{\text{pg}} * \Delta T.$$

Al no haber un dato real del calor específico de los gases de escape por combustión, este dato será evaluado por medio de una fórmula del resultado de una tesis en la Escuela Politécnica Nacional.

$${}^9 c_{\text{pg}} = (0.9554 + 4.083 * 10^{-4} * T_{\text{sh}} - 8.571 * 10^{-8} * T_{\text{sh}}^2) * 10^3 \quad \text{Ec. 4.9}$$

T_{sh} = temperatura de salida de los gases de combustión del horno (458.8 °K)

A continuación se calculará el calor de pérdidas por frontera:

En las pérdidas por frontera se a incluido las pérdidas por el calor necesario para calentar la masa de acero de la cabina y la cámara de transferencia de calor hasta la temperatura equilibrio, y por último las pérdidas por el calor que se pierde en las fronteras.

⁹ Gordillo, Simulación de Intercambiadores de calor. Proyecto de Tesis.

Calor que se pierde en las fronteras.

$$q_x = \frac{T_{oaire} - T_{iaire}}{\left[\left(\frac{1}{h_{ac}A} \right) + \left(\frac{L_a}{K_a A_a} \right) + \left(\frac{L_{fv}}{K_{fv} A_{fv}} \right) + \left(\frac{L_a}{K_a A_a} \right) + \left(\frac{1}{h_{af}A} \right) \right]}$$

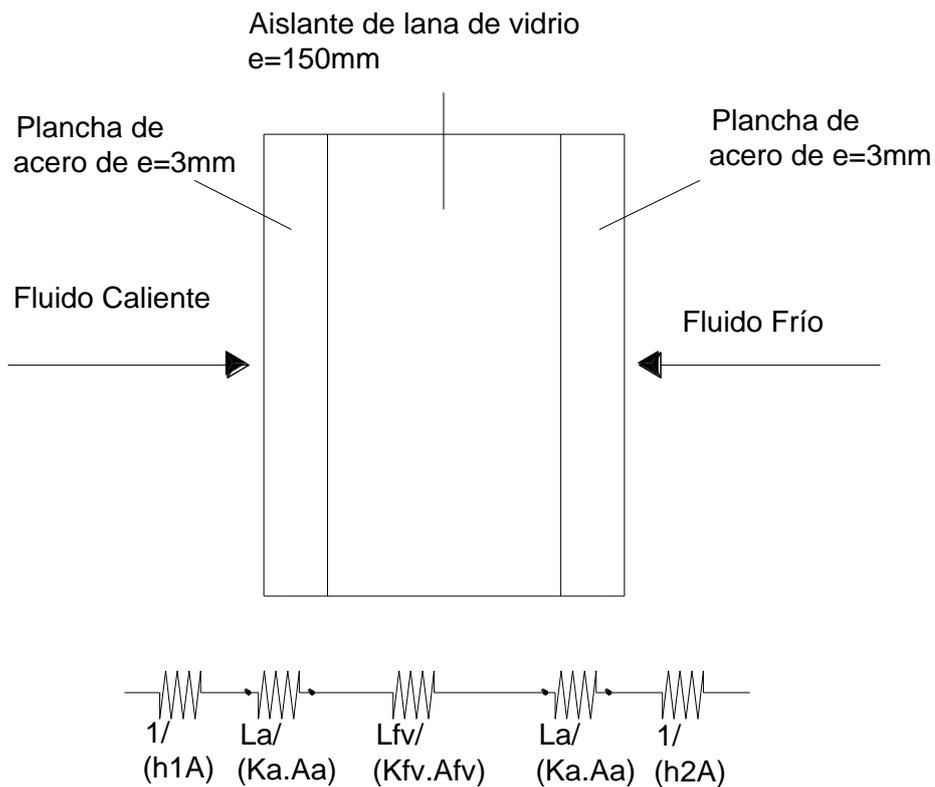


Fig. 4.5. Pérdidas por frontera.

El área que se toma para el cálculo de las pérdidas de calor por fronteras es la suma de las áreas de las paredes de la cabina y la cámara de transferencia de calor.

Ahorno = Acabina + Acámara de transferencia de calor.

Datos:

Ccdiesel =	41000	kJ / kg
Tsh =	458,8	°k
hac =	43,6	J / (m ² *s*k)
haf =	8	J / (m ² *s*k)
ka =	37,7	J / (m*s*k)
kfv =	0,036	J / (m*s*k)
La =	0,003	m
Lfv =	0,15	m
Toaire =	463,8	°k
Tiaire =	288,2	°k
Tigcomb =	852,1	°k

Calculo de área de paredes

Acabina =	104860000	mm ²
Acámara =	37600000	mm ²
Ahorno =	142,5	m ²

Calculo de pérdida de calor por frontera

qx =	5798,2	w
qx =	20873,7	kJ / h

Calor que se pierde por la masa de la cabina y la cámara de transferencia de calor.

Cálculo del calor para calentar a temperatura equilibrio la masa de acero de la cabina y de la cámara de transferencia de calor.

macero = mcabina + mcámara de transferencia de calor

macero = Aa * eplanchas-acero * densidad del acero

Datos :

eplanchas-acero =	3	mm
δacero =	0,00000813	Kg / mm ³
macero =	3475,0	kg
Cpacero =	434	J (kg*k)

Ingresamos un factor de pérdidas en la cabina y cámara de transferencia de calor el cual va a ser 1.20, dicho factor se determinó por todo el material que se encuentra dentro del horno que prácticamente se va a calentar a la misma temperatura de equilibrio.

Q(cabina + cámara de transferencia de calor) = mT * 1.20 * cpacero * ΔT.

Calor de la masa de acero de la cabina y cámara de transferencia de calor

Qacero = 317826,9 kj / h

Cálculo de pérdida de calor por el calentamiento de la masa del aire.

Qmaire = maire * Cpaire * ΔT

maire = volumen de cabina (45 m³) * δaire

Calor por calentamiento de la masa del aire

$\delta_{\text{aire}} =$	0,94	Kg / m ³
$m_{\text{aire}} =$	42,34	Kg
$C_{\text{paire@288,15}^\circ\text{K}} =$	1,005	Kj / (Kg*°K)
$C_{\text{paire@465,97}^\circ\text{K}} =$	1,021	Kj / (Kg*°K)
Q_{maire} =	7326,7	Kj / h

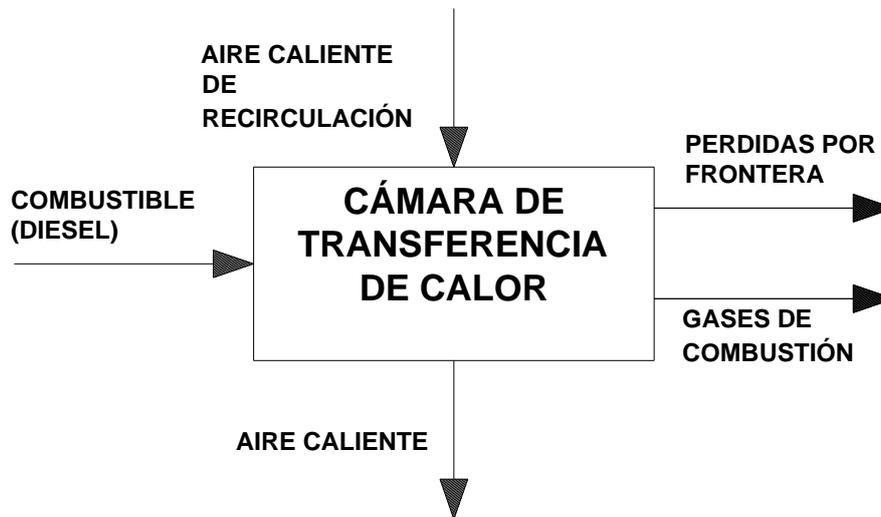
Cálculo del flujo de combustible y gases de combustión

$C_{\text{pg}} =$	1,125	kj / (kg*°k)
Q_{gases comb} / m_{diesel} =		14175,5
$m_{\text{diesel}} =$	23,3	kg / h
$m_{\text{diesel}} =$	0,0065	kg / s
Flujo diesel =	7,29	Gal / h
$m_{\text{gcomb}} =$	746,8	kg / h
$m_{\text{gcomb}} =$	0,21	kg / s

4.1.6 CÁLCULO DE FLUJO MÁSSICO DEL AIRE.

Luego de haber determinado el flujo del combustible y por consiguiente el de los gases de combustión, se determinará a continuación el flujo de aire para el óptimo funcionamiento conjunto del intercambiador, el quemador y los ventiladores.

Para calcular el flujo de aire necesario se utilizará el diagrama de calor de la cámara de combustión.



$Q_{\text{diesel}} = Q_{\text{aire}} + Q_{\text{pérdidas frontera}} + Q_{\text{gases de combustión}}$.

$m_{\text{diesel}} \cdot c_{\text{cdiesel}} = m_{\text{aire}} \cdot c_{\text{paire}} \cdot (T_{\text{equilibrio}} \cdot .15) + m_{\text{gcomb}} \cdot c_{\text{pg}} \cdot \Delta T +$

$m(\text{cámara de transferencia de calor}) \cdot c_{\text{pacero}} \cdot \Delta T$.

Cálculo del flujo del aire

$c_{\text{cdiesel}} =$	41000	Kj / Kg
$c_{\text{paire}} =$	1,01	Kj / (Kg*°K)
$c_{\text{pg}} =$	1,125	Kj / (Kg*°K)
$c_{\text{pacero}} =$	0,434	Kj / (Kg*°K)
$m_{\text{diesel}} =$	23,31	Kg / h
$m_{\text{gcomb}} =$	746,82	Kg / h
$\delta_{\text{acero}} =$	0,00000813	Kg / mm ³
$\delta_{\text{aire@460,9°K}} =$	0,94	Kg / m ³
$T_{\text{aire}} =$	463,76	°K
$T_{\text{iaire}} =$	288,15	°K
$T_{\text{ogcomb}} =$	458,76	°K
$T_{\text{igcomb}} =$	852,12	°K

Flujo del aire

maire =	16133,49	Kg / h
flujo de aire =	10092,41	CFM

4.1.7 ANÁLISIS DE RECIRCULACIÓN DE AIRE.

Es el análisis más importante del proyecto, pues es donde se va a realizar varios cambios en su diseño y funcionamiento. Se encontró un deficiente funcionamiento y un total desperdicio del calor producido por el quemador.

En este proyecto se a determinado como prioridad el aprovechamiento del calor producido por el quemador. Por lo cual se determinó que de acuerdo al flujo de aire calculado que fue de 10092,41 CFM se deberá instalar dos dampers o ventiladores de 5000 CFM cada uno. El funcionamiento de cada ventilador es el siguiente.

Tiene dos bocas de entrada y salida de aire, la boca de entrada o de succión de aire estará conectada al ducto número 1 o el de salida de aire de la cabina. Dicho ducto esta ubicado en la parte superior de la cabina, lo que quiere decir que como el aire caliente tiende a ir hacia arriba por ser menos denso, estos ventiladores absorberán el aire más caliente de la cabina para recircular por la cámara de transferencia de calor.

La boca de salida de aire o de desfogue estará conectada con la cámara de transferencia de calor para luego ser trasladado el aire caliente hacia la cabina por el ducto número 2 o de entrada de aire caliente hacia la cabina. Este ducto de entrada de aire caliente se divide en su parte superior en dos ductos que están ubicados en los lados de la cabina, como se verá en el gráfico.

El ducto tiene su boca de entrada de aire caliente en la cámara de transferencia de calor y su boca de salida de aire tiene en la parte inferior de la cabina, logrando con esto mover todo el aire frío que se acumula en la parte inferior y además obtener una buena circulación del aire en el interior de la cabina, esto ayuda también a obtener una temperatura de equilibrio en la mayor parte de la cabina.

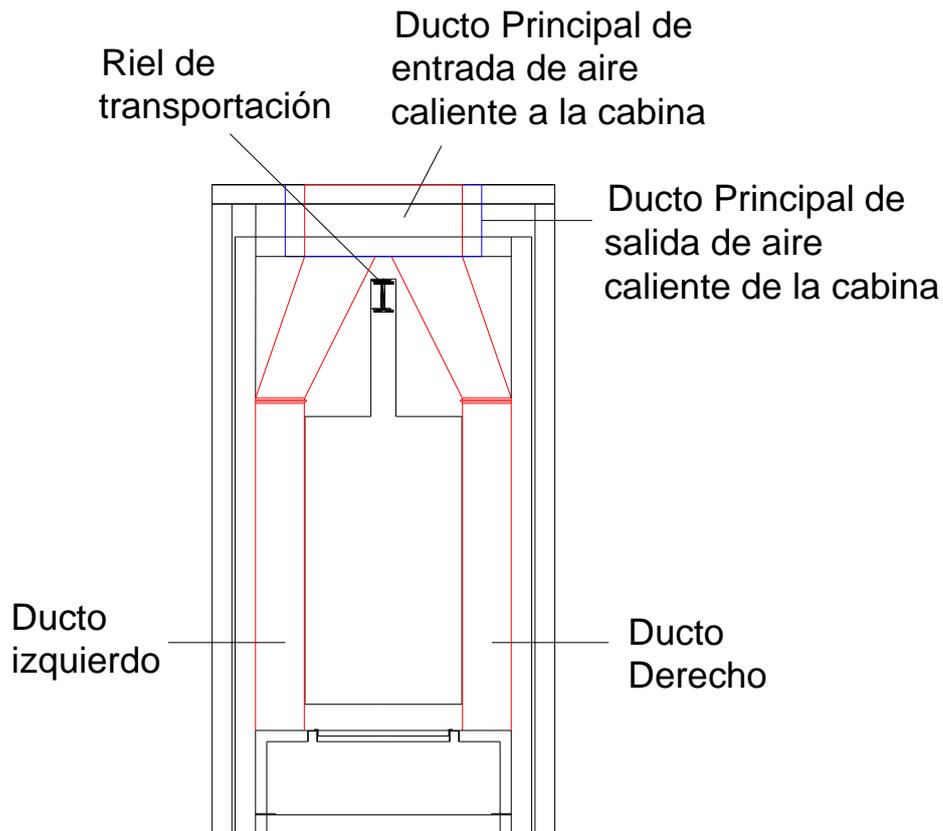


Fig 4.6. Partes del ducto de circulación de aire caliente V.F.

Se cumplirán dos etapas en el calentamiento del aire, la primera etapa consistirá en calentar de la temperatura ambiente (15°C) hasta la temperatura de equilibrio (190.6°C), para luego pasar a la siguiente fase que será de mantener la temperatura de equilibrio.

Para los cálculos en el diseño de intercambiador de calor se debe determinar una temperatura a la cual luego de haber llegado a la temperatura de equilibrio se de el ingreso del aire caliente de la cabina hacia la cámara de transferencia de calor.

El gradiente de temperatura entre la temperatura de equilibrio y la de ingreso a la cámara de transferencia de calor será la décima parte de la temperatura de equilibrio. $(0.1 * 190.6 \text{ } ^\circ\text{C}) \cong 20^\circ\text{C}$. Este gradiente será utilizado para cualquier cálculo luego de que se haya logrado el equilibrio de temperatura en el horno.

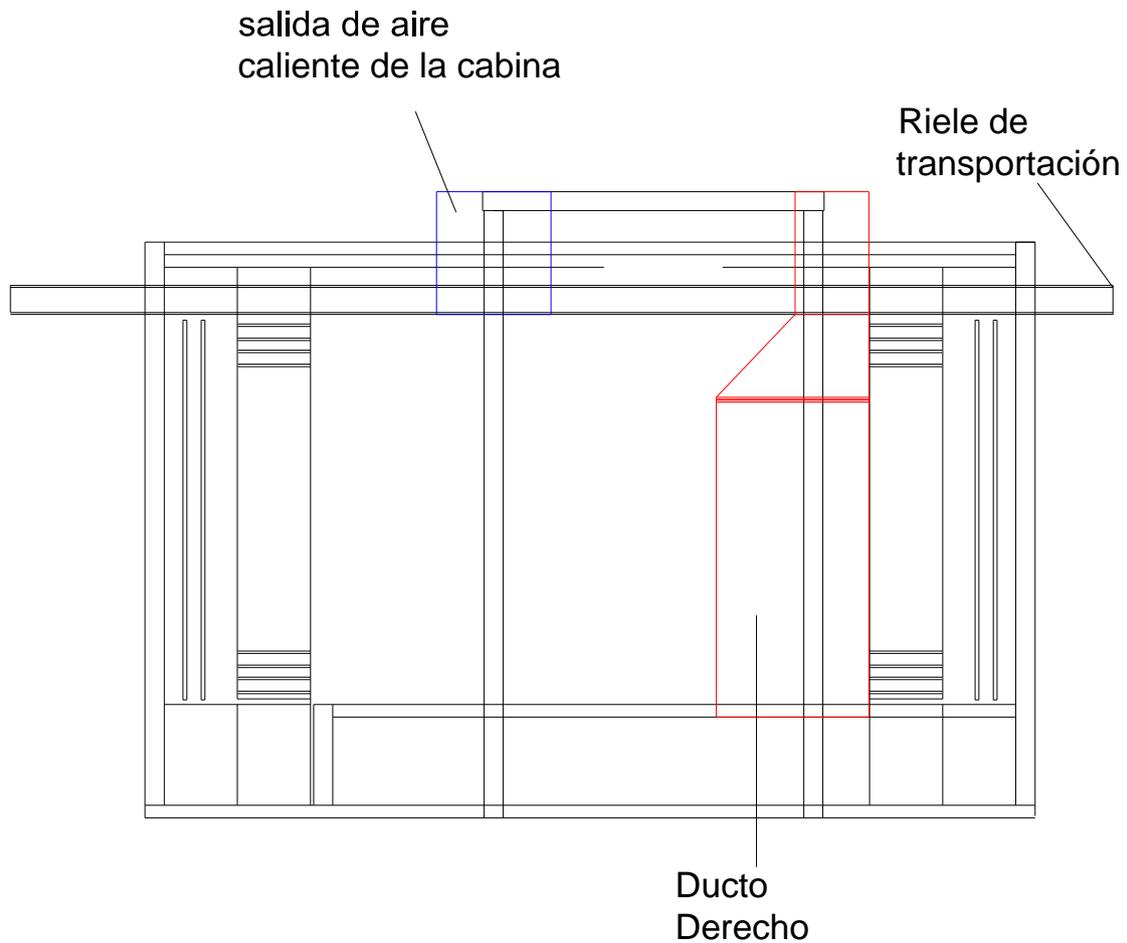


Fig. 4.7. Partes del ducto de circulación de aire caliente V.L.

4.1.8 DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.

Luego de tener definido los flujos del combustible, gases de combustión y aire, se determinará el diseño del intercambiador de calor.

El intercambiador de calor será usado para calentar aire. En este caso el aire será el fluido frío y los gases de combustión serán el fluido caliente. Los gases de combustión como ya lo hemos dicho con anterioridad son producidos por un quemador a diesel.

Estos gases de combustión irán por el interior del intercambiador de calor, mientras que el aire irá por fuera. Esto quiere decir que los flujos no se mezclan, la no mezcla de los fluidos se da por la contaminación que produce la combustión del diesel, cabe resaltar que esto le quita eficiencia al sistema.

El tipo de intercambiador que se va a utilizar, se le denomina Intercambiador de calor compacto, el cual se usa cuando se desea un área superficial de transferencia de calor por unidad de volumen grande y al menos uno de los fluidos es un gas. Como ya lo habíamos dicho antes los dos fluidos son gas.

Al producirse una combustión por medio del quemador se deberá construir un hogar o cámara de combustión para que se produzca la misma. Luego de que se produzca la combustión, los gases que se producen circularán por un arreglo de tubos. Este arreglo de tubos será definido en el número de pasos y el número de tubos aleatoriamente. Para lo cual se utilizó el mathcad, realizando repeticiones de los cálculos para llegar al diseño más eficiente.

En esta cámara de transferencia de calor se tendrá la interacción de dos condiciones, la primera será la de los gases de combustión y la segunda será el flujo de aire. Se deberá calcular el coeficiente global de transferencia de calor, para lo cual se determinará los respectivos coeficientes de transferencia de calor en el caso de los gases de combustión y el flujo de aire.

Cálculo del coeficiente de transferencia de calor de los gases de combustión.

Se define aleatoriamente el diámetro de los tubos que serán utilizados para la circulación de los gases de combustión. Hay que señalar que los datos de los gases de combustión no se encuentran tabulados, para los cálculos necesarios, por lo cual se tomarán las siguientes ecuaciones para determinar la densidad, la capacidad calórica, la conductividad térmica y la densidad.

Capacidad calórica.

$$^{10} C_{pg} = (0.9554 + 4.083 * 10^{-4} * T_{media} - 8.571 * 10^{-8} * T_{media}^2) * 10^3 \quad \text{Ec. 4.10}$$

Viscosidad.

$$^{11} \mu_g = (0.028 + 5.1107 * 10^{-4} * T_{media} - 1.6229 * 10^{-7} * T_{media}^2 + 2.7798 * 10^{-11} * T_{media}^3) * 10^{-4} \quad \text{Ec. 4.11}$$

Conductividad térmica

$$^{12} k_g = (-0.015 + 9.1569 * 10^{-4} * T_{media} - 3.4557 * 10^{-7} * T_{media}^2 + 9.0221 * 10^{-11} * T_{media}^3) * 0.1 \quad \text{Ec. 4.12.}$$

Densidad

$$^{13} \delta_g = 345.0667 * T_{media}^{-1} \quad \text{Ec. 4.13}$$

Tabla 4.4 Propiedades de los gases de combustión

Gases de combustión				
Temperatura	Cp	Kg	U	δg
K	J/(Kg*K)	W/(m*K)	N*s/m2	Kg/m3
1000,00	1277,99	0,06	0,0000405	0,36
905,59	1254,86	0,06	0,0000378	0,38
852,12	1241,76	0,06	0,00003627	0,40
192,83	1080,24	0,02	0,00001742	0,65
522,47	1161,00	0,04	2,68434E-05	0,53

Fuente. Tabulado por formulas anteriormente señaladas.

La velocidad de los gases de combustión a la cual van a circular por los tubos.

$$^{14} G_t = \frac{m_{comb}}{at}; \quad \text{Ec. 4.14}$$

Con la velocidad de los gases, se debe calcular el número de Reynolds.

$$^{15} Re_{comb} = \frac{D_i * G_t}{\nu_{comb}}; \quad \text{Ec. 4.15}$$

^{10, 11, 12, 13} Gordillo, Simulación de Intercambiadores de calor. Proyecto de Tesis.

^{14, 15}, Donald Kern, Procesos de Transferencia de calor.

Calculado el número de Reynolds se determinará si el fluido tiene un flujo turbulento o un flujo laminar.

El número de Prandtl, se calculará para conjuntamente con el número de Reynolds calcular el número de Nusselt.

$${}^{16} \text{Pr}_{\text{comb}} = C_{p\text{comb}} * \frac{v_{p\text{g}}}{k_{p\text{g}}}; \quad \text{Ec. 4.16}$$

El número de Nusselt será el principal factor para determinar el coeficiente de transferencia de calor. Se calcula de la siguiente manera.

$${}^{17} \text{Nu}_{\text{comb}} = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) * \text{Re}_{\text{comb}} * \text{Pr}_{\text{comb}}}{1.07 + 12.7 * \left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}} * \left(\text{Pr}_{\text{comb}}^{\frac{2}{3}} - 1\right)}; \quad \text{Ec. 4.17}$$

Factor de fricción:

$${}^{18} f = (0.79 * \ln(\text{Re}_{\text{comb}}) - 1.64)^{-2} \quad \text{Ec. 4.18}$$

Finalmente se calcula el coeficiente de transferencia de calor.

$${}^{19} h_{\text{comb}} = k_{\text{comb}} * \left(\frac{\text{Nu}_{\text{comb}}}{D_h}\right) \quad \text{Ec. 4.19}$$

¹⁶, Donald Kern, Procesos de Transferencia de calor.

¹⁷, ¹⁸, ¹⁹ Frank P. Incropera, Fundamentos de transferencia de calor.

Cálculo del coeficiente de transferencia de calor del aire.

Se va a utilizar la teoría de flujo a través de un banco de tubos, que en este caso se a determinado que será de configuración escalonada, como se muestra en la figura.

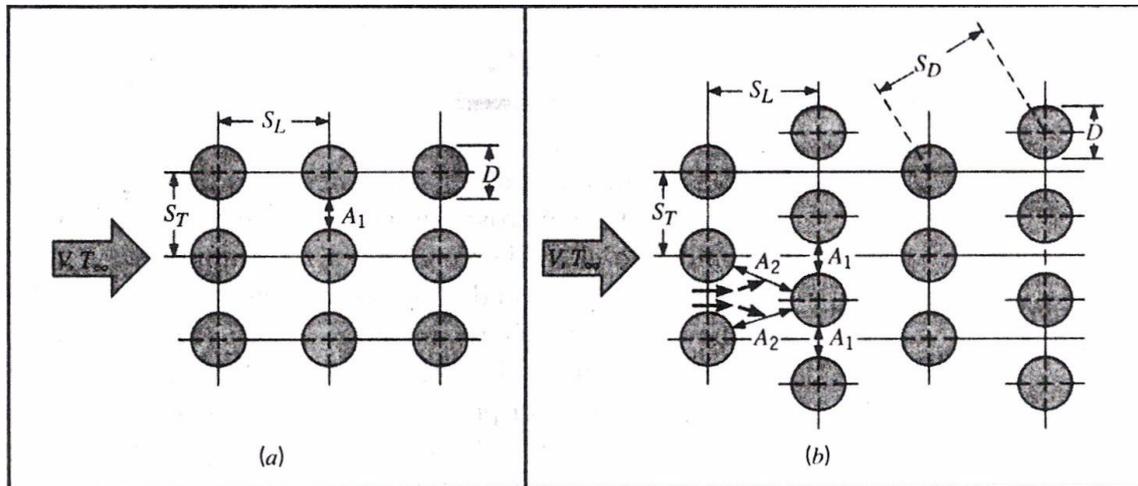


Fig. 4.8. Arreglo de tubos en un banco. (a) Alineados. (b) Escalonados.

El arreglo de tubos escalonado tiene dos características en cuanto a la ubicación de los tubos, que son las distancias S_L y S_T . Estas distancias serán asumidas de acuerdo al anexo 15 y por iteraciones en los cálculos se escogió las siguientes:

$$^{20} S_L = 1.5 * D_e \quad \text{Ec. 4.20}$$

$$^{21} S_T = 1.25 * D_e \quad \text{Ec. 4.21}$$

$$^{22} S_d = \sqrt{\left(S_L^2 + \left(\frac{S_T}{2} \right)^2 \right)} \quad \text{Ec. 4.22}$$

Con los espacios definidos se procede a calcular el espacio que tendrá el aire para pasar a través del arreglo de los tubos, el cual se determina de la siguiente manera.

$$H_{\text{tubos}} = (N_{\text{espacios}} * S_T); \quad \text{Ec. 4.23}$$

$$A_{\text{aire}} = H_{\text{tubos}} * L_{\text{tubo}} \quad \text{Ec. 4.24}$$

²⁰, ²¹, ²² Frank P. Incropera, Fundamentos de transferencia de calor.

La velocidad del aire en la cámara de transferencia de calor se calculará así:

$$^{25} V_{\text{aire}} = \left(\frac{m_{\text{aire}}}{\delta_{\text{aire}} * A_{\text{aire}}} \right) \quad \text{Ec. 4.25}$$

$$^{26} V_{\text{max}} = ST * \frac{V_{\text{aire}}}{ST - De} \quad \text{Ec. 4.26}$$

Con la velocidad se puede ya calcular el número de Reynolds.

$$^{27} Re_{\text{aire}} = \delta_{\text{aire}} * V_{\text{max}} * \frac{De}{\nu_{\text{aire}}} \quad \text{Ec. 4.27}$$

Sabiendo el número de Reynolds, se determina si es un flujo turbulento o un flujo laminar.

El número de Nusselt se calcula para posteriormente determinar el coeficiente de transferencia de calor.

$$^{28} Nu_{\text{aire}} = \left[1.13 * C1 * Re_{\text{aire}}^m * Pr_{\text{aire}}^{0.36} * \left(\frac{Pr_{\text{aire}}}{Pr_{\text{aires}}} \right)^{\frac{1}{3}} \right] * C2 \quad \text{Ec. 4.28}$$

El coeficiente de transferencia de calor se determina de la siguiente manera.

$$^{29} h_{\text{aire}} = Nu_{\text{aire}} * \frac{k_{\text{aire}}}{De} \quad \text{Ec. 4.29}$$

²⁵ Donald Kern, Procesos de transferencia de calor.

²⁶, ²⁷, ²⁸, ²⁹ Frank P. Incropera, Fundamentos de transferencia de calor.

Una vez calculados los coeficientes de transferencia de calor de los gases de combustión y del aire, se calculará el coeficiente global de transferencia de calor el cual nos determina cuanto calor estamos transmitiendo en el sistema de acuerdo al área y a la temperatura.

$${}^{30}U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{\text{aire}}}\right) + \left(\frac{1}{h_{\text{comb}}}\right)} \quad \text{Ec. 4.30}$$

Diferencia de temperatura media logarítmica, se calculará con las temperaturas del proceso.

$${}^{31}\Delta T_{\text{ml}} = \left[F^* \left[\frac{(\Delta T_2 - \Delta T_1)}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \right] \right]; \quad \text{Ec. 4.31}$$

$$\Delta T_2 = T_{\text{aire}} - T_{\text{aire}}$$

$$\Delta T_1 = T_{\text{igcomb}} - T_{\text{aire}}$$

Cálculo del calor que se transferirá con el diámetro interior de la tubería, la longitud de la misma, y la diferencia de la temperatura logarítmica y el número de tubos.

$${}^{32}Q = L_{\text{tubo}} * U * D_i * \Delta t_{\text{ml}} * \pi * N_t \quad \text{Ec. 4.32}$$

Finalmente se calcula el área de transferencia de calor necesaria con una cierta eficiencia por el método de eficiencia – NUT, las dos se calcularán por dicho método.

³⁰, ³¹, ³² Frank P. Incropera, Fundamentos de transferencia de calor.

- Capacitancia máxima.

$$^{33} C_{\max} = C_{\text{aire}} * m_{\text{aire}} \quad \text{Ec.4.33}$$

- Transferencia de calor mínima

$$^{34} Q_{\min} = C_{\max} * (\Delta T_{\text{Final}}) \quad \text{Ec.4.34}$$

- Capacitancia mínima.

$$^{35} C_{\min} = C_{\text{comb}} * m_{\text{comb}} \quad \text{Ec. 4.35}$$

- Transferencia de calor máximo.

$$^{36} Q_{\max} = C_{\min} * (T_{\text{comb}} - T_{\text{aire}}) \quad \text{Ec. 4.36}$$

- Eficiencia del intercambiador de calor.

$$^{37} \varepsilon = \frac{Q_{\min}}{Q_{\max}} \quad \text{Ec. 4.37}$$

- Relación de capacidad de calor.

$$^{38} C_r = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \quad \text{Ec. 4.38}$$

³³, ³⁴, ³⁵, ³⁶, ³⁷, ³⁸ Frank P. Incropera, Fundamentos de transferencia de calor.

- Número de unidades de transferencia de calor.

$${}^{39} \text{Nut} = - \left[\ln \left[1 + \left(\frac{1}{\text{Cr}} \right) * \ln(1 - \varepsilon \text{Cr}) \right] \right] \quad \text{Ec. 4.39}$$

- Área de transferencia de calor.

$${}^{40} \text{Atn} = \text{Nut} * \frac{\text{Cmin}}{\text{U}} \quad \text{Ec. 4.40}$$

- Número de tubos.

$${}^{41} \text{Ntubos} = \frac{[\text{Atn} - \text{Ahogar}]}{\pi * \text{De} * \text{Ltubo} * n} \quad \text{Ec. 4.41}$$

A continuación están los resultados de los cálculos realizados en Excel.

Cálculo del coeficiente de transferencia de calor para los gases de combustión

Datos :

Dn =	2	pulg
Dn =	0,0508	m
De =	0,0603	m
Di =	0,0525	m
Ltubo =	2	m
mgcomb =	0,21	kg / s
Nt =	56	Tubos
n =	2	Pasos
Tigcomb =	852,1	k
Togcomb =	458,8	k
vcomb =	0,0000307	N*s/m ²
kcomb =	0,0473	W /(m*k)
Cpcomb =	1194,2	J/(kg*K)
δmcomb	1,05	lb/m ³

³⁹, ⁴⁰, ⁴¹ Frank P. Incropera, Fundamentos de transferencia de calor.

Diámetro hidráulico

$$P_m = 0,165$$

$$D_h = 0,053$$

Velocidad de los gases de combustión

$$a_t = 0,057 \quad \text{m}^2$$

$$G_t = 7,94 \quad \text{lb}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$$

$$V_{\text{comb}} = 16,71 \quad \text{m/s}$$

Número de Reynolds

$$\text{Re}_{\text{comb}} = 13550,85$$

Número de Prandt

$$\text{Pr}_{\text{comb}} = 0,77$$

Número Nusselt

$$f = 0,029$$

$$\text{Nu}_{\text{comb}} = 40,0$$

Coeficiente de transferencia de calor de los gases de combustión

$$h_{\text{comb}} = 36,1 \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{K})$$

Cálculo del coeficiente de transferencia de calor para el aire.

Datos :

Dn =	2	pulg
Dn =	0,0508	m
De =	0,0603	m
Di =	0,0525	m
Ltubo =	2	m
maire =	4,5	kg / s
Nt =	56	Tubos
n =	2	
Ntt =	7	filas
Ntl =	8	columnas
Toaire =	463,8	k
Tiaire =	288,2	k
vaire =	2,19161E-05	N*s/m ²
kaire =	0,03	W /(m*k)
Cpaire =	1012,3	J/(kg*K)
δmaire	0,9	lb/m ³
Praire =	0,7	
C1 =	0,45	
m =	0,57	
C2 =	0,96	
Praires =	0,70	
F =	0,85	

Área de flujo del aire.

Sl =	0,09
St =	0,075
Sd =	0,098
Hintcalor =	1,078
Aflujoaire =	2,156

Velocidad de flujo del aire.

Vaire =	2,176	M/s
Vmax-aire =	10,88	M/s

Cálculo del número de Reynolds

$$\text{Reaire} = 27998,76$$

Cálculo del coeficiente de transferencia de calor.

$$h_{\text{aire}} = 76,49 \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{K})$$

Coeficiente global de transferencia de calor en la cámara de transferencia de calor.

$$U = 24,52 \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{K})$$

Cálculo de la temperatura media logarítmica.

$$\Delta T_2 = 177,83 \quad ^\circ\text{K}$$

$$\Delta T_1 = 386,14 \quad ^\circ\text{K}$$

$$\Delta T_{\text{ml}} = 228,36 \quad ^\circ\text{K}$$

Cálculo del calor necesario

$$Q = 103452,2 \quad \text{Kj} / \text{h}$$

Cálculo de la capacitancia, eficiencia NUT

$$C_{\text{max}} = 4536,7$$

$$Q_{\text{min}} = 77124,3 \quad \text{kJ} / \text{h}$$

$$C_{\text{min}} = 247,7$$

$$Q_{\text{max}} = 139714,3 \quad \text{kJ} / \text{h}$$

$$\varepsilon = 0,55$$

$$C_r = 0,05$$

Cálculo de la capacitancia NUT

$$\text{NUT} = 2,36$$

Área necesaria de transferencia de calor

$$\text{Atc} = 25,5 \text{ m}^2$$

Número de tubos ideal de acuerdo al diámetro elegido

$$\text{Ntub} = 28,0 \text{ Tubos}$$

Área determinada de transferencia de calor.

$$\text{Adtc} = 25,6 \text{ m}^2$$

4.1.9 DISEÑO DE LA CHIMENEA.

La función de la chimenea es reducir la contaminación del cercano al suelo por óxidos de azufre y otros gases y por partículas tales como polvo y nieblas ácidas, productos de la combustión de los combustibles modernos.¹⁵

Los hornos que utilizan quemadores que queman combustibles líquidos producen gases de combustión, los cuales son evacuados de la cámara de combustión mediante un ducto y conducidos al exterior por una chimenea.

El diseño de una chimenea tiene parámetros esenciales a controlar. La altura de la chimenea, el flujo de gases de combustión, tiro disponible, velocidad de salida de los gases de combustión y dimensiones de la chimenea.

El eficiente y satisfactorio funcionamiento de una chimenea, debe tener un diseño basado en los siguientes cálculos:

$${}^{42}P \geq P_c + P_f + P_b$$

Ec. 4.42

Donde:

P = tiro disponible (diferencial de presión)

P_c = carga de velocidad a la salida.

P_f = pérdidas por rozamiento.

P_b = pérdidas totales debidas a las curvaturas y cambios de sección.

El concepto de tiro disponible lo describe muy cuidadosamente K.P. Grubb, diciendo que: el efecto de flotabilidad (diferencial de presión creado por la chimenea) de la columna de los gases calientes en una chimenea a de proporcionar suficiente tiro para compensar las pérdidas totales en el sistema de combustión en la atmósfera a la velocidad de salida requerida.

Concepto exacto para un sistema de tiro natural, el cual es aplicable, con ciertas reservas, a diversos sistemas de tiro mecánico.

Este diferencial de presión está dado por la ecuación:

$${}^{43}p = 34.7H_{ch} \left[0.0035 - \frac{1}{T_g} \right] (\text{mbar}) \quad \text{Ec. 4.43}$$

Donde:

H_{CH} = altura de la chimenea por encima de la entrada.

T_g = temperatura media de los gases de la chimenea.

La temperatura media de los gases se determina calculando el promedio entre la temperatura de salida y la temperatura de entrada en el intercambiador.

La altura de la chimenea será un valor que determinará los resultados de las iteraciones realizadas.

⁴² K.P Grubb, Altura y diseño de las chimeneas.

⁴³ K.P Grubb, Altura y diseño de las chimeneas.

Al considerar el flujo de los gases en la salida de la chimenea se tiene la carga de velocidad, la cual expresada como una presión, se tiene:

$${}^{44} p_c = \frac{2.86 * q_g^2}{D^4 * T_g} \text{ (mbar)} \quad \text{Ec. 4.44}$$

Donde:

q_g = caudal de gas de la chimenea.

D = diámetro ducto.

El caudal de gas de la chimenea se lo calcula con la velocidad de los gases de combustión (v_g) y el área disponible:

$${}^{45} q_g = v_g * A_{ch} \quad \text{Ec. 4.45}$$

y la velocidad de los gases de combustión mediante la siguiente expresión:

$${}^{46} v_g = \sqrt{2 * g * H_{ch}} \quad \text{Ec. 4.46}$$

Los gases en movimiento están sujetos a ciertas resistencias, de las que resultan una reducción de la energía cinética.

Estas resistencias que pueden expresarse mejor como pérdida de la carga de velocidad, están causadas por el rozamiento con el material de la chimenea y por las curvaturas o cambios de sección.

⁴⁴, ⁴⁵, ⁴⁶, K.P. Grubb, Altura y diseño de las chimeneas.

La pérdida por rozamiento esta dada por:

$${}^{47} p_f = 7.07 * \frac{f_{ch} * H_{ch} * v g^2}{Dh * T_g} \text{ (mbar)} \quad \text{Ec. 4.47}$$

Donde f_{ch} es el factor de rozamiento y está dado mediante el anexo 22.

Las pérdidas por curvaturas y cambios de sección se determinan con la ecuación:

$${}^{48} P_b = 1.77 * \frac{k * v g^2}{T_g} \text{ (mbar)} \quad \text{Ec. 4.48}$$

Donde K es el coeficiente de pérdida de energía, dado mediante el anexo 25.

En este diseño no tiene curvaturas ni cambios de secciones, por lo que $P_b = 0$.

Cálculos para el cálculo de la chimenea.

Datos:

Tigcomb =	852,12	K
Togcomb =	460,98	K
g =	9,80	m/s ²
Hch =	4,50	M
Dch =	0,45	M
fch =	0,0036	

Cálculo del diferencial de presión

Tg =	656,55	°K
P =	0,31	Mbar

^{48, 47} K.P. Grubb, Altura y diseño de las chimeneas.

Cálculo de la presión por carga de velocidad.

vg =	9,39	m/s
qg =	1,49	m ³ /s
Pc =	0,24	mbar

Cálculo de la presión por rozamiento

$$p_f = 0,03 \quad \text{mbar}$$

Determinación de $P \geq P_c + P_f$

P	Pc + Pf
0,31	0,27

Con estos resultados se determinó que el diámetro de la chimenea debe tener un diámetro de 0.45 metros para un satisfactorio funcionamiento.

4.1.10 SELECCIÓN DE QUEMADOR.

La selección del quemador depende de muchos parámetros: el tipo de combustible, el flujo de combustible que se quemará, las pérdidas de presión y la altura a la cual va a funcionar el quemador.

En este caso el combustible será diesel con un poder calórico por combustión de 41000 Kj/Kg. Por medio de los cálculos realizados en la determinación del flujo de combustible se obtuvo un flujo de 7.18 gal/h de combustible.

La altura de funcionamiento será de 2800 msnm, a esa altura se encuentra la Planta Quito Novacero Aceropaxi S.A. .

En los quemadores la presión que tendrá que superar los gases de combustión es la más importante de los parámetros. Esta presión va a depender de varios parámetros: la geometría del recipiente donde circularán los gases y el tipo de material.

El tipo de material es el que influye en las pérdidas por rozamiento las cuales son muy pequeñas, mientras que la geometría es la que más influye al momento de comparar la capacidad de empuje del ventilador del quemador y la presión que se necesita para vencer la trayectoria del intercambiador de calor.

El intercambiador de calor tiene una geometría compleja; tiene un hogar de 2.3 metros de largo y un hogar de 0.6 metros de diámetro, luego tenemos un giro de 360° para que los gases ingresen al primer paso de arreglo de tubos, estos tubos tienen un largo de 2 metros de largo, luego el flujo da otro giro de 360° para que los gases ingresen al segundo paso de arreglo de tubos que tienen un largo de 2 metros para por último ingresar a la chimenea de 0.45 m de diámetro, por la cual saldrán los gases de combustión al ambiente.

A continuación los cálculos para determinar la pérdida de presión que existe en el intercambiador.

Las pérdidas que se dan en el intercambiador de varios tipos que son:

- Pérdida por rozamiento.
- Pérdidas por curvaturas o cambio de sección.

4.1.10.1 Pérdida por rozamiento.

En todos los conductos por los que circula aire existe una continua pérdida de presión. Esta pérdida de presión se llama también pérdida de carga por rozamiento y depende de:

1. La velocidad del aire.
2. Tamaño de los conductos.
3. Rugosidad de la superficie interior.
4. Longitud de los conductos.

En este sistema se va a producir principalmente en el hogar y en los tubos, para lo cual debemos calcular la pérdida distintamente pero con los mismos procedimientos.

Caída presión en el hogar.

$$^{49} \Delta P = 0.4 * f * \left(\frac{L}{d^{1.22}} \right) * v^{1.82} \quad \text{Ec. 4.49}$$

donde:

ΔP = pérdida de carga en mm c.a.

f = rugosidad de la superficie interior.

L = Longitud del conducto en m.

d = diámetro del conducto circular (en centímetros) equivalentes a otro rectangular.

V = velocidad del aire en m/s.

⁴⁹ Carrier Air Conditioning Company, Manual de aire acondicionado.

Se calcula la velocidad de los gases de combustión en el interior del hogar y en el interior de los tubos.

$$G_t = \frac{m_{\text{comb}}}{a_t}; \quad \text{Ec.4.50}$$

$$V_{\text{comb}} = \frac{G_t}{\delta_g}. \quad \text{Ec.4.51}$$

Se selecciona un factor de rugosidad de la superficie interior, acero galvanizado.

$$f = 0.9$$

Con todos estos datos se determinará la caída presión en el hogar.

Caída de presión en el arreglo de tubos.

Se utiliza la formula de un flujo interno de acuerdo a su desplazamiento y su velocidad de flujo.

$${}^{52} \Delta p = f * \frac{\delta * v_m^2}{2 * D_i} * \left(\frac{2 * L * N_{\text{tubos}}}{n} \right) \quad \text{Ec.4.52}$$

Donde:

f = factor de fricción de Moody. (o darcy).

δ = densidad de los gases de combustibles.

V_m = Velocidad media de los gases de combustión en el interior de los tubos.

⁵² Donald Kern, Procesos de transferencia de calor.

Por último tendremos la pérdida de presión en el sistema, que en este caso es el intercambiador de calor.

$$P_{total} = \Delta p_{hogar} + \Delta p_{tubos} + N_{codos} * \Delta p_{codo}.$$

A continuación los cálculos de las pérdidas tanto en el hogar como en los tubos.

Pérdidas para el quemador.

Datos:

Lhogar =	2,3	m
Ltubos =	2	m
F =	0,9	
Dhogar =	0,6	m
Ditubos =	0,0525	m
Ntubos =	56	tubos
n =	2	pasos
Ncodos =	5	codos
ucomb =	3,07492E-05	N*s/m ²
ucombtub =	2,52276E-05	N*s/m ³
δm_{comb} =	0,475	Kg/m ³
at =	0,06	m ²
s =	0,8	pie/s ²
mgcomb =	0,2	Kg / s

Cálculo de velocidades en el hogar y en el arrgelo de tubos.

Vgtubos =	7,10	m/s
Vghogar =	1,52	m/s

Cálculo de las pérdidas por rozamiento en el hogar y en los tubos.

Phogar =	3,3	mm agua
Ftubos =	0,0003	
φ =	1,03	
Ptubos =	7,5	mm agua

Cálculo de las pérdidas en el codo de unión en los pasos del arreglo de tubos.

W1 =	0,5	m
H =	0,7	m
W2 =	0,3	m
Co =	1,67	
Co1 =	2,33	
Pcodos =	0,81	mm agua

Pérdidas totales del sistema

Ptotal =	14,86	mm agua
----------	-------	---------

Entonces la caída de presión o pérdida de presión en el intercambiador de calor es de 14.86 mm agua. Este dato es el más importante en el momento de seleccionar un quemador.

De acuerdo a las características que se a mencionado en este capítulo se llego a selección del quemador. Este quemador fue de marca Weishaupt, modelo WL 40 Z-A. Esta marca es líder mundial en el mercado de los quemadores siendo su principal característica las altas presiones que puede vencer.

4.1.11 SELECCIÓN DEL VENTILADOR.

Como se a venido hablando durante todo el proyecto, el principal cambio en cuanto al diseño y al funcionamiento del horno de secado se produjo en la recirculación del aire caliente, por lo cual se decidió cambiar el sistema de flujo de aire. Los ventiladores que se van a utilizar son estrictamente para recircular el aire caliente, por lo cual deben soportar temperaturas de 200°C, presiones que calcularemos a continuación y producir un flujo de aire de 5000 CFM cada uno de los ventiladores.

Las pérdidas se darán de acuerdo a las áreas de los ductos por los cuales transitará el aire. Se adecuará la dimensión de los ductos para llegar a la selección óptima de los ventiladores.

Las pérdidas se producen de dos maneras, por rozamiento y por curvaturas o cambio de sección.

4.1.11.1 Cálculo de las pérdidas para los ventiladores.

El recorrido del aire tiene una serie de secciones donde se producen pérdidas de presión, por cualquiera de las razones ya mencionadas.

Hay que señalar que mientras más caliente está el aire más difícil es movilizar el mismo, por lo cual mientras avanza el recorrido del aire debe haber menor caída de presión para un mejor funcionamiento.

Para poder calcular este tipo de pérdidas se utiliza el siguiente procedimiento.

Como primera sección es el paso del aire por el arreglo de tubos. Donde se va a producir una caída de presión por rozamiento.

$$^{53} \Delta p = N_L * X \left(\frac{\delta * V^2_{\max}}{2} \right) * f \quad \text{Ec.4.53}$$

Donde:

N_L = Número de líneas de tubos por las cuales pasará el aire.

X = Factor de correlación. (anexo 12)

f = Factor de fricción. (anexo 11)

Luego tenemos el paso por el hogar, donde se produce una caída de presión por cambio de sección y por rozamiento.

Por Rozamiento:

$$^{54} \Delta P = 0.4 * f * \left(\frac{L}{d^{1.22}} \right) * v^{1.82} \quad \text{Ec. 4.54}$$

Donde:

ΔP = pérdida de carga en mm c.a.

f = rugosidad de la superficie interior.

L = Longitud del conducto en m.

d = diámetro del conducto circular (en centímetros) equivalentes a otro rectangular.

V = velocidad del aire en m/s.

⁵³ Donald Kern, Procesos de transferencia de calor.

⁵⁴ Carrier Air Conditioning Company, Manual de aire acondicionado

Se selecciona un factor de rugosidad de la superficie interior, acero galvanizado.

$$f = 0.9$$

Diámetro equivalente de la sección rectangular en una circular.

$$Dequivalente = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}}$$

Por cambio de sección:

Tenemos también una pérdida por la posición de ubicación del hogar con relación a la carcasa. La tomaremos como una tubería que atraviesa el conducto, en este caso el conducto es la carcasa de la cámara de transferencia de calor.

$${}^{55} h_v = \left(\frac{V_{aire}}{4} \right)^2 \quad \text{Ec.4.55}$$

Donde:

h_v = diferencia de presión dinámica.

V_{aire} = velocidad del aire en m/s.

$${}^{56} \Delta p = n * h * v_1 \quad \text{Ec.4.56}$$

Donde:

n = factor de velocidad

⁵⁵, ⁵⁶Donald Kern, Procesos de transferencia de calor.

Luego entramos al ducto que conducirá el aire caliente de la cámara de transferencia de calor hacia la cabina. Este ducto se divide en tres partes, en las cuales se produce pérdidas por rozamiento y por cambio de área de la sección.

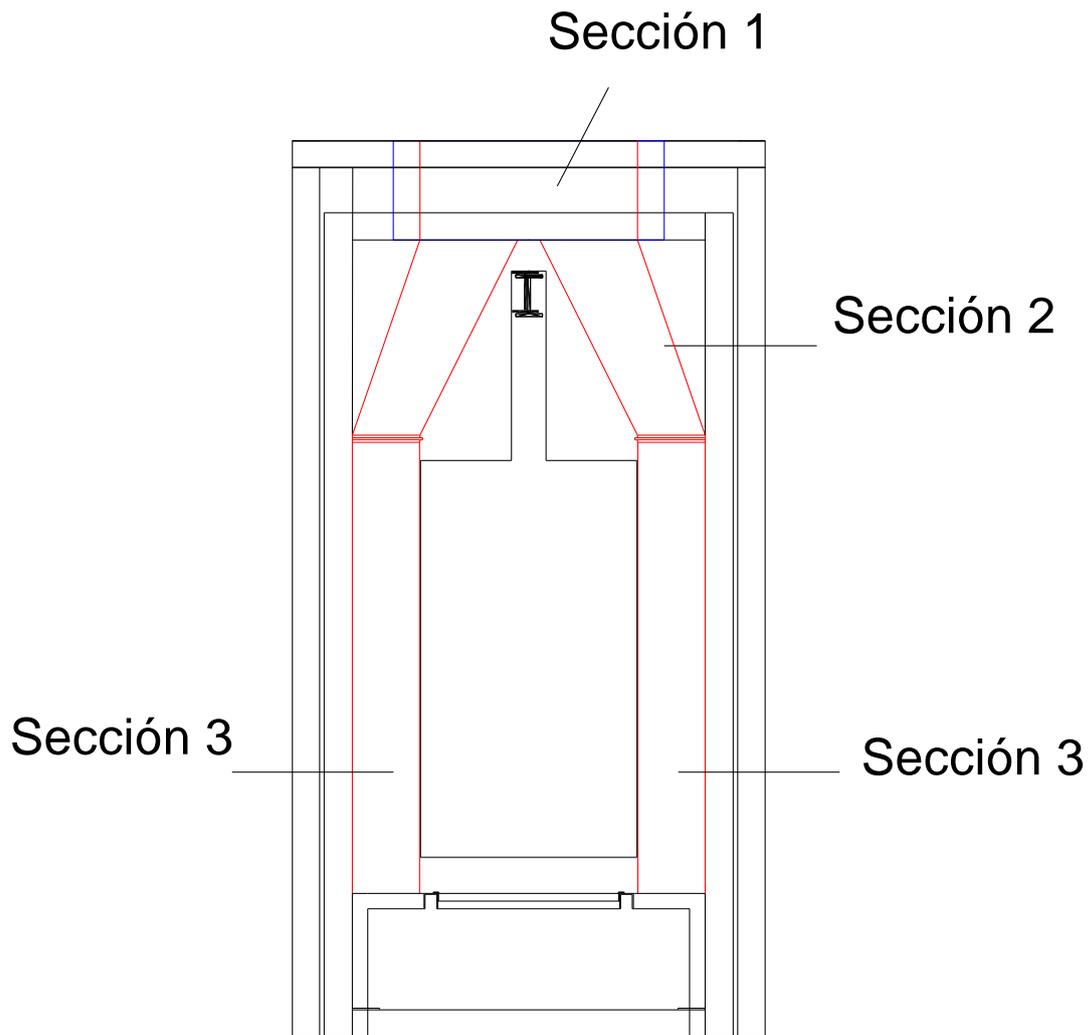


Fig. 4.9 Descripción de partes de los ductos de recirculación.

En la parte superior del ducto existe una perdida solo por rozamiento.

$$\Delta P = 0.4 * f * \left(\frac{L}{d^{1.22}} \right) * v^{1.82}$$

La velocidad sería la que se produce al ingreso del flujo al ducto.

$$V_{\text{aire}} = \frac{\text{maire}}{\delta_{\text{aire}} * A_{\text{ducto}}}$$

Luego pasaría a la sección 2 donde se produce la perdida por dos razones, por rozamiento y por cambio de sección.

Por rozamiento.

$$\Delta P = 0.4 * f * \left(\frac{L}{d^{1.22}} \right) * v^{1.82}$$

La velocidad sería un promedio de la velocidad que entra con la que sale.

$$V_{\text{aire}} = \frac{\text{maire}}{\delta_{\text{aire}} * A_{\text{ducto}}}$$

Las pérdidas por cambio de sección de flujo son determinadas por el siguiente procedimiento. En este caso es una ampliación del ducto, donde se produce una ganancia de presión.

$$h_v = \left(\frac{V_{aire}}{4} \right)^2$$

Donde:

h_v = diferencia de presión dinámica.

V_{maire} = velocidad media del aire en m/s.

Calculado la diferencia de presión dinámica, se calcula la caída de presión. En este caso como se produce una expansión de área se produce una ganancia de presión.

$$^{57} \Delta p = [n * (h * V1 - h * V2)] \quad \text{Ec.4.57}$$

Donde:

n = Factor de velocidades.

h = diferencia de presión dinámica.

Por último se calcula la pérdida por la tercera sección del ducto, en donde se produce pérdida solo por rozamiento en una mayor longitud.

Se calculará con la siguiente formula:

$$\Delta P = 0.4 * f * \left(\frac{L}{d^{1.22}} \right) * v^{1.82}$$

⁵⁷ Carrier Air Conditioning Company, Manual de aire acondicionado.

Cálculos de las pérdidas en el sistema de recirculación del aire caliente con respecto al funcionamiento del ventilador.

Pérdidas en el ventilador.

Datos :

Nl =	8,0	Líneas
fc =	0,6	
fdg =	0,9	
δ_{aire} =	0,694	Kg/m ³
St =	0,075	
Sl =	0,090	
De =	6,030	mm
Dhogar =	600,00	mm
maire =	4,397	Kg/s
Vmaxctc =	10,88	m/s
Virectc =	2,18	m/s
Latubos =	1,5	m
hctc =	1,15	m
actc =	2,0	m
hducto1 =	0,6	m
aducto1 =	1,2	m
L1 =	0,55	m
hducto2 =	2,40	m
aducto2 =	0,36	M
L2 =	1,2	M
hducto3 =	1,2	M
aducto3 =	0,72	M
L3 =	5,08	M

Calculo de pérdidas en el paso por el hogar.

Por Rozamiento

Diámetro equivalente

Dequivalente =	171,35	Cm
$\Delta p =$	0,003	mm agua

Por cambio de sección

Diferencia de presión dinámica.

$h_v =$	0,30	
$E/D =$	0,35	
$n =$	0,74	
$\Delta p =$	0,47	mm agua

Calculo de pérdidas en el paso del aire por el arreglo de tubos.

$P_l =$	0,02	
$P_t =$	0,01	
$A_x =$	0,83	
$X =$	1,30	Tabla
$\Delta p =$	264,3	N/m^2
$\Delta p =$	27,0	mm agua

Pérdidas en el ducto de aire recirculación de aire caliente.

Sección 1

Por rozamiento

Diámetro equivalente

Dequivalente =	95,75	cm
$V_{\text{aireducto}} =$	8,97	m/s
$\Delta p =$	0,03	mm agua

Sección 2

Por rozamiento

Dequivalente =	104,9	cm
Vaireducto =	7,5	m/s
$\Delta p =$	0,038	mm agua

Por cambio de sección

Diferencia de presión dinámica.

hv1 =	45,1	
hv2 =	26,1	
V2/V1 =	0,8	
Angulo =	5,00	
n =	0,31	
$\Delta p_{ganancia} =$	6	mm agua

Sección 3

Diámetro equivalente

Dequivalente =	104,9	cm
Vaireducto =	7,5	m/s
$\Delta p =$	0,08	mm agua

Perdida total de presión

$\Delta p_{total} =$	22	mm agua
----------------------	----	---------

La caída de presión total que se produce en el sistema de recirculación del aire caliente es de 22 mm agua, por lo cual se eligió un ventilador centrífugo con una potencia de 4hp y una capacidad de 5000 CFM, y puede vencer presiones de hasta 38.1 mm de ca con un 15% de reducción en su capacidad de flujo.

CAPITULO V.

Proceso de construcción, montaje y operación.

Los procesos van a consistir en la construcción: del intercambiador de calor, ductos de recirculación del aire caliente, el hogar y la carcaza de la cámara de transferencia de calor; el montaje del intercambiador de calor, ductos de recirculación de aire caliente, el hogar y la cámara de transferencia de calor; y por último la operación del horno con su nuevo diseño ya instalado.

5.1 Proceso constructivo de la cámara de transferencia de calor.

La cámara de transferencia de calor se divide en tres partes: la carcaza de la cámara de transferencia de calor, el hogar y el intercambiador de calor.

El proceso de construcción se dará de la siguiente manera. El diseño del intercambiador de calor y el del hogar ya está definido en el capítulo IV, por lo cual se empezará el proceso de construcción del intercambiador y el hogar.

Para el proceso de construcción del intercambiador de calor y el hogar se cuenta con la asistencia de un soldador, un ayudante de soldador y el proyectista.

De acuerdo al diseño del intercambiador y hogar se determinó los siguientes parámetros.

El material que se va utilizar para la construcción del intercambiador de calor y el hogar es el acero, para esta selección se tomaron algunos puntos en cuenta. Se decidió por el acero, por su facilidad en cuanto a la adquisición, además el costo es aceptable y de acuerdo con el presupuesto.

Dentro de los aceros se escogió a la familia de los inoxidable, ya que el hogar va a estar en contacto con la llama directamente, lo que quiere decir que tiene que soportar una temperatura de 850 a 900 °C, entonces su velocidad de oxidación en el caso del acero A36 hubiese sido mayor. Dentro de los aceros inoxidable se seleccionó al AISI 304, pues no se va a producir ningún tipo de esfuerzo a tracción o compresión considerable.

En cuanto a dimensiones tanto del hogar como del intercambiador de calor son las siguientes:

El diámetro del hogar es de 600 mm, pues su amplitud le permitirá a la llama del quemador tomar su forma habitual y facilitará a la circulación de gases. El espesor del hogar es de 4mm, por el desgaste que se produce en el mismo. El largo del hogar es de 2000 mm, teniendo la llama una longitud aproximada de unos 1500 a 1700 mm.

Las placas para construir el hogar fueron cortadas con plasma y guillotina, todos aquellos cortes que fueron en líneas curvas se los realizó en el plasma. Por la longitud del hogar y por las dimensiones de la materia prima, tiene dos partes de 1000 mm, las dimensiones de las placas para realizar el ducto del diámetro antes señalado, cumplen con las siguientes medidas, 1000 * 1910 mm.

Estas placas serán roladas para lograr su geometría adecuada. Una vez que por medio del rolado se les de la forma circular a esas placas, se procede a soldar; En la fig 5.1. podemos observar un esquema del proceso de rolado, en primera instancia a lo largo y por último en la unión de las dos partes, para por último soldar este ducto al acople de codo.

Fase de Rolado

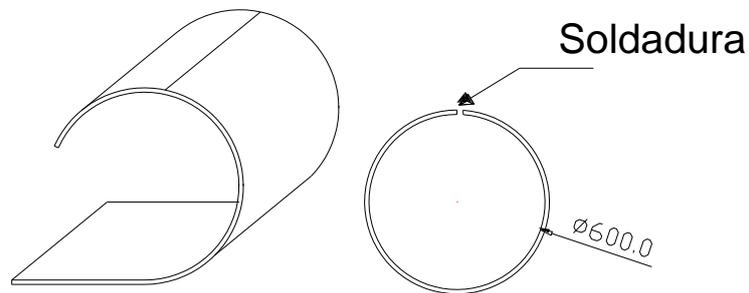


Fig. 5.1 Rolado de placa hogar.

El arreglo de tubos del intercambiador de calor fue construido con tubos de diámetro exterior de 2 pulgadas y cédula 40, por lo cual su espesor es de 3.91 mm, suficiente para el desgaste y temperatura que va a soportar; el largo de estos tubos es de 2000 mm.

Arreglo de Tubos

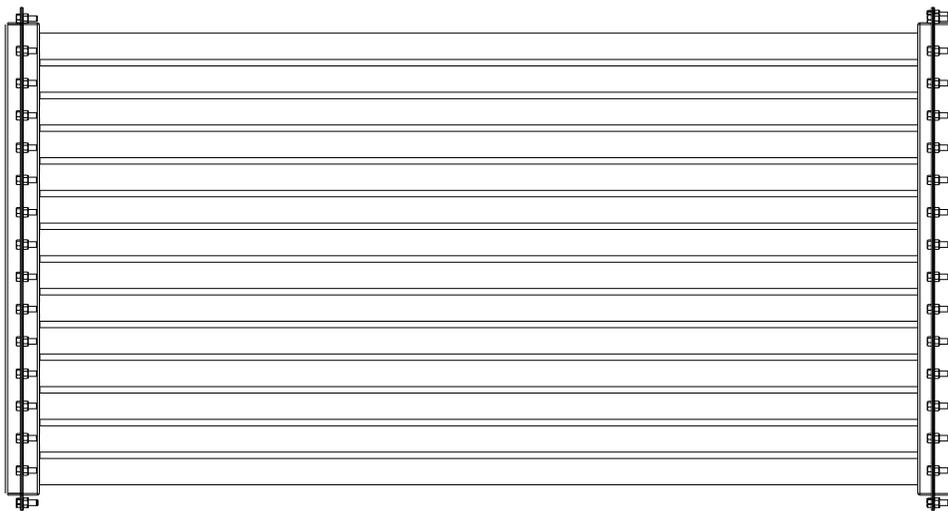


Fig. 5.2 Esquema de Arreglo de tubos.

Ya definido el diámetro de la tubería de acero inoxidable y el largo de los mismos, conjuntamente con las uniones de los tres pasos, el diámetro del hogar y el largo del mismo.

Con lo cual se obtuvieron todas las dimensiones necesarias para realizar en primera instancia los planos constructivos, para posteriormente empezar la construcción.

El proceso de construcción empezará con cortes tanto de tubería como de planchas, a las medidas ya especificadas, para luego proseguir con el doblado de los elementos ya cortados, posteriormente se perfora en los que sean necesarios.

Los cortes de la planchas fueron hechos en la guillotina de cortes hasta seis mm, y los doblados fueron hechos en la prensa de 400 TON. El radio de curvatura del dado de la prensa es de 10 mm, como se puede observar en la Fig.5.3; eso fue tomado en cuenta en las dimensiones de los planos.

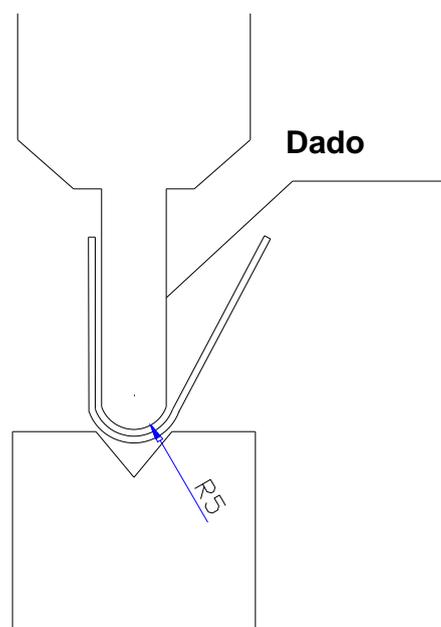


Fig.5.3 Esquema de radio curvatura del Dado de prensa 400 Ton.

Luego se procede con la soldadura de todos los elementos; empezando por cada uno de los tubos del arreglo, para posteriormente soldar codos hasta llegar al hogar. Esta soldadura se realizó con electrodo R91 de diámetro 1/8. Con esto la parte constructiva del intercambiador y el hogar, se realizará a la par de la construcción de las columnas y vigas de la carcaza de la cámara de transferencia de calor las cuales serán soldadas con alambre tipo ER70 S – 3 para mig cuyo diámetro es de 0.9 mm. Todas las columnas, vigas y tapas de la carcaza de la cámara fueron realizadas con acero A – 36, con espesores que van entre 2.5 y 3.9 mm.

Luego de esto, se realizarán dos actividades a la vez; el montaje del intercambiador del calor y el hogar, en la parte superior del horno, y el corte de planchas para la carcaza de la cámara de transferencia de calor. Las columnas y vigas serán instaladas luego de haber sido montado el intercambiador de calor y el hogar.

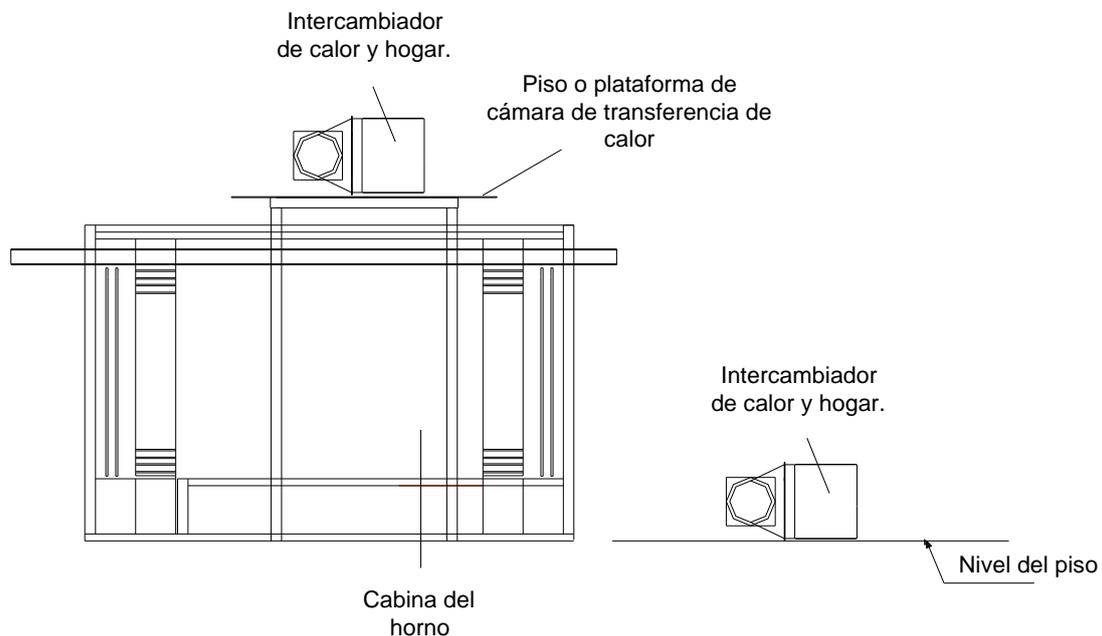


Fig. 5.4 Ubicación del intercambiador de calor.

Para mayor facilidad al momento de realizar los mantenimientos, se decidió realizar perforaciones de 9/16", tanto en el intercambiador de calor como en el hogar. Con lo cual se optó por colocar pernos de 1/2".

Las perforaciones se realizaron con un taladro en posición vertical, y se procedió de la siguiente manera. Se colocó una broca de 9 mm, realizando todas las perforaciones, luego se realizó el mismo procedimiento con la broca de 9/16" mm, esto facilita el proceso de perforado, además se produce menor desgaste de las brocas.

Por último para completar con la totalidad de la construcción y el montaje se procede con la instalación de los ventiladores y del quemador, los cuales serán ejecutados de acuerdo al manual de operación .

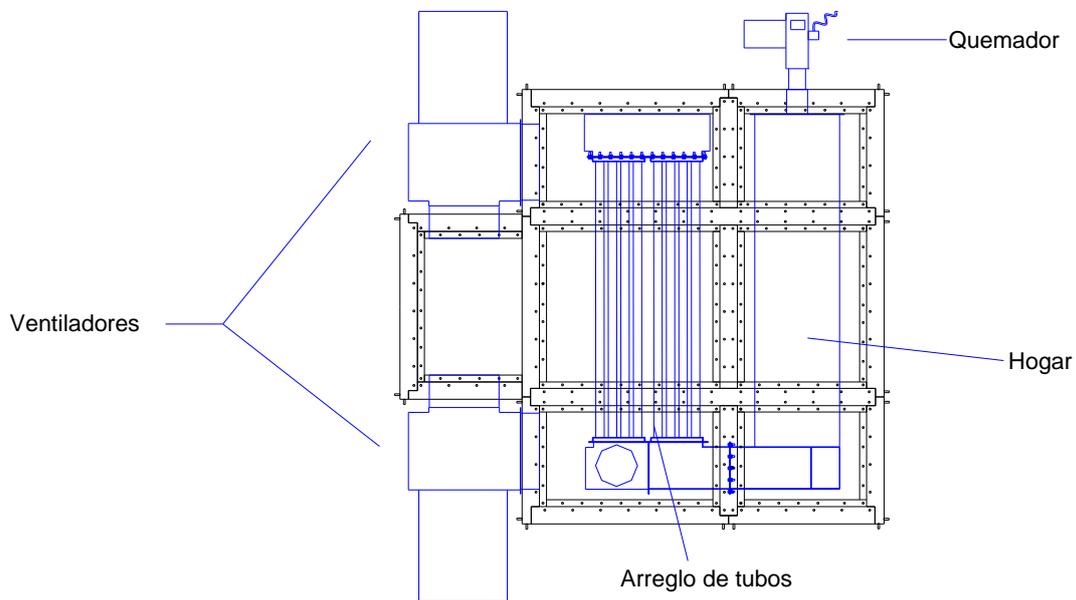


Fig. 5.5 Configuración de máquinas y sistemas de la cámara de transferencia de calor.

Las vigas y columnas tienen una geometría diseñada para un mantenimiento fácil y específico. La facilidad nos da la utilización de pernos y no de suelda, puesto que antiguamente se tenía que cortar las placas para realizar los mantenimientos. Y lo específico es la ubicación de las columnas y vigas como se ve en la figura 5.4.

5.1.1 Secuencia de actividades principales.

Las actividades para la readecuación del horno fueron agrupadas en cuatro partes las cuales fueron las siguientes: a) construcción del intercambiador de calor, b) Construcción de la carcasa, c) readecuación de los ductos de recirculación del aire, y d) ensamblaje de la cámara de transferencia de calor.

Los tiempos muertos, no aparecen en este cronograma, ya que estos tiempos nunca fueron posibles de programar, puesto que la gente que presto la ayuda para la construcción era constantemente solicitada por la planta para realizar trabajos específicos dentro de la producción de la empresa. Obviamente que se tuvo ciertas demoras, pero fueron solucionadas a tiempo.

Los fines de semana, esto sábado y domingo, no fueron tomados en cuenta, como se podrá observar en el cronograma.

El número de personas requeridas para las actividades esta incluida con el proyectista.

Este cronograma fue realizado con datos basados en antiguos trabajos de mantenimiento, los cuales fueron realizados con el mismo objetivo que se lo esta haciendo ahora, pero no tuvieron resultados positivos.

CRONOGRAMA DE CONSTRUCCIÓN DE LA CÁMARA DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

Días	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	Número de personas.	
	Sem. 1					Sem. 2					Sem. 3				Sem. 4					
Construcción del intercambiador.																				
Cortar tubos acero inoxidable.	■																			2
Readecuar el hogar del antiguo intercambiador de calor.	■																			2
Doblado, rolado y perforado de planchas de acero inoxidable.	■	■																		2
Soldar tubos, codos y hogar.				■	■	■	■													3
Pruebas de ensamble del intercambiador.							■													3
Construcción de la carcaza.																				
Corte de vigas, soldada de pernos.	■																			3
Corte de tapas para la carcaza de la CTC.	■	■																		3
Readecuación de los ductos de recirculación del aire.																				
Reconstrucción de la parte inferior de los ductos.				■	■															3
Reconstrucción de la parte superior de los ducto.						■	■													3
Ensamblaje de la Cámara de transferencia de calor.																				
Instalación del intercambiador de calor.									■	■	■									5
Montaje de la carcaza de CTC y de los ventiladores.												■	■	■	■					4
Instalación eléctrica para los ventiladores.																■	■			1
Instalación de los ventiladores y quemador.																		■		2

5.1.2 Maquinaria, herramientas, materiales y personal.

A continuación se determinará la Maquinaria, herramientas, materiales y personal que se utilizará en este proyecto. En la construcción del proyecto se realizarán diferentes tipos de procesos, por lo cual se necesitará diferentes tipos de Máquinas con las cuales se facilitarán los procesos.

Maquinaria.

- Corte plasma.
Entradas:
 Voltaje 220V.
 Aire Comprimido.
Salida:
 Corte.

- Corte Oxi-Acetileno.
Entradas:
 Tanque Oxigeno.
 Tanque Acetileno.
 Chispa.
Salida:
 Corte.

- Máquina soldadora para electrodo.
Entradas:
 Voltaje 220V.
 Electrodo específico.
Salida:
 Unión de aceros varios.

- Máquina soldadora MIG.

Entrada:

Voltaje 220V.

Alambre específico.

Tanque de Dióxido de Carbono (CO₂).

Salida:

Unión de aceros varios, correcta penetración de hasta espesores de 4mm.

- Roladora.

Entrada:

Voltaje 220V.

Placa de acero.

Salida:

Placa Rolada.

- Polipasto.

Entrada:

Voltaje 220V.

Salida:

Elevación de carga.

- Monta carga.

Entrada:

Combustible –Diesel.

Operario.

Uñas de agarre.

Salida:

Elevación de carga.

- Moladora.

Entrada:

Voltaje 110V.

Disco de desbaste.

Disco de corte.

Salida:

Corte de acero.

Desbaste de acero.

- Sierra.

Entrada:

Voltaje 220V.

Sierra.

Salida:

Corte de acero de hasta 3 pulg. de ancho.

Herramientas.

- Chispero.
- Llave de boca.
- Pico.
- Media vuelta.
- Cabo.
- Flexo.
- Martillo.
- Cincel

Material.

- Planchas de acero inoxidable.
- Tubos de acero inoxidable.
- Electrodo R91, E 7018 y E 6011 de AGA.
- Alambre para MIG ER70 S – 3 AGA
- Discos de corte.
- Disco de desbaste.
- Acero A36.
- Oxígeno.
- Acetileno.
- Pernos de 12 mm de diámetro por 30 mm.
- Fibra de asbesto.

Protección personal.

- Tapones auditivos.
- Gafas de protección.
- Botas de protección mecánica.
- Overol.
- Casco.
- Guantes.
- Guantes para soldar.
- Casco de soldador.

Personal.

- Proyectista.
- Soldador.
- Ayudante del soldador.
- Operario 1.
- Operario 2.

5.1.3 Esquema de construcción.

ESQUEMA DE CONSTRUCCIÓN

Intercambiador de calor.

- ▶ Cortar tubos de acero inoxidable.
- ▶ Cortar placas de acero inoxidable.
- ▶ Cortar bridas.
- ▶ Soldar tubos para arreglo de tubos.
- ▶ Soldar placas para codos.
- ▶ Rolar y soldar placas para hogar.
- ▶ Soldar bridas a arreglo de tubos, codos y hogar.
- ▶ Rolar y soldar placas para chimenea y acople de chimenea.
- ▶ Prueba de ensamblaje con cordón de asbesto.

Construcción y ensamblaje de cámara de transferencia de calor.

- ▶ Cortar y doblar placas para ductos de recirculación de aire.
- ▶ Cortar placas para piso.
- ▶ Soldar y ensamblar piso.
- ▶ Cortar y doblar placas para vigas y columnas.
- ▶ Perforar columnas y vigas.
- ▶ Subir intercambiador de calor a la parte superior del horno.
- ▶ Ensamblar el intercambiador.
- ▶ Soldar columnas y vigas.
- ▶ Cortar, señalar y perforar placas para pared superior.
- ▶ Cortar, señalar y perforar placas para paredes laterales.
- ▶ Soldar pernos o tuercas en las vigas y columnas.
- ▶ Realizar pruebas de ventiladores comprados.
- ▶ Subir ventiladores.
- ▶ Cortar, doblar y soldar placas para acoples de ventiladores.
- ▶ Empernar placas superiores y laterales, internas.
- ▶ Medir y cortar planchas de lana de vidrio.
- ▶ Empernar placas superiores y laterales externas.
- ▶ Ensamblar acoples de ventiladores y chimenea.
- ▶ Fijar ventiladores.
- ▶ Realizar conexiones eléctricas de ventiladores y quemador.
- ▶ Conexión de diesel al quemador.

5.1.4 Procedimiento de soldadura.

En este proyecto utilizaremos dos tipos de soldadura la de electrodo y la mig. La soldadura de electrodo será utilizada en todo lo que es el intercambiador de calor y el ensamblaje de la carcasa de la cámara de transferencia de calor, incluyendo los pernos; mientras que la mig se utilizará para el ensamblaje individual de los perfiles que harán de columnas y vigas, las cuales serán soportes de las paredes de la carcasa.

En el caso de la soldadura por electrodo, se verifica que materiales se van a juntar, en este caso se va ha tener tres tipos de juntas, acero inoxidable - acero A36, acero A36 – acero A36 y acero inoxidable – acero inoxidable. Por lo tanto se utilizó dos tipos de electrodos de AGA. Para acero inoxidable – acero inoxidable y para acero A36 – acero inoxidable, se utiliza electrodo R91 de un 1/8 de diámetro; mientras que para acero A36 – acero A36, se utiliza electrodo 7018 y 6011 siendo su diámetro de 1/8 de pulgada, siendo este par de electrodos de penetración.

Luego de seleccionar el electrodo que se va a usar, se procede a limpiar cualquier tipo de rebaba en los filos de las placas de la junta. Especialmente en los lados a los cuales se los va empatar.

Se coloca las placas en la posición como se requiere y se procede a dar unos puntos de suelda, verificando la correcta posición de las placas, se realiza el bisel de acuerdo a la necesidad.

Una vez realizado el bisel se procede a realizar el cordón de suelda. La suelda su la realiza con ciertos parámetros, los cuales se detallaran más adelante.

Luego de haber realizado el cordón de suelda se deberá quitar la escoria para realizar una inspección visual, determinando si no existe burbujas, huecos o cuarteamientos del material. Habiendo realizado esto, se prosigue con la soldadura de los siguientes elementos.

En el hogar se tomó una precaución muy importante, puesto que cabe resaltar que en el hogar se va a tener temperaturas de aproximadamente 850 ° C; la cual fue de dar cordón de suelda a los dos lados, tanto interno como externo. Esto nos va a dar una seguridad en cuanto a fugas de llama.

5.1.4.1 Parámetros de soldadura.

Se seleccionó de acuerdo al catálogo y manual de AGA los electrodos y alambre para el proceso de soldadura mig.

Tabla 5.1 Características de electrodos en la construcción.

Características de los electrodos utilizados durante el proyecto.					
Marca	Electrodo	Corriente	ϕ (mm - pulg)	Amperaje	Aplicaciones.
AGA	E6011	CC	1/8	110	Estructuras y bastidores para máquinas
AGA	E7018	CC	1/8	120	Aceros de mediano y bajo contenido de carbono, baja aleación.
AGA	R91	CC	1/8	100	Aceros inoxidables. Para unir aceros disímiles. Altas temperaturas

Fuente: Datos determinados durante construcción.

Tabla 5.2. Características del alambre utilizado en el proceso mig.

Características del alambre utilizado en el proceso mig.					
Marca	Alambre	Amperaje	ϕ (mm - pulg)	Voltaje	Aplicaciones.
AGA	ER70 S – 3	22	0.9	105	Estructuras en general, Maquinarias.

Fuente: Datos determinados durante construcción.

5.2 Montaje del Intercambiador de calor.

El montaje del intercambiador de calor es algo muy importante con respecto a los resultados del funcionamiento del horno.

Se comenzará ensamblando el intercambiador en el nivel del piso para determinar cualquier falla que pueda existir, y en caso de existir dicha falla se procederá a corregir. Luego de haber realizado la prueba de ensamble se procederá a desarmar el intercambiador para posteriormente subir por partes el intercambiador.

Los pesos de los materiales necesarios para la construcción que se realizará en la parte superior del horno se han facilitado en la tabla 5.1.

Tabla 5.3 Pesos de materiales para construcción.

Material en acero utilizado en la readecuación del Horno.					
Tipo	Cantidad	Ancho	Largo	Espesor	Peso
	Unidad	mm	mm	mm	kg
Omega	2	446	2473	3,5	60,6
Omega	2	446	794	3,5	19,5
Omega	1	446	1180	3,5	14,5
Omega	2	542	1700	6	86,8
Omega	6	446	1453	3,5	106,8
Semi - Omega	2	405	1415	3,5	31,5
Semi - Omega	2	405	1049	3,5	23,3
Semi - Omega	4	405	918	3,5	40,9
Semi - Omega	4	405	814	3,5	36,2
Semi - Omega	2	405	1338	3,5	29,8
C-G	12	254	1453	3,5	121,7
C-G	2	254	650	3,5	9,1
C-G	1	254	1040	3,5	7,3
C-G	1	254	400	3,5	2,8
Ángulos	4	94	734	2,9	6,3
Ángulos	4	94	634	2,9	5,4
Ángulos	2	94	880	2,9	3,8
Ángulos	2	94	980	2,9	4,2
Ángulos	2	94	1193	2,9	5,1
Ángulos	2	94	1293	2,9	5,5
Ángulos	1	94	1180	2,9	2,5
Ángulos	2	94	1080	2,9	4,6
Ángulos	12	94	1453	2,9	37,4
Platinas	4	50	634	2,9	2,9
Platinas	2	50	877	2,9	2,0
Platinas	2	50	1243	2,9	2,8
Platinas	2	50	1180	2,9	2,7
Platinas	2	50	700	2,9	1,6
Platinas	1	50	1088	2,9	1,2
Placas	3	1046	2595	2,9	185,4
Placas	2	647	1180	2,9	34,8
Placas	1	927	1180	2,9	24,9
Placas	2	1293	730	2,9	43,0
Placas	2	927	730	2,9	30,8
Placas	2	734	1280	2,9	42,8
Placas	1	1102	1280	2,9	32,1
Placas	2	1468	905	2,9	60,5
Placas	2	1102	905	2,9	45,4

Fuente: Datos tomados a lo largo del proyecto.

Tabla 5.3 Pesos de materiales para construcción.

Material en acero utilizado en la readecuación del Horno.					
Tipo	Cantidad	Ancho	Largo	Espesor	Peso
Placas	4	645	1453	2,9	85,3
Placas	2	924	1453	2,9	61,1
Placas	4	708	1515	2,9	97,6
Placas	2	1049	1515	2,9	72,4
Placas	4	727	1453	2,9	96,2
Placas	3	1180	1453	2,9	117,1
Placas	4	852	1515	2,9	117,5
Placas	2	1305	1515	2,9	90,0
Placas	4	1125	1570	2,9	160,8
Placas	1	400	1570	2,9	14,3
Placas	1	300	2595	2,9	17,7
Placas acero inoxidable	4	1220	2440	4	373,9
Placa acero inoxidable	1	1220	400	4	15,3
Tubos de 2 pulg Acero inoxidable	56	60	2000	3,91	609,0
Bridas	2	64015		3	3,0
Brida Cir	2	70701		3	3,3
Bridas	1	68005		3	1,6
Bridas	2	102200		3	4,8
Bridas	1	67725		3	1,6
Bridas	3	135772		3	9,6
Bridas	1	363168,111		4	11,4
Brida Cir	2	58826		4	3,7
Total de Acero					2147,6

Fuente: Datos tomados a lo largo del proyecto.

A todo este material, hay que sumar el peso que pertenece a las máquinas con las cuales se trabajo, y que están en la siguiente pesos.

Máquina de soldadura MIG.

Peso: 60 kg.

Tanque de Oxigeno y Acetileno.

Peso: 70 kg.

Máquina de corte Plasma.

Peso: 75 kg.

Para subir todo el material necesario para realizar los trabajos de construcción de la cámara de transferencia de calor y su intercambiador se utilizará el monta carga de la empresa. El cual tiene una capacidad de 12 ton.

El intercambiador será subido por partes a la parte superior del horno, por lo cual se ha puesto un diagrama del intercambiador desarmado especificando sus partes.

Se deberá subir primero todo lo que compone el intercambiador, el cual pesa cerca de 670 kg pues es la suma de los tubos de acero inoxidable más las placas del mismo material para las respectivas uniones. Luego se procede a subir todo lo que compone codos, lo cual tiene un peso de 295 kg, para posteriormente subir el hogar que tiene un peso de 80kg. En la parte superior también fue necesario ayuda de varios trabajadores para manipular la posición del intercambiador.

PARTES DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

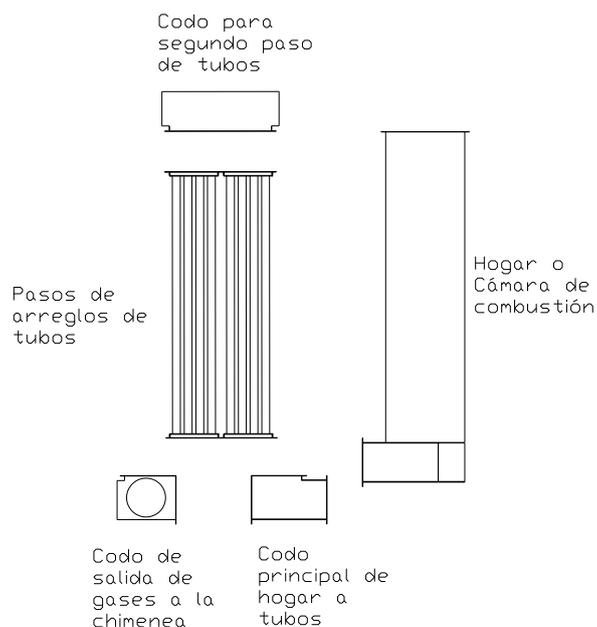


Fig. 5.6 Esquema del intercambiador desarmado.

Una vez armado todo el intercambiador de calor, se procede a ensamblar la estructura de la cámara de transferencia de calor.

La estructura se compone de perfiles creados específicamente para esta construcción, que son los siguientes:

Perfiles utilizados en la estructura de la cámara de transferencia de calor.

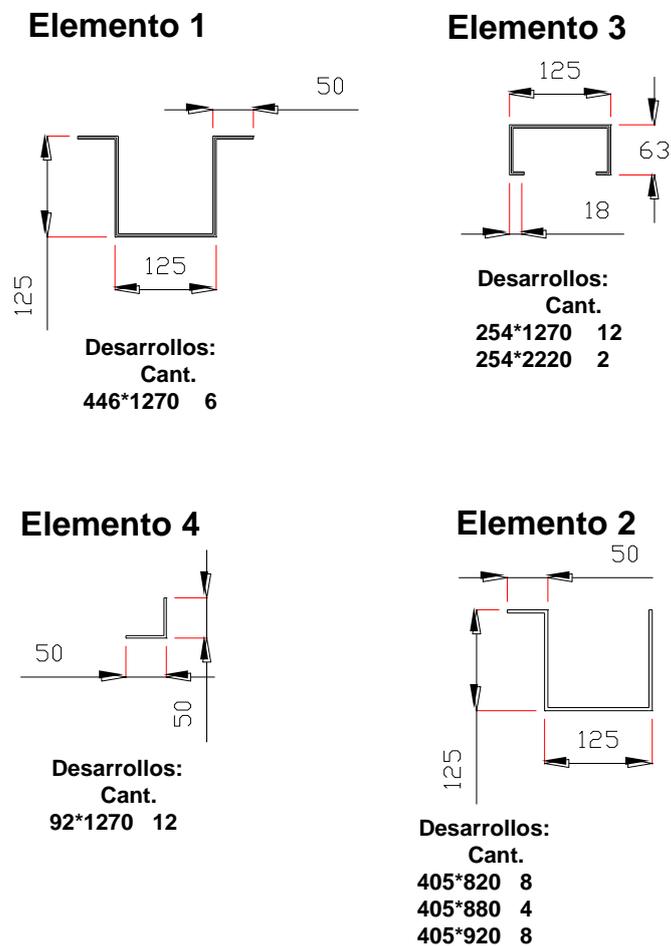


Fig. 5.7 Perfiles construidos en planta.

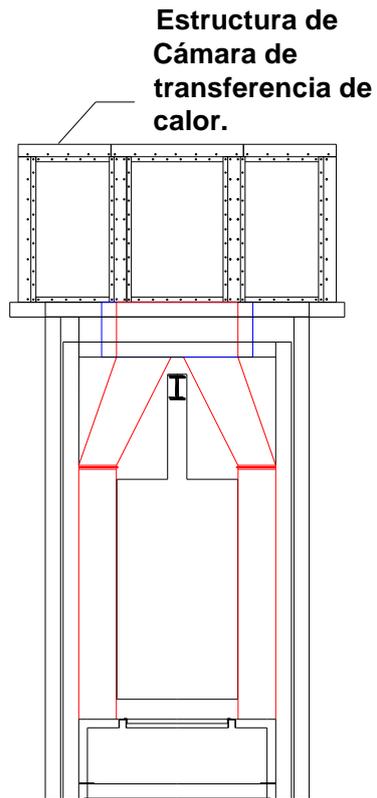


Fig. 5.8 Ubicación frontal de carcasa de cámara de transferencia de calor.

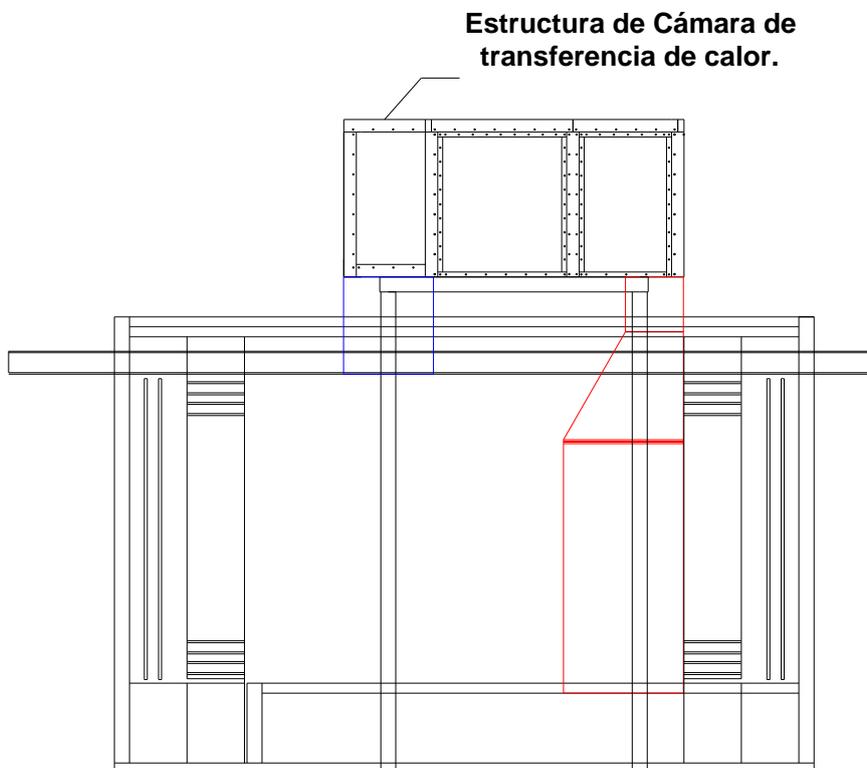


Fig. 5.9 Ubicación lateral de carcasa de cámara de transferencia de calor.

5.3 Montaje del quemador.

En el caso del quemador, la parte más importante es el programador. Toda función que realiza el quemador esta centralizada en el programador.

El quemador será colocado en su base, la cual tiene un deflector que da dirección de circulación para el aire que impulsa el ventilador hacia el hogar para producir la combustión.

Al programador esta conectado la foto celda, cuya misión es activar las dos electro-válvulas de diesel, las cuales abren el paso del diesel hacia boquilla.

Todo este proceso se termina al producirse la chispa por los electrodos, los cuales reciben la descarga del transformador de ignición, el cual también esta conectado con el programador.

Por último este quemador tiene un servo motor, que tiene la función de abrir o cerrar la compuerta del paso del aire. Este es regulado por la posición de tres perillas, las cuales están dadas de acuerdo a las condiciones del ambiente en donde va ha funcionar.

Este quemador tiene un pulsador en el tablero del horno, que estará conectado directamente al programador.

Esquema Básico del Quemador.

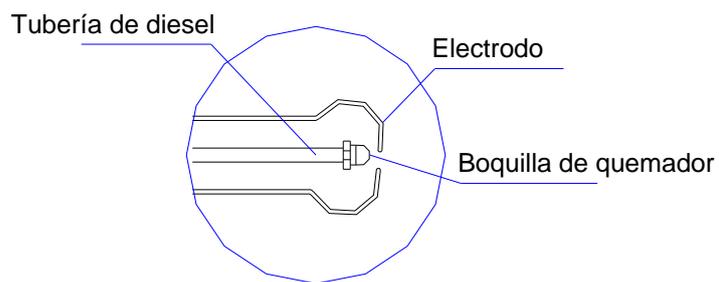
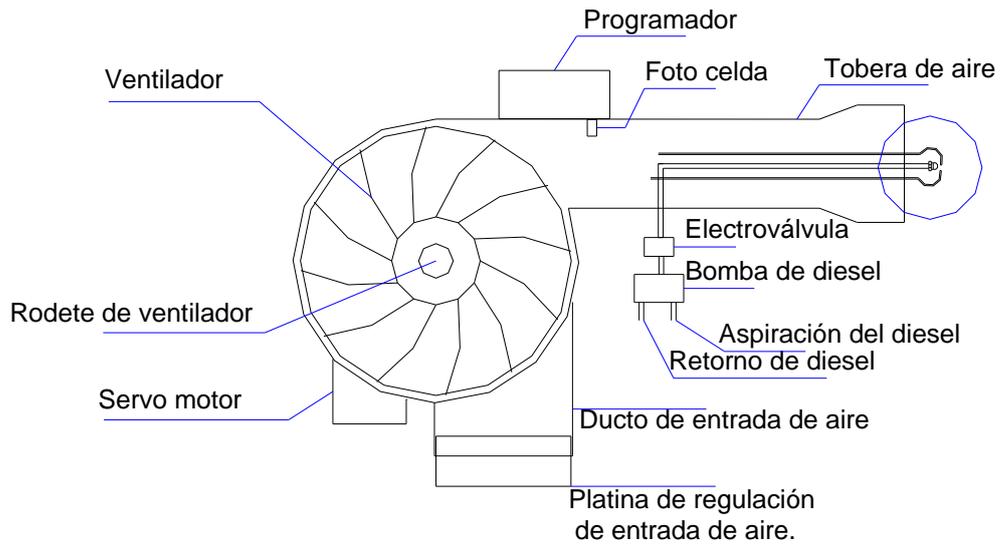


Fig. 5.10 Esquema del quemador.

5.4 Montaje de los ventiladores.

Son dos ventiladores centrífugos, los cuales están preparados para resistir temperaturas de hasta 300°C. Las aletas estarán en contacto con el aire caliente, ya que estos elementos serán los que se encarguen de absorber y expulsar el aire caliente.

Al estar a esta temperatura, decidió que el motor este separado por una carcasa de metal para evitar el contacto con el aire caliente. Se ha utilizado chumaceras de hierro y bandas de alta temperatura, con un eje de hierro. El motor es de marca SIEMENS, de 5 hp, 220V, 440V, 15 amperios y produce el movimiento de 5000 CFM cada ventilador. A continuación se muestra el funcionamiento en las figuras 5.10 y 5.11.

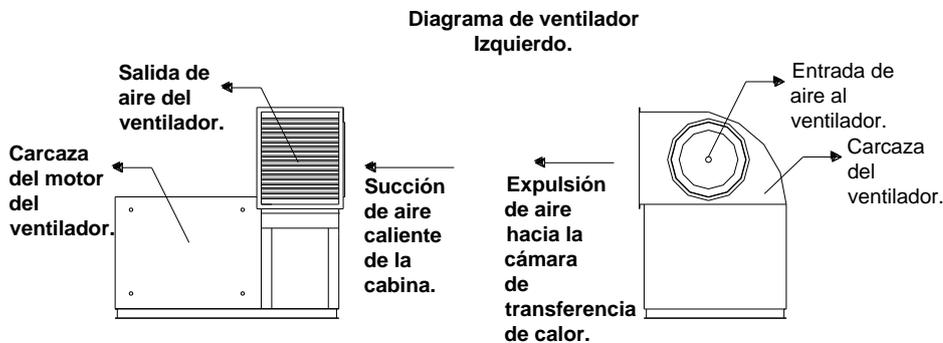


Fig.5.11 Diagrama de ventiladores.

Esquema de Ventiladores.

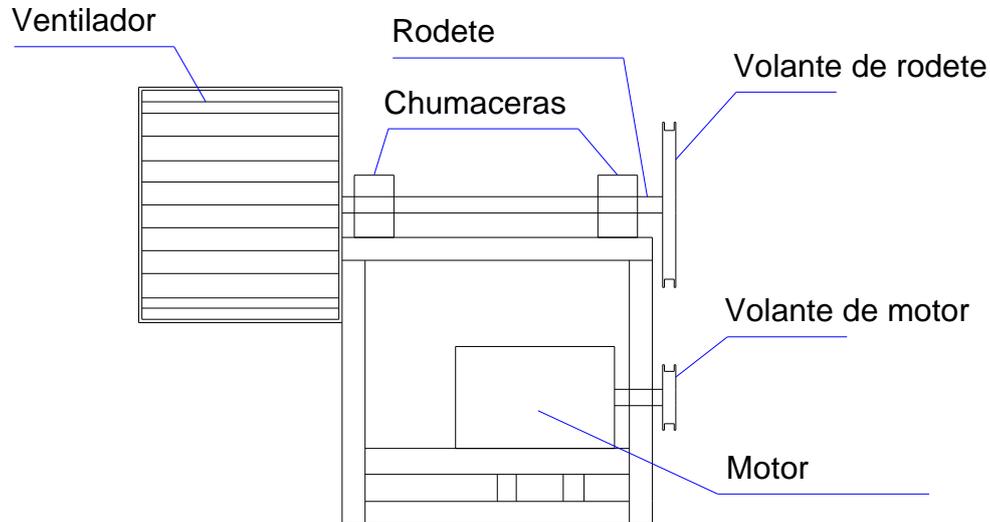


Fig. 5.12 Esquema de Ventiladores.

5.5 Guía de operación.

Esta guía de operación va a detallar la manera de funcionamiento del horno tomando como punto de referencia el tablero de control y encendido. El tiempo de encendido del horno será dos horas antes de empezar con el secado de las placas. En este tablero tenemos un procedimiento para el encendido del horno. Hay funciones que deberán ser dependientes y otras que serán independientes.

Los ventiladores de las cortinas de aire serán independientes, ya que no tiene punto de dependencia con otro elemento del horno. En el caso del quemador que tiene dependencia con los ventiladores de recirculación, pues dentro del hogar existen gases de alta temperatura, los mismos que puede recalentar al quemador y dañar su programador. Entonces en el encendido del quemador tiene que estar encendido los ventiladores de recirculación.

Se tiene también una termocupla de control de temperatura, la cual nos verifica a que temperatura se encuentra el ambiente interno de la cabina del horno.

El tablero posee dos tipos de seguridad en caso de cortos circuitos, o sobrecargas generales.

A continuación se describe por medio de la figura 5.12 el funcionamiento del tablero de control.

Tabla 5.4 Indicaciones de operaciones en el tablero.

Indicaciones de operación en el tablero						
Botones			1	2	3	4
Negro	Encendido		Ventiladores de recirculación	Quemador	Ventilador 1 de cortina de aire	Ventilador 2 de cortina de aire
Observaciones	Nos indica el foco verde encendido		Tiene temporizador para el encendido del segundo ventilador	Depende del encendido de los ventiladores de recirculación	Es independiente	Es independiente
Botones		5	6	7	8	9
Rojo	Apagado	Emergencia	Ventiladores de recirculación	Quemador	Ventilador 1 de cortina de aire	Ventilador 2 de cortina de aire
Observaciones	Foco verde apagado	En caso de cualquier fuga se apaga todo el sistema	Serán apagados al final por enfriamiento	No se puede apagar antes de los ventiladores de recirculación	Es independiente	Es independiente

Fuente: Departamento de Mantenimiento.

Secuencia de Encendido

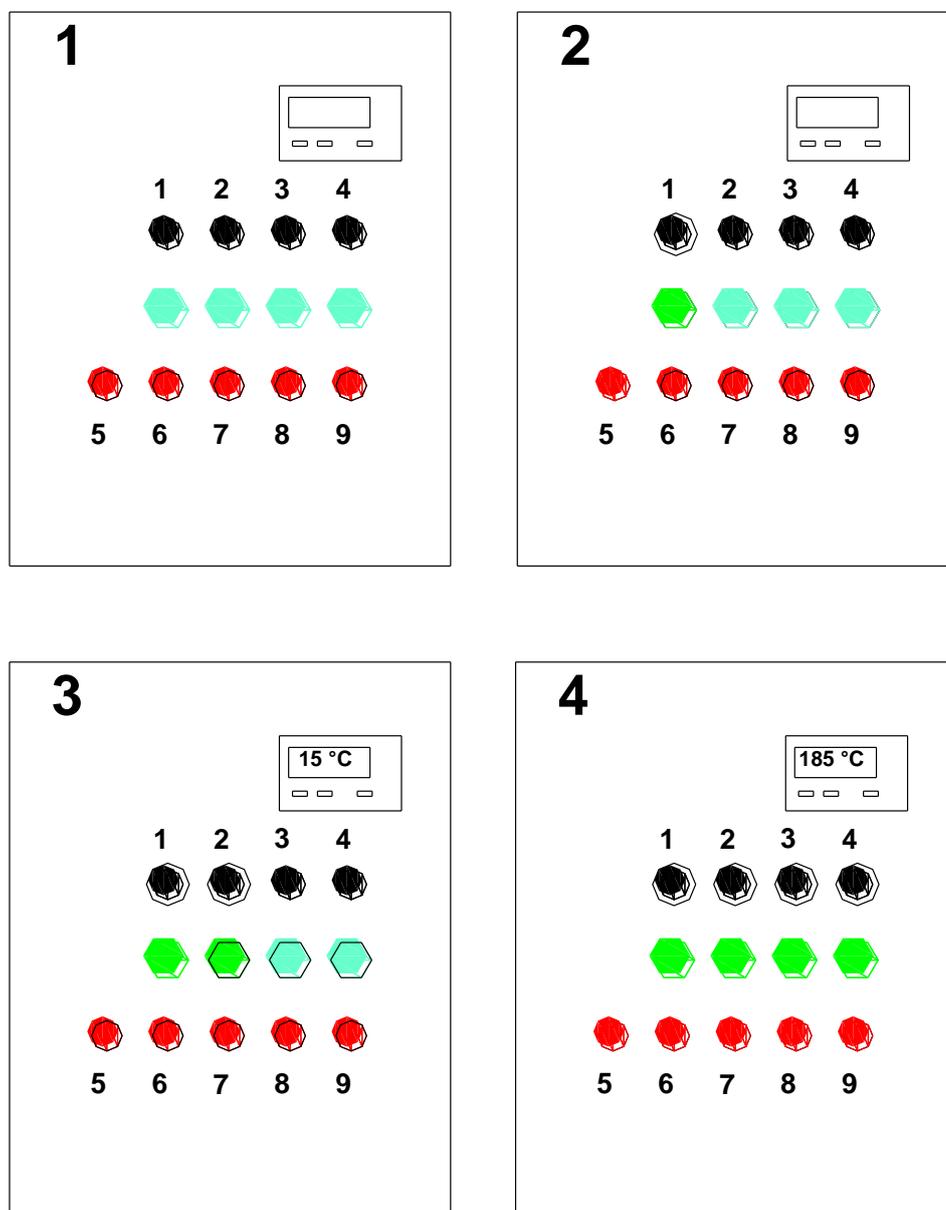


Fig. 5.13 Esquema de encendido de tablero.

Secuencia de Apagado

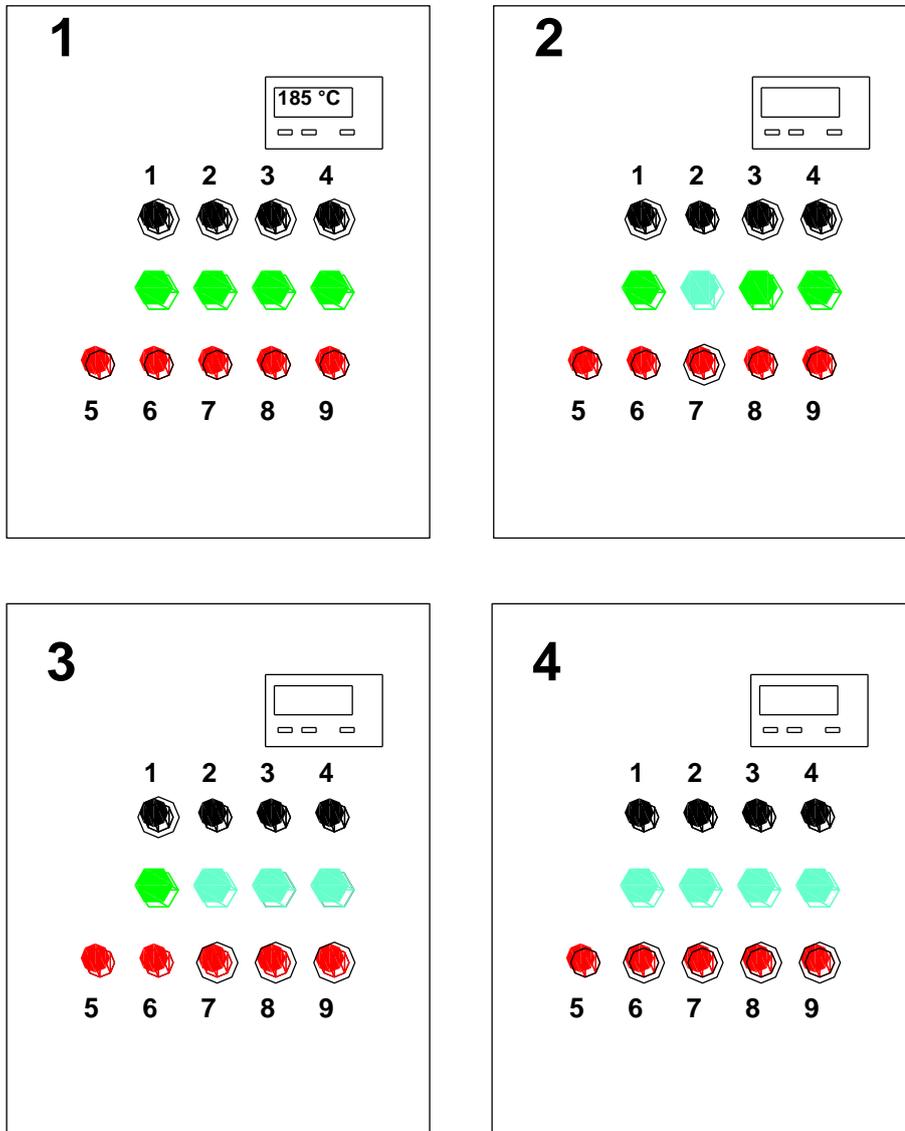


Fig. 5.14 Esquema de apagado de tablero.

CAPITULO VI.

Pruebas y evaluación.

6.1 Pruebas de temperatura.

En el caso de este horno hay dos maneras de realizar pruebas de temperaturas, la una verificar la termo-cupla existente en tablero de control, y la otra opción es por medio del paso del termógrafo, el cual nos va a dar la temperatura de la superficie de la placa en función del tiempo y espacio recorrido. En el primero de los métodos se podrá hacer la verificación constantemente, mientras que en el caso del termógrafo se debe realizar con las mismas placas que van a pasar por el proceso de pintado epóxico, teniendo como resultado su comportamiento térmico en el proceso de secado.

El termógrafo es un instrumento que funciona con una termo-cupla conectada a un transistor que realiza una gráfica a escala de la variación de temperatura que se produce en la termo-cupla, este elemento esta adherido a la placa.

Como se puede ver en la fig. 6.1. el termógrafo tiene un recipiente aislante para poder ingresar al horno de secado, pues la termo-cupla se conecta directamente con dicho aparato. Este aparato transmite la variación de temperatura a una gráfica, con la cual podemos determinar a que temperatura se encuentra la placa y en que posición está. Con esto logramos saber a que temperatura esta ingresando la placa a la cabina de pintado.

En la figura 6.2 podemos ver como se desenvuelve la placa dentro del horno hasta la cabina de pintado. La gráfica original esta en el anexo 23.

Medición de temperatura en la placa por medio del termógrafo.

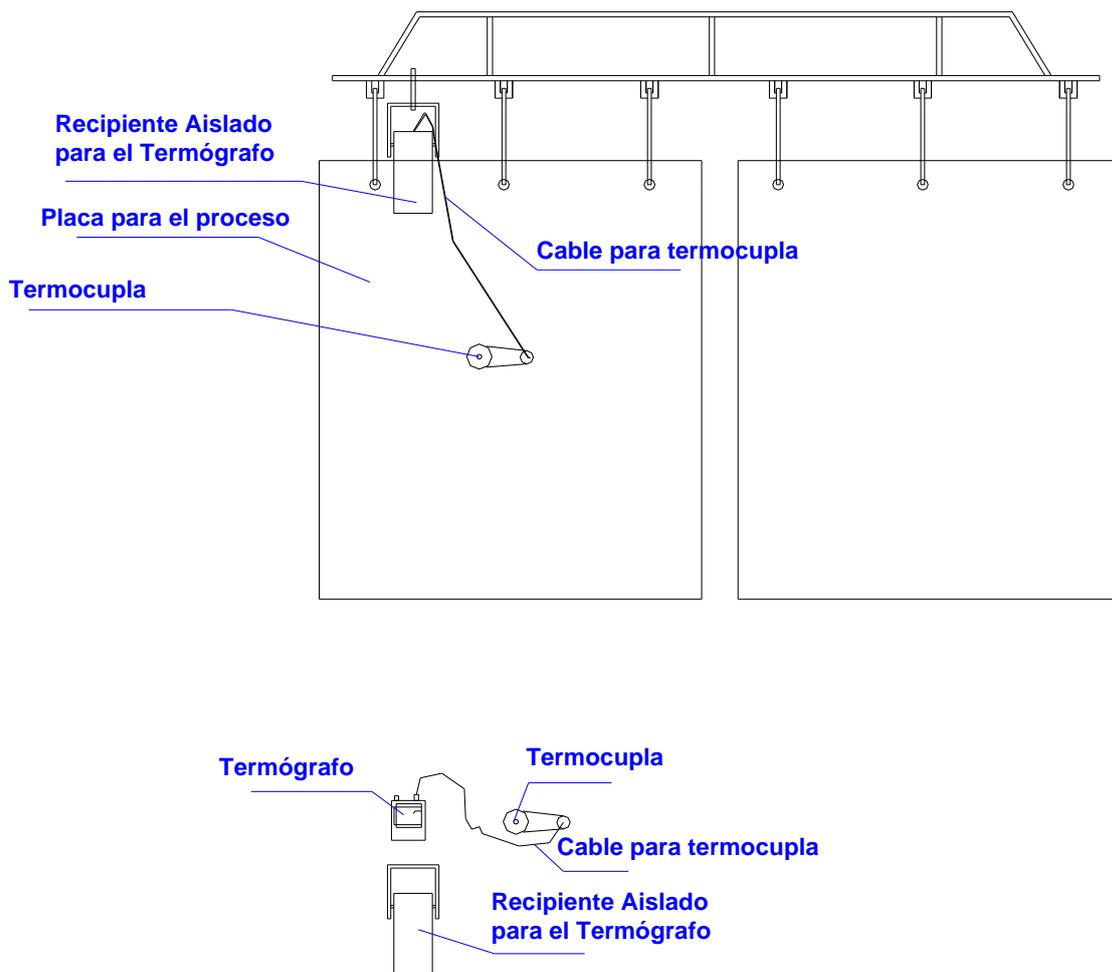


Fig. 6.1 Esquema de medición por medio termógrafo.

6.2 Cálculo de la eficiencia térmica y de la combustión .

El cálculo de la eficiencia térmica y de la combustión se lo realizará conociendo los resultados finales de funcionamiento del horno, para lo cual la temperatura de ambiente de la cabina, la velocidad de calentamiento, y la capacidad de calentar placas serán los parámetros para los cálculos de las eficiencias.

Una vez realizados las pruebas de encendido y funcionamiento se procederá determinar las eficiencias. Los datos son los siguientes:

TABLA 6.1. Resultados del funcionamiento del horno.

Tipo dato	Cantidad	Unidades
Temperatura ambiente.	17	°C
Temperatura del horno.	185	°C
Tiempo de reacción.	70	Minutos
Temperatura de la placa.	145	°C
Consumo de combustible	5.5	Gal/h
Aire – Ventiladores	9418	CFM
Angulo de Boquilla	60	Grados
Apertura de la entrada del aire del quemador	Total	
Apertura de entrada de aire del ventilador auxiliar del quemador	Total	

Fuente: Departamento control de calidad de NOVACERO ACEROPAXI

A continuación se calculará la eficiencia con la cual está funcionando el horno para en el capítulo 7 determinar con datos reales el aprovechamiento económico del proyecto.

Cáculo de la eficiencia de la cámara de transferencia de calor.

Datos:

Flujo de Diesel =	5,5	Gal / h
mdiesel =	17,6	kg / h
Ccdiesel =	41000,0	kJ / kg
Cpacero =	434,0	J / (kg * k)
# de placas =	21,0	placas / h
Peso =	2197,7	kg / h
Toplaca =	140,0	°C
Tiplaca =	15,0	°C
Q =	119226,3	kJ / h

Primero se determinará el calor requerido para lograr el proceso, con lo cual se realiza lo siguiente.

$$Q_{\text{total necesario}} = (Q_{\text{placas}} + Q_{\text{cabina}} + Q_{\text{pérdida por frontera}})$$

Luego se calcula el calor que ingresa al sistema por medio de la combustión del diesel.

$$Q_{\text{combustión}} = m_{\text{diesel}} * C_{\text{c diesel}}$$

$$\text{Eficiencia} = \left(\frac{Q_{\text{total necesario}}}{Q_{\text{combustión}}} \right) * 100$$

Cálculo de la eficiencia

Qtotal necesario =	465253,5	kJ / h
Qtotal ingresado =	721224,5	kJ / h
Eficiencia =	64,51	%

Con esta eficiencia del sesenta y cuatro por ciento se determinó que el diseño de la cámara de transferencia de calor, conjuntamente con la selección de los ventiladores y quemador, fue la apropiada. Ya que en sistemas donde se utiliza la combustión como medio de producción de energía, dicha eficiencia es buena

6.3 Inspección preliminar del proceso.

La inspección preliminar empieza en la verificación de las placas al recibir un pre-tratamiento correcto. No existen instrumentos o algún método definido para la constatación de que este pre-tratamiento fue realizado en forma correcta, pero la manera de verificar si se ha realizado bien el proceso, es de la siguiente manera. El jefe del departamento de metrología, inspecciona visualmente las placas, observando en primera instancia lo siguiente, ubican la placa donde pueda recibir rayos solares, produciéndose con esto un brillo de colores en toda placa en forma de cristales de un tamaño reducido. Una vez realizado esta prueba, se procede a realizar la prueba que ellos le llama de rayado, con lo cual se va a comprobar el correcto enlace que se debe producir entre el fosfato de zinc y la placa que recibió el pre-tratamiento. Se obtiene un rayador de acero hecho por el operario, con el cual raya a la placa y deberá observar lo siguiente: que al rayar la placa no se produzca un levantamiento de residuos de el fosfato de zinc a los lados del rayado, pues debería verse como un rayado sin levantamiento de residuos.

Luego de haber realizado la inspección del pre-tratamiento se realizará la verificación del funcionamiento eficiente del proceso de secado que corresponde a lo siguiente: en primera instancia el funcionamiento de los ventiladores tanto de las cortinas de aire como de recirculación, para luego verificar el eficiente desempeño del quemador, en cuanto a la excelente combustión que se deberá producir dentro del hogar, con lo cual tendremos un resultado preliminar real del funcionamiento del horno.

La parte primordial de esta inspección del proceso se centrará en el quemador, ya que su funcionamiento en esta zona, de 2800 mts sobre el nivel del mar, se dificulta y la eficiencia de catálogo se reduce altamente hasta llegar a la eficiencia real.

Por lo tanto para llegar al punto más alto de eficiencia en el funcionamiento del quemador se deberá regular la entrada de aire y la selección de la boquilla

deberá ser la adecuada para lograr la mayor eficiencia posible al momento de realizar cálculos de eficiencias de combustión. Cabe señalar que en el caso de selección de la boquilla se debió probar con algunas de las opciones que se tenía, para llegar al mejor funcionamiento en cuanto la combustión del diesel.

Es así que se seleccionó una boquilla como ya lo dijimos antes de 5.5 gal/hora. El eficiente funcionamiento se determina en primera instancia visualmente y por medio de los resultados obtenidos de acuerdo al funcionamiento global del horno. Por lo cual se observo lo siguiente:

La combustión se produce de manera eficiente, pues no se encontró humo negro, el cual hubiese sido muestra de una falta de aire, y tampoco se encontró humo blanco, el cual hubiese indicado que existía demasiada entrada de aire; pero a más de estas inspecciones, se realizó una más que fue la de determinar si el quemador estaba venciendo la contra presión que existe en el intercambiador, la cual fue calculada en el capítulo de diseño, y es de 14.86 mm de columna agua (H₂O). Esto se comprobó que cumple de la siguiente manera, no se produjo retorno de gases de combustión hacia la boca del quemador, si ocurriera esto se tendría un vencimiento de la presión que existe en el intercambiador hacia la presión que produce el quemador.

6.4 Inspección producto pintado.

En la actualidad la inspección del producto pintado se puede medir de acuerdo a varios parámetros, un buen pre-tratamiento, el cual se inspecciona visualmente, la lectura de temperatura de ambos hornos, tanto de curado como de secado los cuales tienen sus respectivas termo-cuplas en el tablero de control.

Los cuales deberían cumplir las temperaturas de 285 °C para el horno de curado, y 185 °C para el horno de secado.

Al final del proceso se hacen dos tipos de prueba:

- La primera consiste en comprobar el curado, que se realiza de la siguiente manera. Se toma un poco de algodón y un poco de acetona, se remoja el algodón en la acetona, y luego se pasa dos veces sobre cualquier parte de la placa, observa si se produce algún desprendimiento de capa epóxica, lo cual quiere decir que el algodón obtenga un color rojizo. Esto se realiza en varias partes de la placa. Este procedimiento se realiza a una muestra de toda población de las placas que serán pintadas por turno.
- La segunda es la medición del espesor de la capa que se obtuvo en la placa pintada, la cual se realiza con un aparato que se denomina Medidor de Espesores, estas medidas deben estar entre un rango de 90 y 120 μm .

Todos estos parámetros son dependientes, por lo que si un proceso está mal el producto final estará mal. Cabe recalcar que la adherencia de polvo en la cabina de pintado se inspeccionará visualmente, ya que no hay otra manera de determinar la suficiente existencia de polvo en la placa pintada, hasta antes de curar el producto, esta inspección visual será confirmada por el jefe de metrología, quien con su experiencia deberá emitir su informe, obviamente basándose en las pruebas finales ya mencionadas.

Hay que señalar que la eficiencia en la adherencia del polvo está directamente relacionada con la temperatura y con el eficiente pre-tratamiento de las placas, por lo tanto se puede asumir que si cumple el pre-tratamiento en forma adecuada solo dependerá del proceso de secado y curado para la suficiente adherencia del polvo.

6.5 Calificación del producto.

En la empresa NOVACERO ACEROPAXI al tener un sistema de calidad, tienen solo dos calificaciones, que son malo o bueno, esto quiere decir que o sirve o no sirve, por lo tanto la calificación de este producto al ser malo, produce un análisis de los procesos y pre-tratamientos para encontrar la falla. Entonces se volverá a la comparación de la temperatura de los hornos que nos indique la termo-cupla del tablero de control, en el caso de la verificación del secado y curado, y realizar las pruebas que corresponda.

CAPITULO VII.

Análisis económico financiero.

El análisis económico financiero se lo realiza para determinar al final del proyecto que beneficio se logró con todo el trabajo realizado. Para este análisis se tomarán en cuenta todos los gastos que se hicieron dentro del proyecto y todos los beneficios que se lograron con el mismo, realizando una comparación entre los dos. Dentro de esta comparación se tendrá la depreciación del proyecto y la recuperación de la inversión que se obtendrá en este proyecto.

7.1 Inversión en equipos y materiales.

En el caso de los materiales y equipos necesarios para llevar a cabo este proyecto se ha realizado un inventario de todo tipo de material que nos haya servido en el proyecto.

Esto comprende la fase de desmontaje, la fase de construcción y la fase de montaje. Cabe señalar que todo equipo y material que fue utilizado en el proyecto son de uso general en la empresa por lo tanto todo fue pedido a bodega.

Una vez detallado la utilización de los equipos y materiales en todo el proceso de construcción y funcionamiento, se procede a realizar la sumatoria para llegar a un total de inversión, con lo cual se realizará un análisis de depreciación y de recuperación de la inversión.

En el área de equipos y accesorios se tuvo un gasto de 3594 USD, el detalle de todos estos equipos se puede ver en el anexo 21, donde se encuentra, que se usó, en que cantidad y a que precio.

En el área de materiales se determinó un gasto de 3146 USD. El detalle de la utilización de estos materiales es muy importante, puesto que el precio de las piezas que se realizaron fue determinado por una media de acuerdo a todos los trabajos que se efectuaron, como son soldadura, corte por guillotina, corte por plasma, doblado y perforado. Todo esto está detallado en el anexo 20.

De acuerdo a la sumatoria de la inversión realizada por los equipos y materiales que asciende a un total de 6740 USD.

7.2 Inversión en la construcción y montaje.

En este proyecto se deberá tomar en cuenta que la construcción y montaje se realizará con gente capacitada, con lo cual se deberá analizar el gasto que eso con lleva. Es por eso que se ha realizado un análisis de inversión detallado en cuanto al costo de la mano de obra, el cual está detallado en el anexo 24.

La empresa que en casi su totalidad utilizó mano de obra interna e invirtió 2890 USD.

Se debe señalar que en algunos casos, especialmente en el montaje del intercambiador se requirió un mayor número de ayudantes, ya que por disminuir procedimientos que hubiesen demorado el montaje, se decidió utilizar la fuerza de algunos trabajadores, este costo se lo ha cargado a la sección de ayudantes especificada en el anexo 24.

7.3. Inversión total.

La inversión total será determinada con el objetivo de realizar un análisis de la recuperación de la inversión y la depreciación de la máquinas, adquiridas para el proyecto.

A continuación se tiene un cuadro de la inversión realizado por áreas determinadas anteriormente.

Tabla 7.1 Inversión Total

Tipo de Inversión	Monto (usd)
Equipos y accesorios	3594
Materiales	3146
Construcción y montaje	2890
TOTAL	9630

Fuente: Información recopilada durante el proyecto.

Estos 9630 USD fue la inversión total realizada por la empresa, pues la inversión inicial que se había calculado en el preproyecto, en cuanto a los tipos de inversión tomados en cuenta fue de 9373 USD, pero a esto hay que sumarle el 10% de imprevistos, lo cual da un total de 10310 USD. Con lo cual se puede determinar que la inversión calculada en el preproyecto fue acertada en cuanto a lo que realmente se gasto.

7.4 Depreciación y recuperación de la inversión.

La depreciación en este caso se da de la siguiente manera. Tenemos prácticamente tres máquinas o sistemas para los cuales se determinará una depreciación, estos son: los ventiladores, el quemador y el intercambiador de calor.

La depreciación de las máquinas se ha tomado como el 10% por año, a partir de la compra. Hay que resaltar que el valor del quemador disminuirá con mayor rapidez, pues esta máquina fue recuperada para este caso específico, siendo reparada después de haber estado más de dos años sin funcionar y tomando en cuenta que además fue adquirida hace más de cinco años.

Por lo tanto la depreciación de las máquinas se determinó de la siguiente manera.

Tabla 7.2 Depreciación

DEPRECIACIÓN		
Máquinas	Quemador	Ventiladores
Tiempo (años)		
1	199,1	2210
2	179,2	1989,0
3	161,3	1790,1
4	145,1	1611,1
5	130,6	1450,0
6	117,6	1305,0
7	105,8	1174,5
8	95,2	1057,0
9	85,7	951,3
10	77,1	856,2

Fuente: NOVACERO ACEROPAXI

Una vez calculada la depreciación se determinará los costos de operación del proceso hasta antes del funcionamiento del horno readecuado. Obteniendo este resultado se procederá a sacar el ahorro que se generó con el horno de secado en funcionamiento.

Los datos que se ocuparon para el cálculo de los costos fueron los años 2003 y 2004.

Tabla 7.3 Costos de producción en el proceso de pintado epóxico 2003

Costos de producción en el proceso de pintado epóxico 2003				
Tiempo		Precios		
Horas máquina	Horas hombre	Mano de obra	Combustible	Electricidad
horas / año	horas / año	Usd / hora	Usd / gal	Usd / kw - h
482,75	1931	1,85	0,94	0,09
Gastos de producción en el año 2003				
Tipo de Costo	Horas	Precio	Consumo	Costo total
Mano de obra	482,75	1,85	1931	3572,4
Combustible	482,75	0,94	4643,1	4364,5
Electricidad	482,75	0,09	17535	1578,2
Total de costo en el año 2003				9515,0

Fuente: Novacero Aceropaxi

Tabla 7.4 Costos de producción en el proceso de pintado epóxico 2004

Costos de producción en el proceso de pintado epóxico 2004				
Tiempo		Precios		
Horas máquina	Horas hombre	Mano de obra	Combustible	Electricidad
horas / año	horas / año	Usd / hora	Usd / gal	Usd / kw - h
919,8	3679,2	1,85	0,94	0,09
Gastos de producción en el año 2004				
Tipo de Costo	Horas	Precio	Consumo	Costo total
Mano de obra	919,8	1,85	3679,2	6806,5
Combustible	919,8	0,94	7191,1	6759,6
Electricidad	919,8	0,09	30939,7	2784,6
Total de costo en el año 2004				16350,7

Fuente: Novacero Aceropaxi

Debido a la variabilidad de la producción en este producto se ha decidido trabajar con un promedio de costo por año, el cual fue sacado de los anteriormente señalados. El promedio de costo anual es de **12637 Usd**, obteniendo un ahorro de **3438 Usd** por año, cabe señalar que este ahorro es sin tomar en cuenta el que se produce por concepto de recuperación de polvo el cual es un proyecto complementario, donde se produce un ahorro al año de alrededor de **9500 Usd**. Hay que tomar en cuenta en cuanto a la mano de obra que el tiempo del proceso se redujo a la mitad, por lo cual la otra mitad de tiempo que antes se ocupa en realizar este proceso hoy se puede utilizar esa mano de obra en otros procesos. Pero este ahorro no ha sido determinado, ya que es un ahorro muy variable.

7.4.1 Cálculo del TIR, VAN. Relación Costo – Beneficio.

Para determinar el valor actual neto (VAN) de la inversión realizada por NOVACERO ACEROPAXI es igual a la suma de los valores actualizados de los flujos netos de caja (ingreso líquidos) asociados a la inversión.

$$VAN = \sum_{x=0} \frac{FNC}{(1+i)^x}$$

Donde:

FNC Flujo neto de caja.

i tasa de interés.

x número de períodos (años).

El ahorro de la empresa a partir del funcionamiento del horno será el siguiente:

Tabla 7.5 Datos económicos del proceso.

Año	2002	2003	
Ingresos	224000	455529,3	USD
Costos operativos	159830	228812	USD
Utilidad	64170	226718	USD
Ahorro	3438,4		USD

Fuente: Novacero Aceropaxi.

Los ingresos líquidos que la empresa obtiene del proyecto es de \$ 3438.4 por año, el costo total del proyecto es de \$ 9630. El tiempo estimado para recuperar la inversión es de tres años, valederos a partir de la puesta en marcha del proyecto. La tasa de préstamos bancarios es del 10.57% y el flujo neto de caja para los tres años consecutivos es:

$$FNC_1 = \frac{\text{Ahorro}}{(1+i)^1}$$

$$FNC_2 = \frac{\text{Ahorro}}{(1+i)^2}$$

$$FNC_3 = \frac{\text{Ahorro}}{(1+i)^3}$$

De donde se obtiene lo siguiente:

Tabla 7.6. Flujo neto de caja.

Tasa de interés (i)	10,57	%
Costo Total FNC (0)	-9630	USD
FNC (1)	3109,7	USD
FNC (2)	2812,4	USD
FNC (3)	2543,6	USD
FNC (4)	2300,4	USD
VAN	760,1	USD

Fuente: Cálculos realizados.

El VAN en este caso fue positivo, con lo cual se confirma que la inversión realizada estuvo bien encaminada.

La TIR o tasa interna de retorno (TIR) nos indica la factibilidad del proyecto, si el proyecto de inversión es o no rentable. Es decir indica el beneficio neto que proporciona la inversión en función de un porcentaje anual, igualando el valor actual de los costos y beneficios (VAN = 0); por lo que se tiene, por un tipo de procedimiento la interpolación de dos tasas de interés que den como resultado un valor actual neto positivo y negativo:

$$TIR = i_1 + (i_2 - i_1) * \left[\frac{VAN_1}{VAN_1 - VAN_2} \right]$$

Tabla 7.7. Flujo neto de caja.

Tasa de interés (i)	10,57	%
	0,28	
Costo Total FNC (0)	-9630	USD
FNC (1)	2686,3	USD
FNC (2)	2098,6	USD
FNC (3)	1639,6	USD
FNC (4)	1280,9	USD
VAN	-717,0	USD

Fuente: Cálculos realizados.

Tabla 7.8. Flujo neto de caja.

Tasa de interés (i)	10,57	%
	0,14	
Costo Total FNC (0)	-9630	USD
FNC (1)	3016,1	USD
FNC (2)	2645,7	USD
FNC (3)	2320,8	USD
FNC (4)	2035,8	USD
VAN	230,0	USD

Fuente: Cálculos realizados.

Tabla 7.9 Cálculo del TIR.

TIR	0,17	
	17,40	%

Fuente: Cálculos realizados.

Con este porcentaje siendo mayor que la tasa de interés bancaria se determina que el proyecto es rentable.

CAPITULO VIII.

Conclusiones y recomendaciones.

CONCLUSIONES

- Las adecuaciones realizadas en el horno dieron como resultado un óptimo funcionamiento de la línea de pintado epóxico, cumpliendo con el procedimiento que exige la política de calidad de la empresa.
- El tiempo de producción se bajó a la mitad, lo mismo se produjo en la ocupación de la mano de obra, eliminando tiempos muertos que repercute en algunos ámbitos, como la mejora en tiempos de entrega de las placas, la mejora del índice de productividad toneladas – hombre por hora producidas en este proceso, siendo la mejora de un 15% . En costos de operación se dio un ahorro del 27%, esto es 3438 UDS/año, adicional a esto, se dará un ahorro de 9500 USD aproximadamente por la recuperación de polvo con el proyecto complementario. .
- Calculadas las pérdidas y necesidades en cuanto a requerimiento en la fuente de calor, en este caso el quemador, se llegó a un consumo de 7.29 gal/h. Usando una boquilla estándar de 7.5 gal/h. Por el momento por el tamaño y espesor del producto a secar, esta colocado una boquilla de 5.5 gal / h.
- Como objetivo inicial del proyecto se tenía una temperatura ambiente dentro de la cabina del horno de 170°C, pero por la longitud de la cabina del horno y por la velocidad de la cadena transportadora de placas, se determinó que, la temperatura real que requiere el sistema es de 190.6°C, pero en el funcionamiento el horno llegó a una temperatura máxima de 197°C cumpliendo con el objetivo real.

- El área de transferencia de calor necesario para cumplir con el óptimo funcionamiento del horno es de 25.5 m², lo que determinó que el intercambiador tenga 28 tubos por paso, haciendo un total de 56 tubos de acero inoxidable y 2 pulg de diámetro de cédula 40.
- Para este sistema con la cantidad de calor que se produce en el intercambiador calor y el sistema de recirculación de aire caliente, se necesitará un caudal que impulsen los ventiladores de 10000 CFM, al ser dos ventiladores se producirá una distribución de 5000 CFM por cada ventilador.
- El material que se usó para todo el intercambiador de calor fue acero inoxidable AISI 304, para prevenir la oxidación que se produciría por la combustión del diesel. Por lo tanto la duración del intercambiador de calor va ha ser mayor que si se hubiese construido con acero A36.
- El horno, que funciona con un sistema de producción de calor por combustión, llegó a una eficiencia real del 64.51%, siendo la eficiencia teórica del 55%.

RECOMENDACIONES

- Al momento de cuantificar los resultados económicos, se debe tomar en cuenta mejoras que aparentemente no se puede cuantificar, siendo en este caso los tiempos muertos los cuales en determinados procesos pueden ser muy altos y su productividad baja en cuanto a la mano de obra.
- Los cálculos de las pérdidas de presiones en el ventilador, chimenea y quemador determinaron la selección de los ventiladores, diámetro de chimenea y quemador siendo las siguientes: 15.2 mm agua, 0.27 mbar y 22 mm agua, arrojando los siguientes resultados, ventilador centrífugo, chimenea de 0.50 m de diámetro y quemador de tiro forzado.
- Las eficiencias en el funcionamiento de las máquinas es muy importante ya que al ser más eficientes, se dará mayores ahorros. Por lo cual se recomienda realizar una limpieza del intercambiador de calor retirando toda la ceniza depositada por la combustión del diesel, y realizar la calibración de los equipos, una vez al año.
- El consumo de diesel en este proceso nos da una ideal real de cuanta energía se está consumiendo en este proceso, por lo tanto se recomienda que al aumentar el número de placas a 31 por turno y el espesor del material hasta 3.5 mm, el cual es su punto crítico, colocar la boquilla de 7.5 gal / hora, con lo cual se estaría utilizando el sistema al máximo de sus capacidades.

- **Para un óptimo funcionamiento del horno de secado, deberá ser revisado que los ductos de recirculación se encuentren libres de cualquier objeto que este obstruyendo el paso del aire caliente, apertura al máximo de entrada de aire y combustible al quemador, y por último que la velocidad de paso de las placas este dentro del rango, el cual esta entre 9 y 13 mm / s.**

8.1 Bibliografía.

INCROPERA F. Y De WITT D. Fundamentos de transferencia de calor. Traducido al español por Ricardo Cruz. 4ta. Ed. México D.F. , Prentice may, 1999. cap. 5, 7, 8, 11

CENGEL Y. y BOLES M. Termodinámica. Traducido al español por Gabriel Nagore. 2da ed. México D.F., McGraw-Hill, 1996. Tomo II cap. 14

KERN D. . Procesos de Transferencia de Calor. Traducido por Nicolás Marino. Primera ed. México D.F., McGraw-Hill, 1997. cap. 6, 7

McGRAW – HILL BOOK COMPANY. Mark's STANDARD HANDBOOK for MECHANICAL ENGINEERS. Editor Eugene A. Avallone, Theodore Baumeister III. NINTH EDITION.

GORDILLO R., BURBANO E. Simulación de Intercambiadores de Calor. Tesis. Ingeniero Mecánico. Quito Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Mecánica 1990 pp 10, 24 – 35.

ECUADOR GRUBB K. Altura y Diseño de Chimeneas. Fundación Natura. 1999. pp 150 – 180.

CARRIER AIR CONDITIONING COMPANY. Manual de Aire Acondicionado. Marcombo, S.A. de Boixareu Editores. cap. 2.

8.2 Anexos.

Anexo 1.

Gráfica de funcionamiento de Ventilador.

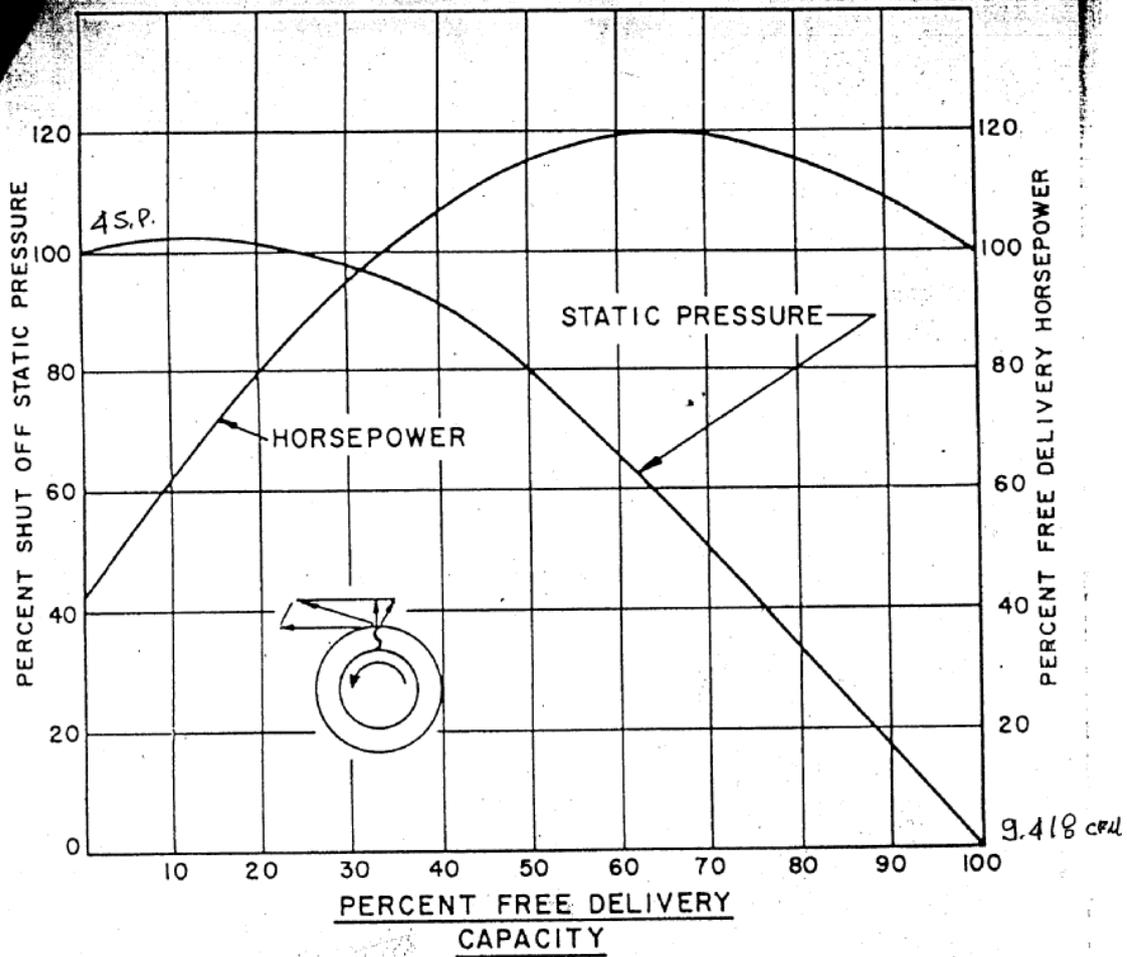


FIG. 32

Performance curve for a backward curved fan blade.

Anexo 2.

Esquema de Intercambiador de Calor.

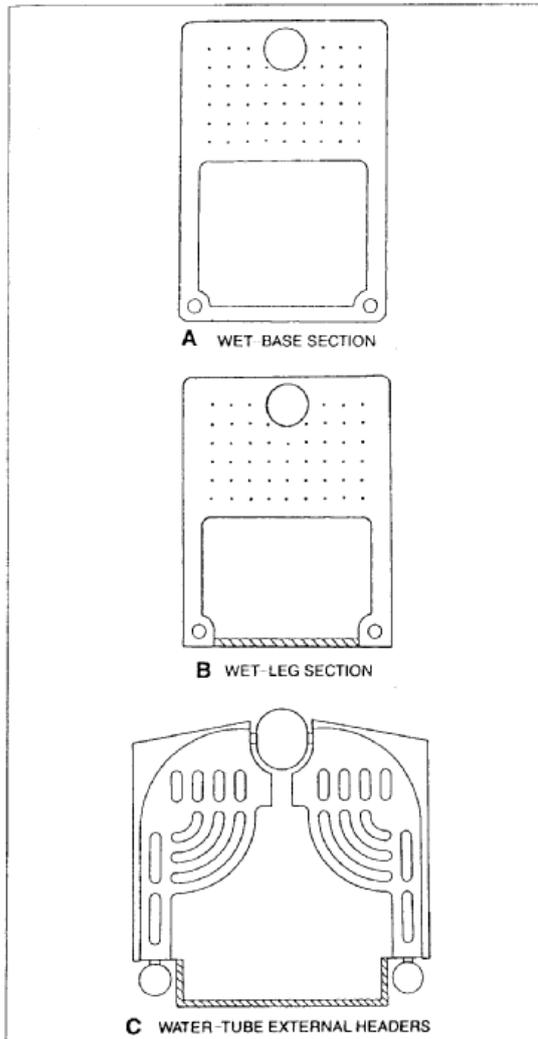


Fig. 2 Cast-Iron Commercial Boilers

Condensing or Noncondensing

Until recently, boilers were designed to operate without condensing flue gases in the boiler. This precaution was necessary to prevent corrosion of cast-iron or steel parts. Hot water units were often operated at 60°C minimum return temperature to prevent rusting when natural gas was used.

Because higher boiler efficiencies can be achieved with lower water temperatures, condensing boilers purposely allow the flue gas water vapor in the boiler to condense and drain. Figure 5 shows a

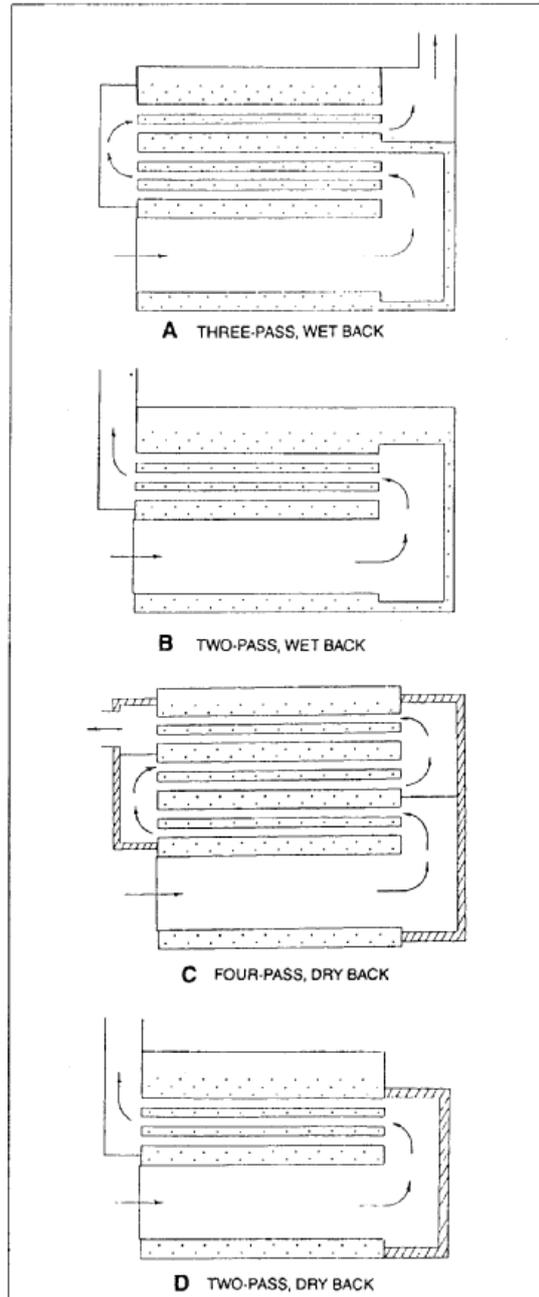


Fig. 3 Scotch-Type Commercial Boilers

Anexo 3.

Propiedades termo-físicas de sólidos metálicos seleccionados.

Anexo 4.

Flujo a través de un banco de Tubos.

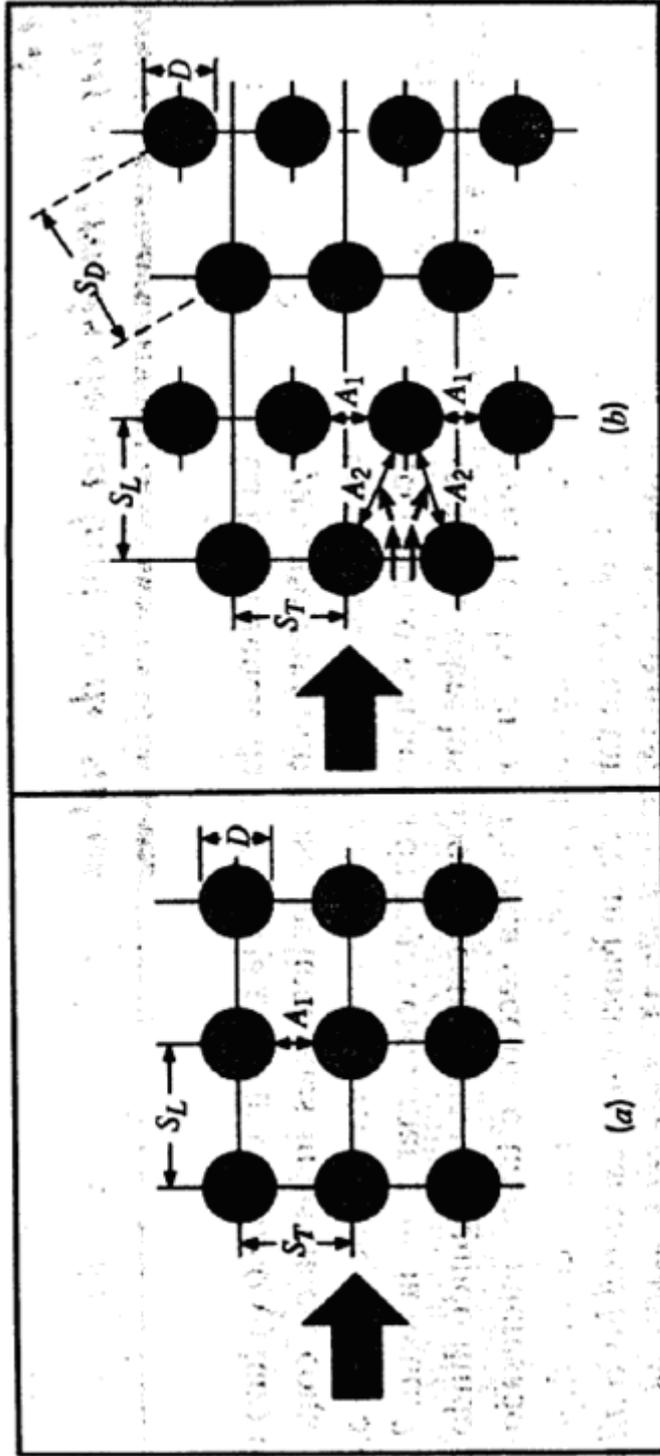


FIGURA 7.11 Arreglos de tubos en un banco. (a) Alineados. (b) Escalonados.

Anexo 5.

**Propiedades termo – físicas de gases a
presión atmosférica (AIRE)**

TABLA A.4 Propiedades termofísicas de gases a presión atmosférica^a

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Aire							
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
Amoniaco (NH₃)							
300	0.6894	2.158	101.5	14.7	24.7	16.6	0.887
320	0.6448	2.170	109	16.9	27.2	19.4	0.870
340	0.6059	2.192	116.5	19.2	29.3	22.1	0.872
360	0.5716	2.221	124	21.7	31.6	24.9	0.872
380	0.5410	2.254	131	24.2	34.0	27.9	0.869

Anexo 7.

Propiedades termo – físicas de gases a presión atmosférica (Nitrógeno, hidrógeno, oxígeno).

Tabla A.4 Continúa

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Hidrógeno (H₂) (continuación)							
600	0.04040	14.55	142.4	352	305	519	0.678
700	0.03463	14.61	157.8	456	342	676	0.675
800	0.03030	14.70	172.4	569	378	849	0.670
900	0.02694	14.83	186.5	692	412	1030	0.671
1000	0.02424	14.99	201.3	830	448	1230	0.673
1100	0.02204	15.17	213.0	966	488	1460	0.662
1200	0.02020	15.37	226.2	1120	528	1700	0.659
1300	0.01865	15.59	238.5	1279	568	1955	0.655
1400	0.01732	15.81	250.7	1447	610	2230	0.650
1500	0.01616	16.02	262.7	1626	655	2530	0.643
1600	0.0152	16.28	273.7	1801	697	2815	0.639
1700	0.0143	16.58	284.9	1992	742	3130	0.637
1800	0.0135	16.96	296.1	2193	786	3435	0.639
1900	0.0128	17.49	307.2	2400	835	3730	0.643
2000	0.0121	18.25	318.2	2630	878	3975	0.661
Nitrógeno (N₂)							
100	3.4388	1.070	68.8	2.00	9.58	2.60	0.768
150	2.2594	1.050	100.6	4.45	13.9	5.86	0.759
200	1.6883	1.043	129.2	7.65	18.3	10.4	0.736
250	1.3488	1.042	154.9	11.48	22.2	15.8	0.727
300	1.1233	1.041	178.2	15.86	25.9	22.1	0.716
350	0.9625	1.042	200.0	20.78	29.3	29.2	0.711
400	0.8425	1.045	220.4	26.16	32.7	37.1	0.704
450	0.7485	1.050	239.6	32.01	35.8	45.6	0.703
500	0.6739	1.056	257.7	38.24	38.9	54.7	0.700
550	0.6124	1.065	274.7	44.86	41.7	63.9	0.702
600	0.5615	1.075	290.8	51.79	44.6	73.9	0.701
700	0.4812	1.098	321.0	66.71	49.9	94.4	0.706
800	0.4211	1.22	349.1	82.90	54.8	116	0.715
900	0.3743	1.146	375.3	100.3	59.7	139	0.721
1000	0.3368	1.167	399.9	118.7	64.7	165	0.721
1100	0.3062	1.187	423.2	138.2	70.0	193	0.718
1200	0.2807	1.204	445.3	158.6	75.8	224	0.707
1300	0.2591	1.219	466.2	179.9	81.0	256	0.701
Oxígeno (O₂)							
100	3.945	0.962	76.4	1.94	9.25	2.44	0.796
150	2.585	0.921	114.8	4.44	13.8	5.80	0.766
200	1.930	0.915	147.5	7.64	18.3	10.4	0.737
250	1.542	0.915	178.6	11.58	22.6	16.0	0.723
300	1.284	0.920	207.2	16.14	26.8	22.7	0.711

Tabla A.4 Continúa

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Oxígeno (O₂) (continuación)							
350	1.100	0.929	233.5	21.23	29.6	29.0	0.733
400	0.9620	0.942	258.2	26.84	33.0	36.4	0.737
450	0.8554	0.956	281.4	32.90	36.3	44.4	0.741
500	0.7698	0.972	303.3	39.40	41.2	55.1	0.716
550	0.6998	0.988	324.0	46.30	44.1	63.8	0.726
600	0.6414	1.003	343.7	53.59	47.3	73.5	0.729
700	0.5498	1.031	380.8	69.26	52.8	93.1	0.744
800	0.4810	1.054	415.2	86.32	58.9	116	0.743
900	0.4275	1.074	447.2	104.6	64.9	141	0.740
1000	0.3848	1.090	477.0	124.0	71.0	169	0.733
1100	0.3498	1.103	505.5	144.5	75.8	196	0.736
1200	0.3206	1.115	532.5	166.1	81.9	229	0.725
1300	0.2960	1.125	588.4	188.6	87.1	262	0.721
Vapor de agua (vapor)							
380	0.5863	2.060	127.1	21.68	24.6	20.4	1.06
400	0.5542	2.014	134.4	24.25	26.1	23.4	1.04
450	0.4902	1.980	152.5	31.11	29.9	30.8	1.01
500	0.4405	1.985	170.4	38.68	33.9	38.8	0.998
550	0.4005	1.997	188.4	47.04	37.9	47.4	0.993
600	0.3652	2.026	206.7	56.60	42.2	57.0	0.993
650	0.3380	2.056	224.7	66.48	46.4	66.8	0.996
700	0.3140	2.085	242.6	77.26	50.5	77.1	1.00
750	0.2931	2.119	260.4	88.84	54.9	88.4	1.00
800	0.2739	2.152	278.6	101.7	59.2	100	1.01
850	0.2579	2.186	296.9	115.1	63.7	113	1.02

*Adaptada de las referencias 8, 14 y 15.

Anexo 9.

Propiedades termo – físicas de gases a presión atmosférica (Monóxido de carbono, hidrógeno).

TABLA A.4 *Continuación*

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Monóxido de carbono (CO) (continuación)							
650	0.51806	1.101	301	58.1	47.0	82.4	0.705
700	0.48102	1.114	315	65.5	50.0	93.3	0.702
750	0.44899	1.127	329	73.3	52.8	104	0.702
800	0.42095	1.140	343	81.5	55.5	116	0.705
Helio (He)							
100	0.4871	5.193	96.3	19.8	73.0	28.9	0.686
120	0.4060	5.193	107	26.4	81.9	38.8	0.679
140	0.3481	5.193	118	33.9	90.7	50.2	0.676
160	—	5.193	129	—	99.2	—	—
180	0.2708	5.193	139	51.3	107.2	76.2	0.673
200	—	5.193	150	—	115.1	—	—
220	0.2216	5.193	160	72.2	123.1	107	0.675
240	—	5.193	170	—	130	—	—
260	0.1875	5.193	180	96.0	137	141	0.682
280	—	5.193	190	—	145	—	—
300	0.1625	5.193	199	122	152	180	0.680
350	—	5.193	221	—	170	—	—
400	0.1219	5.193	243	199	187	295	0.675
450	—	5.193	263	—	204	—	—
500	0.09754	5.193	283	290	220	434	0.668
550	—	5.193	—	—	—	—	—
600	—	5.193	320	—	252	—	—
650	—	5.193	332	—	264	—	—
700	0.06969	5.193	350	502	278	768	0.654
750	—	5.193	364	—	291	—	—
800	—	5.193	382	—	304	—	—
900	—	5.193	414	—	330	—	—
1000	0.04879	5.193	446	914	354	1400	0.654
Hidrógeno (H₂)							
100	0.24255	11.23	42.1	17.4	67.0	24.6	0.707
150	0.16156	12.60	56.0	34.7	101	49.6	0.699
200	0.12115	13.54	68.1	56.2	131	79.9	0.704
250	0.09693	14.06	78.9	81.4	157	115	0.707
300	0.08078	14.31	89.6	111	183	158	0.701
350	0.06924	14.43	98.8	143	204	204	0.700
400	0.06059	14.48	108.2	179	226	258	0.695
450	0.05386	14.50	117.2	218	247	316	0.689
500	0.04848	14.52	126.4	261	266	378	0.691
550	0.04407	14.53	134.3	305	285	445	0.685

Anexo 10

Propiedades termo – físicas de gases a presión atmosférica (Dióxido de carbono).

TABLA A-20

 Propiedades de gas ideal del dióxido de carbono, CO₂

T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/(kmol · K)	T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/(kmo
0	0	0	0	600	22,280	17,291	243.199
220	6,601	4,772	202.966	610	22,754	17,683	243.983
230	6,938	5,026	204.464	620	23,231	18,076	244.758
240	7,280	5,285	205.920	630	23,709	18,471	245.524
250	7,627	5,548	207.337	640	24,190	18,869	246.282
260	7,979	5,817	208.717	650	24,674	19,270	247.032
270	8,335	6,091	210.062	660	25,160	19,672	247.773
280	8,697	6,369	211.376	670	25,648	20,078	248.507
290	9,063	6,651	212.660	680	26,138	20,484	249.233
298	9,364	6,885	213.685	690	26,631	20,894	249.952
300	9,431	6,939	213.915	700	27,125	21,305	250.663
310	9,807	7,230	215.146	710	27,622	21,719	251.368
320	10,186	7,526	216.351	720	28,121	22,134	252.065
330	10,570	7,826	217.534	730	28,622	22,552	252.755
340	10,959	8,131	218.694	740	29,124	22,972	253.439
350	11,351	8,439	219.831	750	29,629	23,393	254.117
360	11,748	8,752	220.948	760	30,135	23,817	254.787
370	12,148	9,068	222.044	770	30,644	24,242	255.452
380	12,552	9,392	223.122	780	31,154	24,669	256.110
390	12,960	9,718	224.182	790	31,665	25,097	256.762
400	13,372	10,046	225.225	800	32,179	25,527	257.408
410	13,787	10,378	226.250	810	32,694	25,959	258.048
420	14,206	10,714	227.258	820	33,212	26,394	258.682
430	14,628	11,053	228.252	830	33,730	26,829	259.311
440	15,054	11,393	229.230	840	34,251	27,267	259.934
450	15,483	11,742	230.194	850	34,773	27,706	260.551
460	15,916	12,091	231.144	860	35,296	28,125	261.164
470	16,351	12,444	232.080	870	35,821	28,588	261.770
480	16,791	12,800	233.004	880	36,347	29,031	262.371
490	17,232	13,158	233.916	890	36,876	29,476	262.968
500	17,678	13,521	234.814	900	37,405	29,922	263.559
510	18,126	13,885	235.700	910	37,935	30,369	264.146
520	18,576	14,253	236.575	920	38,467	30,818	264.728
530	19,029	14,622	237.439	930	39,000	31,268	265.304
540	19,485	14,996	238.292	940	39,535	31,719	265.877
550	19,945	15,372	239.135	950	40,070	32,171	266.444
560	20,407	15,751	239.962	960	40,607	32,625	267.007
570	20,870	16,131	240.789	970	41,145	33,081	267.566
580	21,337	16,515	241.602	980	41,685	33,537	268.119
590	21,807	16,902	242.405	990	42,226	33,995	268.670

Anexo 10.

**Factor de correlación C2, para
intercambiadores de $N_L < 10$**

TABLA 7.6 Factor de correlación C_2 de la ecuación 7.64 para $N_L < 10$ [21]

N_L	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Alineado	0.64	0.80	0.87	0.90	0.92	0.94	0.96	0.98	0.99
Escalonado	0.68	0.75	0.83	0.89	0.92	0.95	0.97	0.98	0.99

Anexo 11.

Factores de fricción, para lado de tubo.

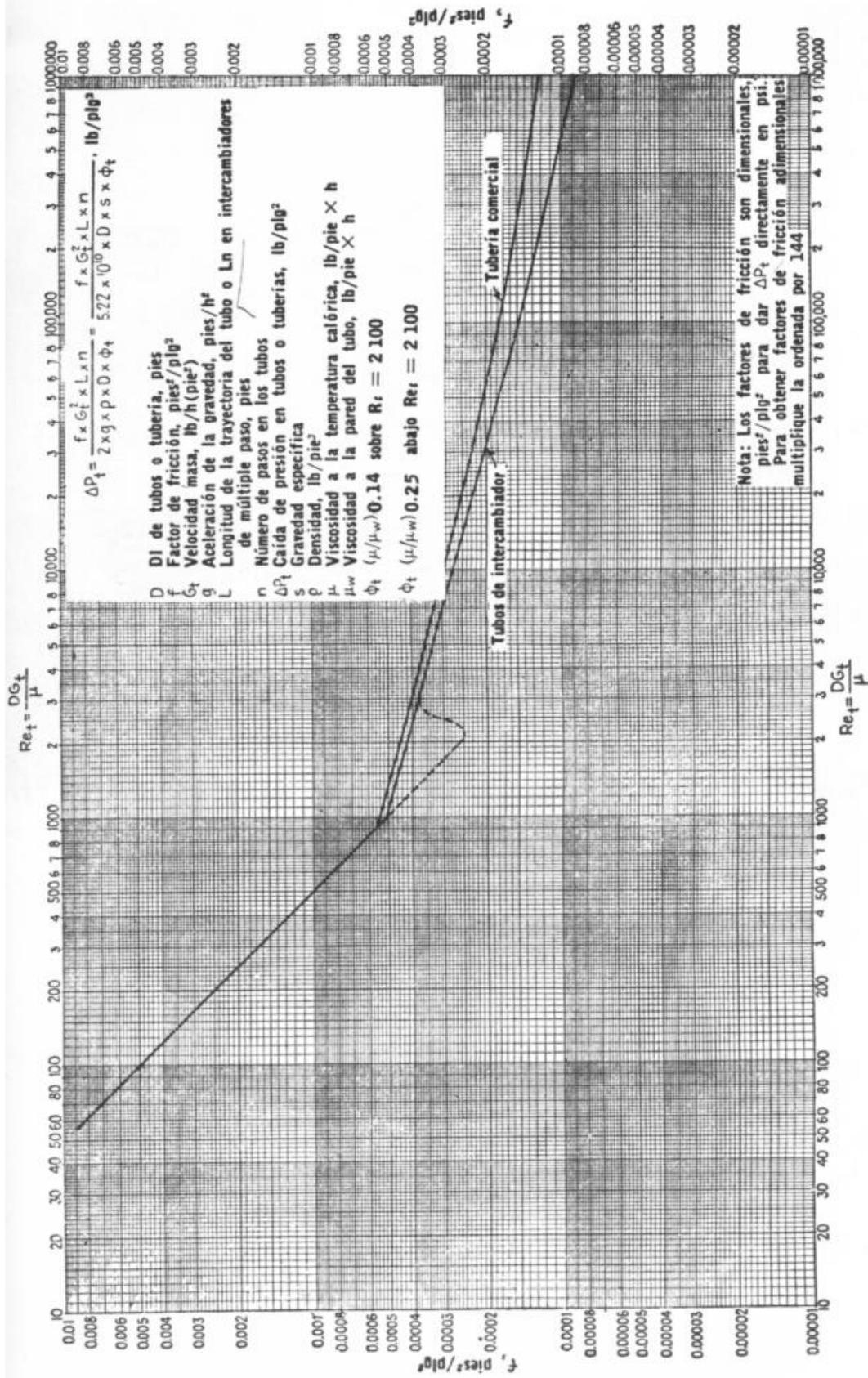


FIG. 26. Factores de fricción, para lado de tubo. (Standards Exchanger Manufacturers Association, 2a. ed., New York, 1949)

Anexo 12.

**Curva de transferencia de calor para lado
de la carcaza con haz de tubos**

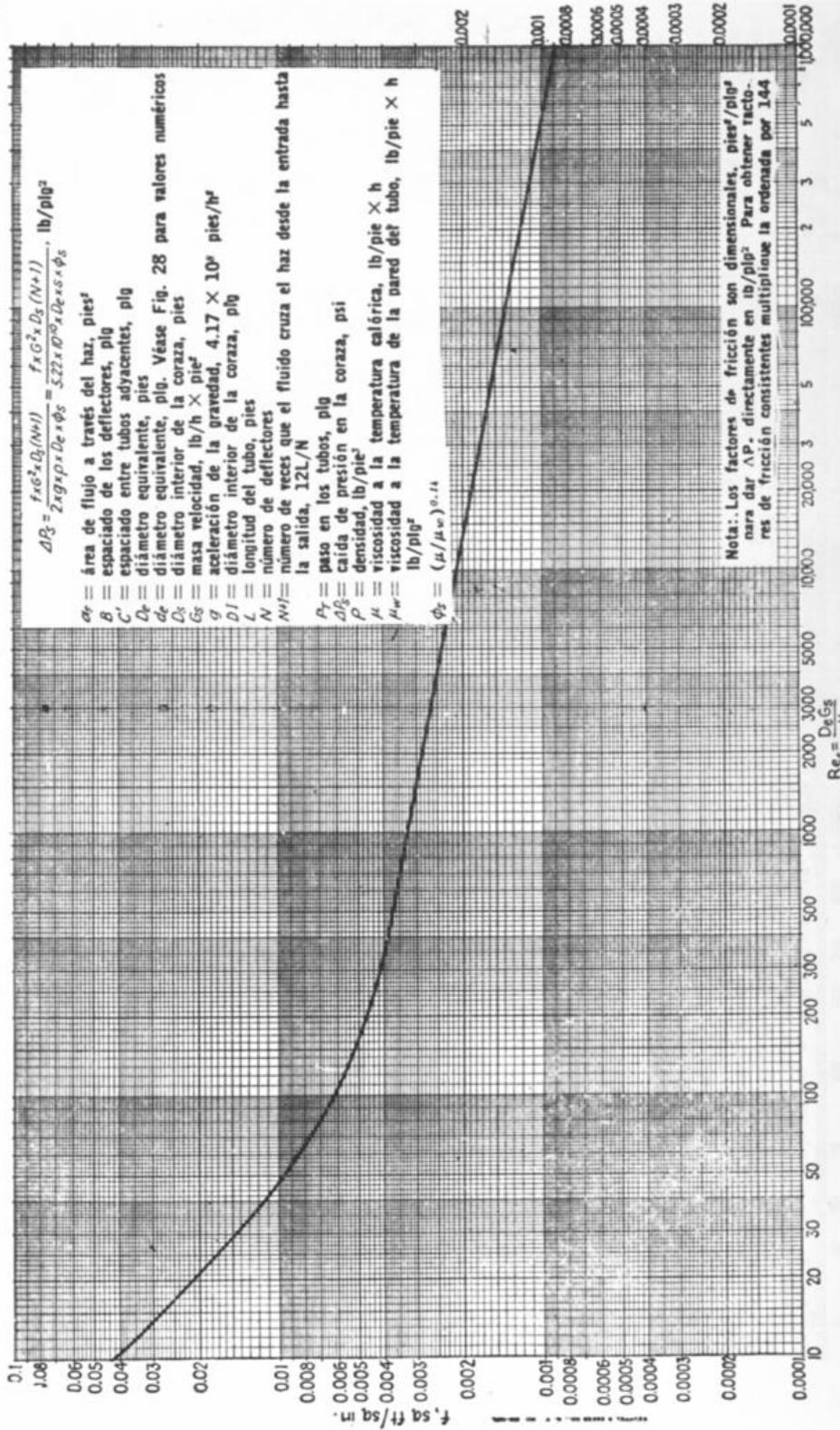
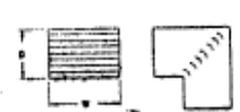
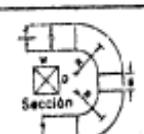
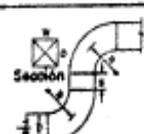
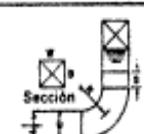
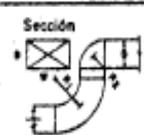
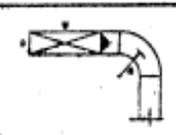


Fig. 29. Factores de fricción lado de la coraza, para haces de tubos con deflectores segmentados 25%

Anexo 13.

**Rozamiento en los elementos de un sistema
de conductos rectangulares.**

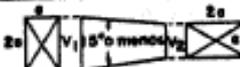
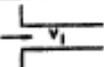
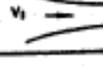
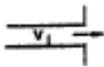
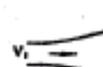
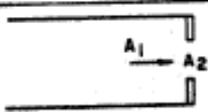
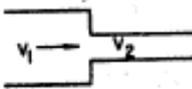
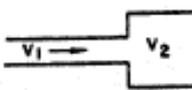
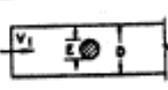
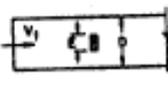
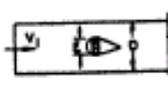
TABLA 10. ROZAMIENTO EN LOS ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE CONDUCTOS RECTANGULARES

ELEMENTO	CONDICIONES	RELACIÓN L/D **																																									
<p>Codo de radio de sección rectangular</p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">W/D</th> <th colspan="5">R/D</th> </tr> <tr> <th>0,5</th> <th>0,75</th> <th>1,00</th> <th>1,25 *</th> <th>1,50</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td colspan="5">Relación L/D</td> </tr> <tr> <td>0,5</td> <td>33</td> <td>14</td> <td>9</td> <td>5</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>45</td> <td>16</td> <td>11</td> <td>7</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>80</td> <td>30</td> <td>14</td> <td>8</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>125</td> <td>40</td> <td>18</td> <td>12</td> <td>7</td> </tr> </tbody> </table>	W/D	R/D					0,5	0,75	1,00	1,25 *	1,50		Relación L/D					0,5	33	14	9	5	4	1	45	16	11	7	4	3	80	30	14	8	3	6	125	40	18	12	7	
W/D	R/D																																										
	0,5	0,75	1,00	1,25 *	1,50																																						
	Relación L/D																																										
0,5	33	14	9	5	4																																						
1	45	16	11	7	4																																						
3	80	30	14	8	3																																						
6	125	40	18	12	7																																						
<p>Codo de radio de sección rectangular con guías</p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Número de guías</th> <th colspan="4">R/D</th> </tr> <tr> <th>0,50</th> <th>0,75</th> <th>1,00</th> <th>1,50</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td colspan="4">Relación L/D</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>18</td> <td>10</td> <td>8</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>12</td> <td>8</td> <td>7</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>10</td> <td>7</td> <td>7</td> <td>6</td> </tr> </tbody> </table>	Número de guías	R/D				0,50	0,75	1,00	1,50		Relación L/D				1	18	10	8	7	2	12	8	7	7	3	10	7	7	6													
Número de guías	R/D																																										
	0,50	0,75	1,00	1,50																																							
	Relación L/D																																										
1	18	10	8	7																																							
2	12	8	7	7																																							
3	10	7	7	6																																							
<p>Codo de 90°</p> 	<p>Codo de radio con o sin guías</p>	<p>X/90 multiplicado por el valor correspondiente a codo análogo de 90°</p>																																									
<p>Codo recto rectangular</p> 	<p>Sin guías</p> <p>Guías de cambio de dirección de simple espesor</p> <p>Guías de cambio de dirección de doble espesor</p>	<p>60</p> <p>15</p> <p>10</p>																																									
<p>Doble codo</p>  <p>W/D = 1, R/D = 1,25 *</p>	<p>S = O</p> <p>S = D</p>	<p>15</p> <p>10</p>																																									
<p>Doble codo</p>  <p>R/D = 1,25 *</p>	<p>S = O</p> <p>S = D</p>	<p>20</p> <p>22</p>																																									
<p>Doble codo</p>  <p>W/D = 1, R/D = 1,25 * para ambos</p>	<p>S = O</p> <p>S = D</p>	<p>15</p> <p>16</p>																																									
<p>Doble codo</p>  <p>W/D = 2, R₁/D = 1,25 *, R₂/D = 0,5</p>	<p>Dirección de la flecha</p> <p>Dirección Inversa</p>	<p>45</p> <p>40</p>																																									
<p>Doble codo</p>  <p>W/D = 4, R/D = 1,25 * para ambos codos</p>	<p>Dirección de la flecha</p> <p>Dirección Inversa</p>	<p>17</p> <p>18</p>																																									

Anexo 14.

**Rozamiento en los elementos de un sistema
de conductos rectangulares.**

TABLA 10. ROZAMIENTO EN LOS ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE CONDUCTOS RECTANGULARES (Cont.)

ELEMENTO	CONDICIONES	VALOR DE n^{***}																												
Transformación 	$V_2 = V_1$ Pérdida p. e. = nhv_1	0,04																												
Expansión 	n Angulo α en ° <table border="1"> <tr> <td>v_2/v_1</td> <td>5°</td> <td>10°</td> <td>15°</td> <td>20°</td> <td>30°</td> <td>40°</td> </tr> <tr> <td>0,20</td> <td>0,26</td> <td>0,22</td> <td>0,20</td> <td>0,18</td> <td>0,15</td> <td>0,13</td> </tr> <tr> <td>0,40</td> <td>0,27</td> <td>0,26</td> <td>0,23</td> <td>0,22</td> <td>0,20</td> <td>0,19</td> </tr> <tr> <td>0,60</td> <td>0,28</td> <td>0,26</td> <td>0,26</td> <td>0,24</td> <td>0,24</td> <td>0,23</td> </tr> </table> Ganancia p. e. = $n(hv_1 - hv_2)$	v_2/v_1	5°	10°	15°	20°	30°	40°	0,20	0,26	0,22	0,20	0,18	0,15	0,13	0,40	0,27	0,26	0,23	0,22	0,20	0,19	0,60	0,28	0,26	0,26	0,24	0,24	0,23	
v_2/v_1	5°	10°	15°	20°	30°	40°																								
0,20	0,26	0,22	0,20	0,18	0,15	0,13																								
0,40	0,27	0,26	0,23	0,22	0,20	0,19																								
0,60	0,28	0,26	0,26	0,24	0,24	0,23																								
Contracción 	<table border="1"> <tr> <td>α</td> <td>30°</td> <td>45°</td> <td>60°</td> </tr> <tr> <td>n</td> <td>0,311</td> <td>0,317</td> <td>0,328</td> </tr> </table> Pérdida p. e. = $n(hv_1 - hv_2)$	α	30°	45°	60°	n	0,311	0,317	0,328	**** Pendiente 25 %																				
α	30°	45°	60°																											
n	0,311	0,317	0,328																											
Entrada abrupta 	Pérdida p. e. = nhv_1	0,10																												
Entrada suave 		0,009																												
Salida abrupta 																														
Salida suave 																														
Entrada reentrante 	Pérdida p. e. = nhv_1	0,25																												
Orificio redondo de borde agudo 	<table border="1"> <tr> <td>A_2/A_1</td> <td>0</td> <td>0,25</td> <td>0,50</td> <td>0,75</td> <td>1,00</td> </tr> <tr> <td>n</td> <td>0,78</td> <td>0,70</td> <td>0,57</td> <td>0,33</td> <td>0</td> </tr> </table> Pérdida p. e. = nhv_1	A_2/A_1	0	0,25	0,50	0,75	1,00	n	0,78	0,70	0,57	0,33	0																	
A_2/A_1	0	0,25	0,50	0,75	1,00																									
n	0,78	0,70	0,57	0,33	0																									
Contracción abrupta 	<table border="1"> <tr> <td>V_2/V_1</td> <td>0</td> <td>0,25</td> <td>0,50</td> <td>0,75</td> </tr> <tr> <td>n</td> <td>0,40</td> <td>0,37</td> <td>0,29</td> <td>0,15</td> </tr> </table> Pérdida p. e. = nhv_1	V_2/V_1	0	0,25	0,50	0,75	n	0,40	0,37	0,29	0,15																			
V_2/V_1	0	0,25	0,50	0,75																										
n	0,40	0,37	0,29	0,15																										
Expansión abrupta 	<table border="1"> <tr> <td>V_2/V_1</td> <td>0,20</td> <td>0,40</td> <td>0,60</td> <td>0,80</td> </tr> <tr> <td>n</td> <td>0,08</td> <td>0,14</td> <td>0,14</td> <td>0,09</td> </tr> </table> Ganancia p. e. = nhv_1	V_2/V_1	0,20	0,40	0,60	0,80	n	0,08	0,14	0,14	0,09																			
V_2/V_1	0,20	0,40	0,60	0,80																										
n	0,08	0,14	0,14	0,09																										
Tubería que atraviesa el conducto 	<table border="1"> <tr> <td>E/D</td> <td>0,10</td> <td>0,25</td> <td>0,50</td> </tr> <tr> <td>n</td> <td>0,06</td> <td>0,16</td> <td>0,60</td> </tr> </table> Pérdida p. e. = nhv_1	E/D	0,10	0,25	0,50	n	0,06	0,16	0,60																					
E/D	0,10	0,25	0,50																											
n	0,06	0,16	0,60																											
Barra que atraviesa el conducto 	<table border="1"> <tr> <td>E/D</td> <td>0,10</td> <td>0,25</td> <td>0,50</td> </tr> <tr> <td>n</td> <td>0,21</td> <td>0,42</td> <td>1,21</td> </tr> </table> Pérdida p. e. = nhv_1	E/D	0,10	0,25	0,50	n	0,21	0,42	1,21																					
E/D	0,10	0,25	0,50																											
n	0,21	0,42	1,21																											
Alivio sobre la obstrucción 	<table border="1"> <tr> <td>E/D</td> <td>0,10</td> <td>0,25</td> <td>0,50</td> </tr> <tr> <td>n</td> <td>0,02</td> <td>0,07</td> <td>0,27</td> </tr> </table> Pérdida p. e. = nhv_1	E/D	0,10	0,25	0,50	n	0,02	0,07	0,27																					
E/D	0,10	0,25	0,50																											
n	0,02	0,07	0,27																											

Anexo 15.

**Constantes para calcular el número de
Nusselt para el flujo de aire sobre un banco
de tubos de 10 o más líneas.**

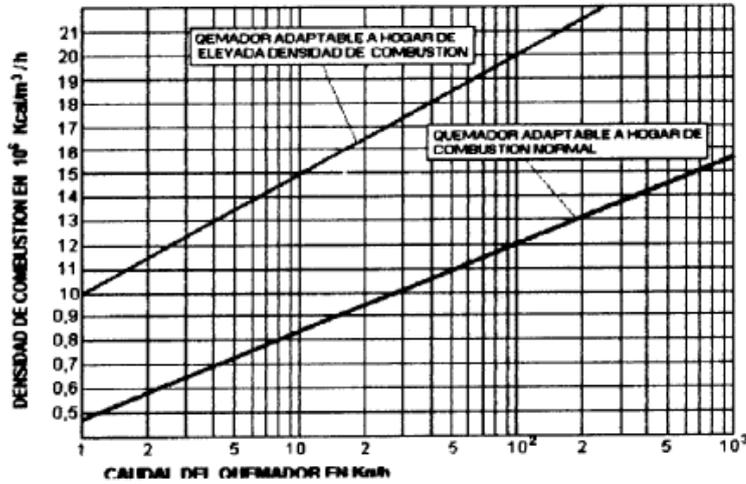
TABLA 7.5 Constantes de las ecuaciones 7.61 y 7.63 para el flujo de aire sobre un banco de tubos de 10 o más líneas [20]

S_T/D	S_T/D							
	1.25		1.5		2.0		3.0	
	C_1	m	C_1	m	C_1	m	C_1	m
Alineado								
1.25	0.348	0.592	0.275	0.608	0.100	0.704	0.0633	0.752
1.50	0.367	0.586	0.250	0.620	0.101	0.702	0.0678	0.744
2.00	0.418	0.570	0.299	0.602	0.229	0.632	0.198	0.648
3.00	0.290	0.601	0.357	0.584	0.374	0.581	0.286	0.608
Escalonado								
0.600	—	—	—	—	—	—	0.213	0.636
0.900	—	—	—	—	0.446	0.571	0.401	0.581
1.000	—	—	0.497	0.558	—	—	—	—
1.125	—	—	—	—	0.478	0.565	0.518	0.560
1.250	0.518	0.556	0.505	0.554	0.519	0.556	0.522	0.562
1.500	0.451	0.568	0.460	0.562	0.452	0.568	0.488	0.568
2.000	0.404	0.572	0.416	0.568	0.482	0.556	0.449	0.570
3.000	0.310	0.592	0.356	0.580	0.440	0.562	0.428	0.574

Anexo 16.

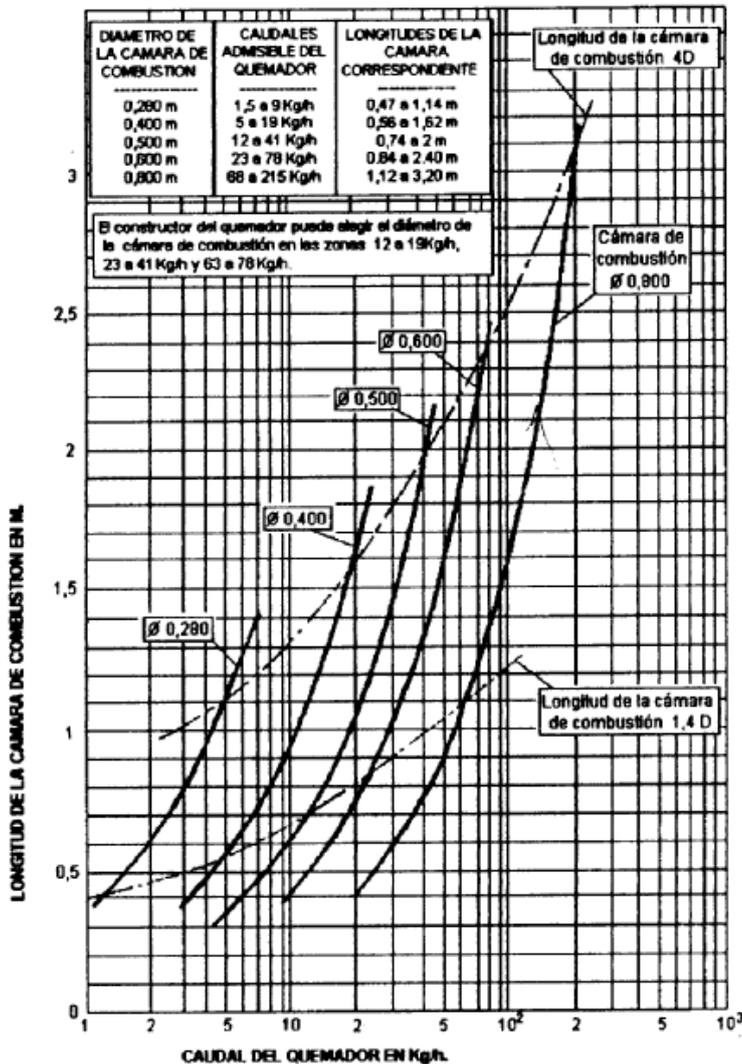
**Tabla referencial para seleccionar el
diámetro del hogar.**

DENSIDAD DE COMBUSTION DEL ENSAYO EN FUNCIÓN DEL TIRO Y DEL CAUDAL DEL QUEMADOR



DETERMINACION DEL DIAMETRO Y DE LA LONGITUD DE LA CAMARA DE ENSAYO DE COMBUSTION EN FUNCION DEL CAUDAL DEL CHICLER

Curvas aplicables a los quemadores destinados a equipar los hogares de densidad de combustión normal B



Anexo 17.

Propiedades de gas ideal del nitrógeno N₂.

TABLA A-18
Propiedades de gas ideal del nitrógeno, N₂

T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/(kmol · K)	T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/(kmol · K)
0	0	0	0	600	17,563	12,574	212.066
220	6,391	4,562	182.639	610	17,864	12,792	212.564
230	6,683	4,770	183.938	620	18,166	13,011	213.055
240	6,975	4,979	185.180	630	18,468	13,230	213.541
250	7,266	5,188	186.370	640	18,772	13,450	214.018
260	7,558	5,396	187.514	650	19,075	13,671	214.489
270	7,849	5,604	188.614	660	19,380	13,892	214.954
280	8,141	5,813	189.673	670	19,685	14,114	215.413
290	8,432	6,021	190.695	680	19,991	14,337	215.866
298	8,669	6,190	191.502	690	20,297	14,560	216.314
300	8,723	6,229	191.682	700	20,604	14,784	216.756
310	9,014	6,437	192.638	710	20,912	15,008	217.192
320	9,306	6,645	193.562	720	21,220	15,234	217.624
330	9,597	6,853	194.459	730	21,529	15,460	218.059
340	9,888	7,061	195.328	740	21,839	15,686	218.472
350	10,180	7,270	196.173	750	22,149	15,913	218.889
360	10,471	7,478	196.995	760	22,460	16,141	219.301
370	10,763	7,687	197.794	770	22,772	16,370	219.709
380	11,055	7,895	198.572	780	23,085	16,599	220.113
390	11,347	8,104	199.331	790	23,398	16,830	220.512
400	11,640	8,314	200.071	800	23,714	17,061	220.907
410	11,932	8,523	200.794	810	24,027	17,292	221.298
420	12,225	8,733	201.499	820	24,342	17,524	221.684
430	12,518	8,943	202.189	830	24,658	17,757	222.067
440	12,811	9,153	202.863	840	24,974	17,990	222.447
450	13,105	9,363	203.523	850	25,292	18,224	222.822
460	13,399	9,574	204.170	860	25,610	18,459	223.194
470	13,693	9,786	204.803	870	25,928	18,695	223.562
480	13,988	9,997	205.424	880	26,248	18,931	223.927
490	14,285	10,210	206.033	890	26,568	19,168	224.288
500	14,581	10,423	206.630	900	26,890	19,407	224.647
510	14,876	10,635	207.216	910	27,210	19,644	225.002
520	15,172	10,848	207.792	920	27,532	19,883	225.353
530	15,469	11,062	208.358	930	27,854	20,122	225.701
540	15,766	11,277	208.914	940	28,178	20,362	226.047
550	16,064	11,492	209.461	950	28,501	20,603	226.389
560	16,363	11,707	209.999	960	28,826	20,844	226.728
570	16,662	11,923	210.528	970	29,151	21,086	227.064
580	16,962	12,139	211.049	980	29,476	21,328	227.398
590	17,262	12,356	211.562	990	29,803	21,571	227.728

TABLA A-18
Propiedades de gas ideal del nitrógeno, N₂

T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/(kmol · K)	T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/(kmol · K)
0	0	0	0	600	17,563	12,574	212.066
220	6,391	4,562	182.639	610	17,864	12,792	212.564
230	6,683	4,770	183.938	620	18,166	13,011	213.055
240	6,975	4,979	185.180	630	18,468	13,230	213.541
250	7,266	5,188	186.370	640	18,772	13,450	214.018
260	7,558	5,396	187.514	650	19,075	13,671	214.489
270	7,849	5,604	188.614	660	19,380	13,892	214.954
280	8,141	5,813	189.673	670	19,685	14,114	215.413
290	8,432	6,021	190.695	680	19,991	14,337	215.866
298	8,669	6,190	191.502	690	20,297	14,560	216.314
300	8,723	6,229	191.682	700	20,604	14,784	216.756
310	9,014	6,437	192.638	710	20,912	15,008	217.192
320	9,306	6,645	193.562	720	21,220	15,234	217.624
330	9,597	6,853	194.459	730	21,529	15,460	218.059
340	9,888	7,061	195.328	740	21,839	15,686	218.472
350	10,180	7,270	196.173	750	22,149	15,913	218.889
360	10,471	7,478	196.995	760	22,460	16,141	219.301
370	10,763	7,687	197.794	770	22,772	16,370	219.709
380	11,055	7,895	198.572	780	23,085	16,599	220.113
390	11,347	8,104	199.331	790	23,398	16,830	220.512
400	11,640	8,314	200.071	800	23,714	17,061	220.907
410	11,932	8,523	200.794	810	24,027	17,292	221.298
420	12,225	8,733	201.499	820	24,342	17,524	221.684
430	12,518	8,943	202.189	830	24,658	17,757	222.067
440	12,811	9,153	202.863	840	24,974	17,990	222.447
450	13,105	9,363	203.523	850	25,292	18,224	222.822
460	13,399	9,574	204.170	860	25,610	18,459	223.194
470	13,693	9,786	204.803	870	25,928	18,695	223.562
480	13,988	9,997	205.424	880	26,248	18,931	223.927
490	14,285	10,210	206.033	890	26,568	19,168	224.288
500	14,581	10,423	206.630	900	26,890	19,407	224.647
510	14,876	10,635	207.216	910	27,210	19,644	225.002
520	15,172	10,848	207.792	920	27,532	19,883	225.353
530	15,469	11,062	208.358	930	27,854	20,122	225.701
540	15,766	11,277	208.914	940	28,178	20,362	226.047
550	16,064	11,492	209.461	950	28,501	20,603	226.389
560	16,363	11,707	209.999	960	28,826	20,844	226.728
570	16,662	11,923	210.528	970	29,151	21,086	227.064
580	16,962	12,139	211.049	980	29,476	21,328	227.398
590	17,262	12,356	211.562	990	29,803	21,571	227.728

Anexo 19.

Propiedades termofísicas de agua saturada.

Tabla A.6 Propiedades termofísicas de agua saturada^a

Temperatura, T (K)	Presión, P (bars) ^b	Volumen específico (m ³ /kg)		Entalpía de vaporización, h_{fg} (kJ/kg)	Calor específico (kJ/kg · K)		Viscosidad (N · s/m ²)	Conductividad térmica (W/m · K)		Número de Prandtl		Tensión superficial, $\sigma_f \cdot 10^3$ (N/m)	Coeficiente de expansión, $\beta_f \cdot 10^6$ (K ⁻¹)	Temperatura (K)	
		$v_f \cdot 10^3$	v_g		$c_{p,f}$	$c_{p,g}$		$k_f \cdot 10^3$	$k_g \cdot 10^3$	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

390	1.794	1.058	0.980	2212	4.239	2.104	2.37	12.69	686	26.3	1.47	1.013	55.6	841	390
400	2.455	1.067	0.731	2183	4.256	2.158	217	13.05	688	27.2	1.34	1.033	53.6	896	400
410	3.302	1.077	0.553	2153	4.278	2.221	200	13.42	688	28.2	1.24	1.054	51.5	952	410
420	4.370	1.088	0.425	2123	4.302	2.291	185	13.79	688	29.8	1.16	1.075	49.4	1010	420
430	5.699	1.099	0.331	2091	4.331	2.369	173	14.14	685	30.4	1.09	1.10	47.2	—	430
440	7.333	1.110	0.261	2059	4.36	2.46	162	14.50	682	31.7	1.04	1.12	45.1	—	440
450	9.319	1.123	0.208	2024	4.40	2.56	152	14.85	678	33.1	0.99	1.14	42.9	—	450
460	11.71	1.137	0.167	1989	4.44	2.68	143	15.19	673	34.6	0.95	1.17	40.7	—	460
470	14.55	1.152	0.136	1951	4.48	2.79	136	15.54	667	36.3	0.92	1.20	38.5	—	470
480	17.90	1.167	0.111	1912	4.53	2.94	129	15.88	660	38.1	0.89	1.23	36.2	—	480
490	21.83	1.184	0.0922	1870	4.59	3.10	124	16.23	651	40.1	0.87	1.25	33.9	—	490
500	26.40	1.203	0.0766	1825	4.66	3.27	118	16.59	642	42.3	0.86	1.28	31.6	—	500
510	31.66	1.222	0.0631	1779	4.74	3.47	113	16.95	631	44.7	0.85	1.31	29.3	—	510
520	37.70	1.244	0.0525	1730	4.84	3.70	108	17.33	621	47.5	0.84	1.35	26.9	—	520
530	44.58	1.268	0.0445	1679	4.95	3.96	104	17.72	608	50.6	0.85	1.39	24.5	—	530
540	52.38	1.294	0.0375	1622	5.08	4.27	101	18.1	594	54.0	0.86	1.43	22.1	—	540
550	61.19	1.323	0.0317	1564	5.24	4.64	97	18.6	580	58.3	0.87	1.47	19.7	—	550
560	71.08	1.355	0.0269	1499	5.43	5.09	94	19.1	563	63.7	0.90	1.52	17.3	—	560
570	82.16	1.392	0.0228	1429	5.68	5.67	91	19.7	548	76.7	0.94	1.59	15.0	—	570
580	94.51	1.433	0.0193	1353	6.00	6.40	88	20.4	528	76.7	0.99	1.68	12.8	—	580
590	108.3	1.482	0.0163	1274	6.41	7.35	84	21.5	513	84.1	1.05	1.84	10.5	—	590
600	123.5	1.541	0.0137	1176	7.00	8.75	81	22.7	497	92.9	1.14	2.15	8.4	—	600
610	137.3	1.612	0.0115	1068	7.85	11.1	77	24.1	467	103	1.30	2.60	6.3	—	610
620	159.1	1.705	0.0094	941	9.35	15.4	72	25.9	444	114	1.52	3.46	4.5	—	620
625	169.1	1.778	0.0085	858	10.6	18.3	70	27.0	430	121	1.65	4.20	3.5	—	625
630	179.7	1.856	0.0075	781	12.6	22.1	67	28.0	412	130	2.0	4.8	2.6	—	630
635	190.9	1.935	0.0066	683	16.4	27.6	64	30.0	392	141	2.7	6.0	1.5	—	635
640	202.7	2.075	0.0057	560	26	42	59	32.0	367	155	4.2	9.6	0.8	—	640
645	215.2	2.351	0.0045	361	90	—	54	37.0	331	178	12	26	0.1	—	645
647.3 ^c	221.2	3.170	0.0032	0	∞	∞	45	45.0	238	238	∞	∞	0.0	—	647.3 ^c

^aAdaptada de la referencia 19.

^b1 bar = 10⁵ N/m².

^cTemperatura crítica.

Anexo 20.

Tabla de Consumo de Materiales

Material en acero utilizado en la adecuación del Horno.

Tipo	Doblez	Suelda	Corte Cizalla	Corte Plasma	Perforación	Peso	Precio
						kg	\$
Omega						60,6	60,6
Omega						19,5	19,5
Omega						14,5	14,5
Omega						86,8	86,8
Omega						106,8	106,8
Semi - Omega						31,5	31,5
Semi - Omega						23,3	23,3
Semi - Omega						40,9	40,9
Semi - Omega						36,2	36,2
Semi - Omega						29,8	29,8
C-G						121,7	121,7
C-G						9,1	9,1
C-G						7,3	7,3
C-G						2,8	2,8
Ángulos						6,3	6,3
Ángulos						5,4	5,4
Ángulos						3,8	3,8
Ángulos						4,2	4,2
Ángulos						5,1	5,1
Ángulos						5,5	5,5
Ángulos						2,5	2,5
Ángulos						4,6	4,6
Ángulos						37,4	37,4
Platinas						2,9	2,9
Platinas						2,0	2,0
Platinas						2,8	2,8
Platinas						2,7	2,7
Platinas						1,6	1,6
Platinas						1,2	1,2
Placas						185,4	185,4
Placas						34,8	34,8
Placas						24,9	24,9
Placas						43,0	43,0
Placas						30,8	30,8
Placas						42,8	42,8
Placas						32,1	32,1
Placas						60,5	60,5
Placas						45,4	45,4

Material en acero utilizado en la adecuación del Horno.

Tipo	Doblez	Suelda	Corte Cizalla	Corte Plasma	Perforación	Peso	Precio
Placas						85,3	85,3
Placas						61,1	61,1
Placas						97,6	97,6
Placas						72,4	72,4
Placas						96,2	96,2
Placas						117,1	117,1
Placas						117,5	117,5
Placas						90,0	90,0
Placas						160,8	160,8
Placas						14,3	14,3
Placas						17,7	17,7
Placas acero inoxidable						373,9	373,9
Placa acero inoxidable						15,3	15,3
Tubos de 2 pulg Acero inoxidable						609,0	609,0
Bridas						3,0	3,0
Brida Cir						3,3	3,3
Bridas						1,6	1,6
Bridas						4,8	4,8
Bridas						1,6	1,6
Bridas						9,6	9,6
Bridas						11,4	11,4
Brida Cir						3,7	3,7
Total de Acero						2147,6	3145,8

Anexo 21.

Tabla de Equipos y Accesorios.

Equipos y accesorios

Nombre	Tipo	Cantidad	Unidad	Precio por unidad	Precio
Ventilador	Centrífugo	2	Und	1105,0	2210,0
Quemador	Power Flame	1	Un	199,1	199,1
Disco	Desbaste	20	Und	2,0	39,2
Disco	Corte	21	Und	1,5	31,5
Tizas	Blanca	12	Und	0,1	1,4
Electrodos	6011	30	kg	25,0	75,0
Electrodos	7018	15	kg	29,0	43,5
Electrodos	R91	20	kg	14,2	113,5
Pernos	1/2*1-1/2 Galvanizada	1440	und	0,2	259,2
Tuercas	1/2 Galvanizada	1440	und	0,2	220,3
Arandela	1/2 negra	1000	und	0,1	80,0
Pega	Silicona de alta temperatura	3	kg	2,1	6,4
Aislante	Cordón de asbesto	30	m	1.1	32.4
Broca 9/16 pulg	Acero	4	und	1,9	7,6
Broca 9mm	Acero	6	und	1,5	8,7
Broca 18 mm	Acero	1	und	2,5	2,5
Alambre	MIG	5	15kg	20,3	6,8
Tanque	Oxigeno	2	Und	14,1	28,2
Tanque	Acetileno	1	Und	52,2	52,2
Tanque	CO2	2	Und	16,0	32,0
Taladrina	Refrigerante	2	lt	0,5	1,0
Lana de vidrio	1 pulg	6	Rollos	44,0	264,0
Guantes	Soldadura	4	Par	2,9	11,7
Total de gastos					3693,8

**Anexo 22. Factor para cálculo de pérdida de
presión por fricción chimenea**

TABLA 6.2

Factores de fricción, *f*, para cálculos de pérdidas por rozamiento en conducciones y chimeneas (temperatura media del gas, de 450 a 650 °K)

Diámetro de la chimenea (mm)	Velocidad media del gas (m s ⁻¹)	Hormigón liso o acero soldado	Acero remachado o enlucido de cemento liso	Ladrillo o enlucido de cemento rugoso
150	1.5	0.0054	0.0069	0.0190
	3.0	0.0048	0.0066	0.0187
	4.5	0.0045	0.0064	0.0185
	6.0 y superiores	0.0044	0.0063	0.0180
225	1.5	0.0047	0.0058	0.0180
	3.0	0.0043	0.0057	0.0176
	4.5	0.0040	0.0056	0.0171
	6.0 y superiores	0.0039	0.0055	0.0168
300	1.5	0.0042	0.0054	0.0146
	3.0	0.0039	0.0051	0.0145
	4.5	0.0037	0.0050	0.0144
	6.0 y superiores	0.0036	0.0049	0.0143
350	1.5	0.0040	0.0050	0.0138
	3.0	0.0037	0.0049	0.0135
	4.5	0.0035	0.0048	0.0130
	6.0 y superiores	0.0034	0.0046	0.0130
450	1.5	0.0037	0.0047	0.0130
	3.0	0.0035	0.0045	0.0128
	4.5	0.0033	0.0044	0.0127
	6.0 y superiores	0.0032	0.0043	0.0127
600	1.5	0.0036	0.0043	0.0125
	3.0	0.0033	0.0040	0.0123
	4.5	0.0031	0.0039	0.0120
	6.0 y superiores	0.0030	0.0038	0.0119
1200	1.5	0.0030	0.0035	0.0111
	3.0	0.0033	0.0040	0.0123
	4.5	0.0031	0.0039	0.0120
	6.0 y superiores	0.0030	0.0038	0.0119
1200	1.5	0.0030	0.0035	0.0111
	3.0	0.0027	0.0034	0.0110
	4.5	0.0026	0.0033	0.0109
	6.0 y superiores	0.0025	0.0032	0.0108
1800	1.5	0.0027	0.0031	0.0101
	3.0	0.0025	0.0029	0.0098
	4.5	0.0024	0.0028	0.0097
	6.0 y superiores	0.0023	0.0027	0.0095

Nota: Para otras velocidades de gas y diámetros de chimenea, interpólese. Para construcciones diferentes de las mostradas, seleccione la cifra sobre la base de similitud del acabado interior de la chimenea.

Anexo 23. Gráfica del Termógrafo.

Anexo 24. Consumo en construcción y montaje.

**Anexo 25. Factor para cálculo de pérdida de
presión por curvaturas chimenea**

8.3 Planos constructivos.