

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DE UN HORNO
PARA EL CURADO DE PINTURA ELECTROSTÁTICA PARA EL
CENTRO DE PRODUCCIÓN E.S.P.E SEDE LATACUNGA.

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

GUSTAVO DAVID CARRILLO CAMACHO

BYRON ANDRÉS GUERRERO HINOJOSA

DIRECTOR: ING. FERNANDO MONTENEGRO

CODIRECTOR: ING. LUIS ECHEVERRÍA

Sangolquí, 10 de Marzo del 2010

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto de grado titulado **“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DE UN HORNO PARA EL CURADO DE PINTURA ELECTROSTÁTICA PARA EL CENTRO DE PRODUCCIÓN E.S.P.E SEDE LATACUNGA”** fue realizado en su totalidad por los Sres. GUSTAVO DAVID CARRILLO CAMACHO y BYRON ANDRÉS GUERRERO HINOJOSA como requerimiento previo para la obtención del Título de Ingeniero Mecánico.

Ing. Fernando Montenegro

DIRECTOR

Ing. Luis Echeverría

CODIRECTOR

LEGALIZACION DEL PROYECTO

“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DE UN HORNO PARA EL CURADO DE PINTURA ELECTROSTÁTICA PARA EL CENTRO DE PRODUCCIÓN E.S.P.E SEDE LATACUNGA”

Elaborado por:

Gustavo David Carrillo Camacho
CI: 171565641-7

Byron Andrés Guerrero Hinojosa
CI: 171665975-8

Ing. Emilio Tumipamba
DIRECTOR DE LA CARRERA

DEDICATORIA

A mis padres Gustavo y Susana, quienes han sido pilares fundamentales en mi vida, que en este largo caminar depositaron su confianza, su apoyo y su amor en mí. A ellos porque fruto de su esfuerzo diario han permitido forjarme un futuro profesional.

A mi madre, quien siempre me brindó sus consejos para ser una persona de bien. Infinitamente gracias madre querida porque sin usted nada de lo que he logrado hasta ahora lo hubiese podido conseguir.

A mi padre, que día a día da su vida por el bienestar de sus hijos, a él porque nunca le defraudé y ahora puedo regalarle una nueva alegría a su vida.

Queridos padres, quiero demostrarles que su sacrificio no fue en vano, es por ello que la mejor muestra de gratitud hacia ustedes es dedicándoles este proyecto con todo mi amor.

Gustavo Carrillo

A mis padres, quienes siempre me aconsejaron, me apoyaron y lucharon para hacer de mí una mejor persona.

Dedico este proyecto también a mi hermano y a mi hermana quienes han sido una motivación en mi vida para seguir adelante y poder ser una persona ejemplar.

En fin, este proyecto va dedicado a mi familia que son las personas más importantes en mi vida y siempre han estado a mi lado en todos los buenos momentos y también en los difíciles. Para ellos va dedicado este proyecto con todo mi cariño.

Byron Guerrero

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios infinitamente por la vida, y por permitirme culminar con éxito otra etapa de la vida. Gracias Dios porque día a día fortaleces mi alma y me permites acercarme a ti, porque tu amor es sin medida infinito y nos alcanza a todos.

A mis hermanas, quienes día a día me motivaron a ser un ejemplo de superación.

A mis sobrinos que han dado alegría a mi vida y son una bendición de Dios.

A la Escuela Politécnica del Ejército, que me acogió en sus aulas guiándome tanto en el desarrollo intelectual como personal, para llegar al fin de mi carrera.

Gustavo Carrillo

Agradezco a todas las personas que ayudaron a que este sueño se convierta en realidad entre ellos quiero principalmente nombrar a mis padres Byron y Cecilia, mis hermanos Iván y Anita, a mis tíos, mi abuelita, al Sr. Enrique Mullo, a mis maestros que con responsabilidad supieron transmitir sus conocimientos y finalmente al grandioso personal del Centro de Producción. Para todos ellos, mi eterno agradecimiento y mi admiración.

Byron Guerrero

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO	i
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
INDICE DE CONTENIDOS	v
RESUMEN	vi

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 ANTECEDENTES	2
1.2.1 SITUACIÓN ACTUAL	2
1.2.2 PROBLEMA A RESOLVER	2
1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA	3
1.4 OBJETIVOS	4
1.4.1 GENERAL	4
1.4.2 ESPECÍFICOS	4
1.5 ALCANCE	4

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 PINTURA ELECTROSTÁTICA	5
2.1.1 INTRODUCCIÓN	5
2.1.2 PROCEDIMIENTO PARA LA FABRICACIÓN DE LA PINTURA	5

2.1.2.1 Composición de la Pintura en Polvo	5
2.1.2.2 Manufactura de la Pintura en Polvo	6
2.1.3 TIPOS DE PINTURA EN POLVO TERMOESTABLES	7
2.1.3.1 Híbridos	7
2.1.3.2 Poliésteres	7
2.1.3.3 Epóxica	8
2.1.4 APLICACIÓN Y CURADO DE LAS PINTURAS TERMOESTABLE	8
2.1.4.1 Híbridos	8
2.1.4.2 Poliésteres	9
2.1.4.3 Epóxica	10
2.1.5 SISTEMA DE APLICACIÓN DE PINTURA ELECTROSTÁTICA	11
2.1.5.1 Principio de pintado electrostático	11
2.1.5.2 Equipo de pintura electrostática	12
2.1.6 VENTAJA Y DESVENTAJA DE LA PINTURA ELECTROSTÁTICA	16
2.2 HORNOS DE CURADO	17
2.2.1 INTRODUCCIÓN	17
2.2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS HORNOS	17
2.2.2.1 Por su fuente de calor	18
2.2.2.2 Hornos Discontinuos y Continuos	18
2.2.2.3 Por el tipo de combustible	18
2.2.2.4 Hornos por Recirculación	19
2.2.2.5 De Fuego Directo o de Fuego Indirecto	19
2.2.2.6 Por el uso del horno	21
2.2.2.7 Por la forma de recuperar calor	21
2.3 EQUIPO DE COMBUSTIÓN	22
2.3.1 INTRODUCCIÓN	22
2.3.2 FUNCIONES DE LOS EQUIPOS DE COMBUSTIÓN	22
2.3.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS QUEMADORES	23
2.3.3.1 Forma de la llama	23
2.3.3.2 Volumen de combustión	24
2.3.3.3 Estabilidad	25
2.3.3.4 Velocidad de llama	26
2.3.4 COMPONENTES DE LOS QUEMADORES	26

2.3.5 QUEMADORES A GAS	27
2.3.6 QUEMADORES PARA COMBUSTIBLES LÍQUIDOS	30
2.4 INTERCAMBIADORES DE CALOR	33
2.4.1 CONCEPTOS BÁSICOS	33
2.4.2 TIPOS DE INTERCAMBIADORES DE CALOR	34
2.4.2.1 Intercambiadores de Flujo Paralelo	34
2.4.2.2 Intercambiadores de Flujo Contracorriente	36
2.4.2.3 Intercambiadores de Flujo Cruzado	37
2.4.2.4 Coeficiente Global de Transferencia de Calor	38
2.4.2.5 Diferencia Media Logarítmica de Temperatura	39
2.5 VENTILADORES	40
2.6 CHIMENEAS	47
2.7 INSTRUMENTACIÓN	50
2.7.1 SENSORES	50
2.7.1.1 Sensores de temperatura	51
2.7.2 ACTUADORES	53
2.7.3 RELÉS	54
2.8 SISTEMA DE CONTROL	56

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL HORNO

3.1 GENERALIDADES	61
3.2 ALTERNATIVAS	62
3.3 DIMENSIONAMIENTO DEL HORNO	64
3.4 SELECCIÓN DE MATERIALES DEL HORNO	67
3.4.1 MATERIALES DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR	67
3.5 DISEÑO TÉRMICO	69
3.5.1 ANÁLISIS TÉRMICO DEL COMBUSTIBLE	69
3.5.1.1 Relación aire combustible (AC)	70
3.5.1.2 Temperatura de flama adiabática	71
3.5.2 ANÁLISIS TÉRMICO DEL HORNO	74
3.5.3 DISEÑO TÉRMICO DEL INTERCAMBIADOR	97

3.6 EFICIENCIA TÉRMICA DEL HORNO	115
3.7 PRESIÓN REQUERIDA POR EL SISTEMA	116
3.7.1 PÉRDIDAS DE PRESIÓN	117
3.7.2 PRESIÓN DEBIDA AL EFECTO CHIMENEA	120
3.7.3 SELECCIÓN DEL VENTILADOR	122
3.8 DISEÑO DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN	123
3.8.1 DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES DE CONTROL	123
3.8.2 DETERMINACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN Y SU UBICACIÓN	124
3.8.2.1 Sensores	124
3.8.2.2 Actuadores y Pre-Actuadores	126
3.8.3 DETERMINACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL	130
3.8.3.1 Hardware	130
3.8.3.2 Software	133

CAPÍTULO 4

CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE

4.1 DIAGRAMAS DE PROCESOS	137
4.2 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	147
4.3 RECURSOS DE FABRICACIÓN	147
4.3.1 MATERIALES	147
4.3.2 MANO DE OBRA	151
4.3.3 EQUIPOS Y HERRAMIENTAS NECESARIAS	152
4.3.3.1 Equipos	152
4.3.3.2 Herramientas	158
4.4 MONTAJE	160
4.5 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL	161
4.5.1 SENSORES	161
4.5.2 ACTUADORES	162
4.5.3 SISTEMA DE CONTROL	163
4.5.3.1 Hardware	163
4.5.3.2 Software	164

CAPÍTULO 5

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

5.1 PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO	167
5.2 PROTOCOLO DE PRUEBAS PARA EL HORNO	168
5.3 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN	168
5.4 PROCEDIMIENTO	169
5.5 LEVANTAMIENTO DE DATOS	170
5.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS	172
5.7 CRITERIOS DE SEGURIDAD INDUSTRIAL	175
5.8 MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	176
5.8.1 OPERACIÓN DE HORNO	176
5.8.2 OPERACIÓN DEL PLC	177
5.8.3 OPERACIÓN DEL QUEMADOR	179
5.8.4 MANTENIMIENTO DEL HORNO	181

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO

6.1 INVERSIÓN EN EQUIPOS Y MATERIALES	187
6.2 INVERSIÓN TOTAL	191
6.3 DEPRECIACIÓN Y RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN	192
6.4 CÁLCULO DE LA TIR, VAN Y ANÁLISIS COSTO BENEFICIO	195

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	199
BIBLIOGRAFÍA	203
ANEXOS	205

LISTADO DE FIGURAS

Figura 2.1: Composición de la pintura en polvo	6
Figura 2.2: Proceso de fabricación de la pintura en polvo	6
Figura 2.3: Curva de curado de las pinturas híbridas	9
Figura 2.4: Curva de curado de los poliésteres	10
Figura 2.5: Curva de curado de los epóxicos	11
Figura 2.6: Equipo de pintado	12
Figura 2.7: Esquema del inyector	13
Figura 2.8: Horno discontinuo con recirculación de aire	20
Figura 2.9: Horno continuo con banda transportadora para tratamientos térmicos	20
Figura 2.10: Componentes principales de un quemador	26
Figura 2.11: Quemador de pre-mezcla por inspiración	28
Figura 2.12: Quemador de pre-mezcla por aspiración	28
Figura 2.13: Quemador de alta velocidad dual	29
Figura 2.14: Sección de una llama de mezcla retardada	30
Figura 2.15: Esquema de un quemador con aire de atomización de baja presión	31
Figura 2.16: Atomizador de alta presión	32
Figura 2.17: Curva de temperaturas en flujo paralelo	34
Figura 2.18: Intercambiador de tubo doble en flujo paralelo	35
Figura 2.19: Intercambiador multitubos en flujo paralelo	35
Figura 2.20: Curva de temperatura en flujo contracorriente	36
Figura 2.21: Intercambiador multitubos en flujo contracorriente	37
Figura 2.22: Intercambiador de flujo cruzado	38
Figura 2.23: Ventiladores con envolvente	41
Figura 2.24: Ventiladores murales	42
Figura 2.25: Ventiladores centrífugos	42
Figura 2.26: Variación de la velocidad de giro	43

Figura 2.27: Variación de la densidad	44
Figura 2.28: Variación de la densidad y el diámetro	45
Figura 2.29: Relé de armadura	54
Figura 2.30: Relé de núcleo móvil	55
Figura 2.31: Relé tipo reed	55
Figura 2.32: Interacción de los elementos de un sistema de control	56
Figura 2.33: PLC compacto adjunto a módulos de I/O analógicos	57
Figura 3.1: Horno de convección con cámara de mezcla	62
Figura 3.2: Horno de convección con intercambiador de calor	63
Figura 3.3: Distribución de la materia prima en la cabina del horno	65
Figura 3.4: Espacio requerido entre materia prima	66
Figura 3.5: Porcentaje de exposición de la carga en función de su separación	66
Figura 3.6: Partes y piezas del intercambiador de calor	68
Figura 3.7: Efecto del número de Biot en la distribución de temperaturas	80
Figura 3.8: Dimensiones de la paredes del horno	84
Figura 3.9: Analogía eléctrica en las paredes del horno	84
Figura 3.10: Analogía eléctrica en las paredes del horno	90
Figura 3.11: Analogía eléctrica en el piso del horno	94
Figura 3.12: Área de flujo de aire del intercambiador de calor	103
Figura 3.13: Arreglo de tubos en un banco escalonado	104
Figura 3.14: Analogía eléctrica en un tubo	110
Figura 3.15: Dimensiones de los ductos de aire	117
Figura 3.16: Puntos fríos del horno	126
Figura 3.17: Quemador	127
Figura 3.18: Motor eléctrico Siemens	128
Figura 3.19: Diagrama de conexiones del Relé	129
Figura 3.20: Histéresis del controlador de temperatura	132
Figura 3.21: Ventana de presentación del Zelio Soft	133
Figura 3.22: Selección del módulo en el Zelio Soft	134
Figura 3.23: Selección de la categoría del módulo en el Zelio Soft	134
Figura 3.24: Selección del tipo de programación en el Zelio Soft	135
Figura 3.25: Bloque de programación	136

Figura 3.26: Diagrama de programación	136
Figura 4.1: Simbología utilizada en los diagramas de procesos	137
Figura 4.2: Proceso de construcción de los espejos del intercambiador	138
Figura 4.3: Proceso de montaje de los tubos en el intercambiador	139
Figura 4.4: Proceso de construcción y montaje de la cámara de combustión	140
Figura 4.5: Proceso de construcción y montaje de las paredes interiores	141
Figura 4.6: Proceso de construcción y montaje de las paredes exteriores	142
Figura 4.7: Proceso de construcción del ducto recto	143
Figura 4.8: Proceso de construcción de un codo de 90°	144
Figura 4.9: Proceso de construcción de una transición rectangular	145
Figura 4.10: Proceso de construcción de una transición rectangular-oval	146
Figura 4.11: Espejos del intercambiador de calor	147
Figura 4.12: Tubos del intercambiador de calor	148
Figura 4.13: Cámara de combustión del intercambiador de calor	148
Figura 4.14: Paredes interiores del intercambiador de calor	149
Figura 4.15: Aislamiento térmico del intercambiador de calor	150
Figura 4.16: Recubrimiento exterior del intercambiador de calor	150
Figura 4.17: Ductos y transiciones utilizadas en el sistema	151
Figura 4.18: Dobladora de tool	152
Figura 4.19: Cizalla	153
Figura 4.20: Baroladora	153
Figura 4.21: Soldadora MIG	154
Figura 4.22: Equipo de balanceo estático	155
Figura 4.23: Taladro de pedestal	155
Figura 4.24: Torno paralelo	156
Figura 4.25: Amoladora	157
Figura 4.26: Prensa hidráulica	157
Figura 4.27: Máquina Pullmax	158
Figura 4.28: Ensamble del sistema	161
Figura 4.29: Ubicación de la termocuplas	161
Figura 4.30: Dimensiones para instalación del quemador	162
Figura 4.31: Esquema del montaje del ventilador	163

Figura 4.32: Montaje del tablero de control	164
Figura 4.33: Conexión computador – PLC	165
Figura 4.34: Transferencia del programa al PLC	165
Figura 5.1: Ubicación de sensores de temperatura	170
Figura 5.2: Curva de curado	174
Figura 5.3: Equipo de seguridad industrial	176
Figura 5.4: PLC Zelio Telemecanique	178
Figura 5.5: Quemador	179

LISTADO DE TABLAS

Tabla 2.1: Propiedades de las pinturas Híbridas	8
Tabla 2.2: Propiedades de las pinturas Poliésteres	9
Tabla 2.3: Propiedades de las pinturas Epóxicas	10
Tabla 2.4: Ventajas y desventajas de la pintura electrostática	16
Tabla 2.5: Tipos de llama en Quemadores	24
Tabla 2.6: Componentes de un quemador	27
Tabla 2.7: Tabla de variación de temperatura por metro de longitud de chimenea	49
Tabla 2.8: Tipo de Termopares	52
Tabla 3.1: Matriz de ponderación para selección del tipo de sistema de calentamiento	64
Tabla 3.2: Materiales utilizados en el intercambiador de calor	67
Tabla 3.3: Entalpías de Reactantes y Productos	72
Tabla 3.4: Matriz de ponderación de sensores de temperatura	126
Tabla 3.5: Características Termocupla tipo J	126
Tabla 3.6: Características del Quemador	127
Tabla 3.7: Características del motor	128
Tabla 3.8: Consideraciones para selección de relés	128
Tabla 3.9: Características Relé del quemador	129
Tabla 3.10: Características Relé del Motor Eléctrico	130
Tabla 3.11: Matriz de ponderación del PLC	131
Tabla 3.12: Características del PLC	132
Tabla 3.13: Características del controlador de temperatura	133
Tabla 4.1: Personal Requerido	152
Tabla 4.2: Herramientas Utilizadas	159
Tabla 4.3: Partes y accesorios del tablero de control	164
Tabla 5.1: Parámetros de Funcionamiento del Horno	167
Tabla 5.2: Medición de Temperaturas con el horno lleno de camas	171

Tabla 5.3: Promedio de Temperaturas con el horno lleno de camas	173
Tabla 5.4: Mantenimiento preventivo del intercambiador de calor	182
Tabla 5.5: Mantenimiento preventivo del ventilador	183
Tabla 5.6: Mantenimiento preventivo del quemador	183
Tabla 5.7: Mantenimiento preventivo del sistema de suministro de combustible	184
Tabla 5.8: Mantenimiento preventivo de la cabina del horno	184
Tabla 5.9: Matriz de mantenimiento correctivo	185
Tabla 6.1: Costo del sistema de Automatización	187
Tabla 6.2: Costo de la Acometida de Diesel	188
Tabla 6.3: Costo de la Ductería	189
Tabla 6.4: Costo de los Equipos	190
Tabla 6.5: Costo de los Materiales Complementarios	190
Tabla 6.6: Costos Especializados	191
Tabla 6.7: Inversión Total	191
Tabla 6.8: Depreciación de Equipos del Horno	192
Tabla 6.9: Costos de Producción diarios del Horno nuevo	193
Tabla 6.10: Costo de Producción diarios del Horno antiguo	193
Tabla 6.11: Determinación de los ahorros obtenidos con el Horno Nuevo	194
Tabla 6.12: Incremento mensual de la producción	194

LISTADO DE ANEXOS

ANEXO A: Factor de corrección de la LMTD en flujo cruzado

ANEXO B: Factores de fricción para pérdidas de presión en intercambiadores de calor

ANEXO C: Pérdidas por fricción en ductos

ANEXO D: Coeficiente de pérdida dinámica

ANEXO E: Tabla característica del ventilador

ANEXO F: Cronograma de construcción

ANEXO G: Fotografías

ANEXO H: Planos de construcción

ANEXO I: Planos eléctricos

NOMENCLATURA

At:	Área transversal de flujo
Bi:	Número de Biot
De:	Diámetro equivalente en ductos
Dh:	Diámetro hidráulico
e:	Espesor del tubo
F:	Factores de corrección
f:	Factor de fricción para tubos lisos
G:	Gravedad relativa del aire
h:	Entalpía de formación a Tamb
hext:	Coefficiente de transferencia de calor externo
hf°:	Entalpía de formación
hi:	Coefficiente de transferencia de calor interno
HL:	Caída de presión total en el sistema
ho:	Coefficiente de transferencia de calor externo
hr:	Coefficiente de transferencia de calor por radiación
HV:	Presión de velocidad
Kg:	Conductividad térmica del aire
Lc:	Longitud característica del sólido
LMTD:	Diferencia media logarítmica de temperaturas
mc:	Masa de la carga
mo,ac,diesel:	Flujo másico
Np:	Número de pasos
Ntl:	Número de tubos en sentido longitudinal
Ntt:	Número de tubos en sentido transversal
Nu:	Número de Nusselt
Pc:	Presión estática equivalente
Pm:	Perímetro mojado
Potnominal:	Potencia nominal del quemador

Potreal:	Potencia real del quemador
Pr:	Número de Prandtl
Qc:	Calor impartido a la carga
QH:	Energía generado por el quemador
Qpi:	Calor a impartir a las paredes interiores del horno
Qpis:	Calor perdido por el piso
Qt:	Calor a impartir a las al techo y piso del horno
R1,2,3,4	Resistencias térmicas
RAC:	Relación Aire - Combustible
Ra:	Número de Raleigh
Re:	Numero de Reynolds
Req:	Resistencia equivalente
Sd:	Paso diagonal
SL:	Paso longitudinal
St:	Paso transversal
Tci:	Temperatura ambiente del aire
Tco:	Temperatura de salida del aire
Tg:	Temperatura promedio del aire al interior del horno
Thi:	Temperatura de flama adiabática
Tho:	Temperatura de salida de los gases
Tmax:	Temperatura máxima de trabajo del horno
U:	Coeficiente de global de transferencia de calor
Uo:	Coeficiente global de transferencia de calor
vmáx:	Velocidad máxima
VoH:	Cantidad de combustible quemada
β_{aire} :	Coeficiente de expansión volumétrica
ΔP :	Caída de presión en el intercambiador
η :	Eficiencia térmica
μ :	Viscosidad dinámica
ν :	Viscosidad cinemática
ρ :	Densidad
Φ_{ext} :	Diámetro exterior del tubo
Φ_{int} :	Diámetro interior del tubo

RESUMEN

En Enero de 2009 los directivos del Centro de Producción ESPE sede Latacunga se vieron en la necesidad de mejorar sus procesos productivos. Uno de los ejes fundamentales que fallaba en su producción era el proceso de pintura y principalmente su horno, ya que el mismo no tenía una distribución uniforme de temperatura, y su sistema de fuego directo no permitía utilizar la cabina en su totalidad. A partir de ello los Directivos decidieron repotenciar el horno en su totalidad buscando mayor eficiencia en sus procesos.

Los autores de este proyecto decidieron que la mejor alternativa para cumplir con las expectativas de los Directivos del Centro, era cambiar el sistema de distribución de calor a un sistema por convección ya que el horno maneja temperaturas relativamente bajas. Adicionalmente, se decidió utilizar un intercambiador de calor aire – aire para que de esta forma la producción no se vea afectada con los gases generados por la combustión. Además, se diseñó un sistema de transporte del fluido de trabajo, de forma que distribuya el aire caliente de manera eficiente y a un bajo costo. Cabe recalcar que para la ejecución del proyecto se contaban con recursos limitados, por ello se vio la necesidad de buscar los mecanismos más adecuados en función del presupuesto.

Para poder realizar este diseño se tomaron en cuenta la mayor cantidad posible de variables que podían afectar el desempeño del sistema. Es importante indicar que para el éxito del proyecto requirió de la ayuda de varios expertos en distintas áreas, entre ellos los directores de este proyecto.

Luego de haber finalizado el diseño se procedió a construir los distintos elementos del horno para luego ser ensamblados en la ciudad de Latacunga. Al concluir la construcción, se realizaron pruebas de funcionamiento del sistema, las cuales fueron muy exitosas y demostraron que las decisiones tomadas previo al diseño fueron las más adecuadas.

Finalmente, se realizó un análisis económico y financiero del proyecto, donde se pudo concluir que a pesar de que el horno nuevo funciona con un sistema más complejo al del anterior, se generó un ahorro en el consumo energético, se disminuyeron los tiempos de producción en el horno ya que actualmente ingresa casi el doble de la carga que podía ingresar al horno anterior. Todos estos factores redundaron en un ahorro mensual aproximado de \$1400.00 para el centro de producción, ahorro que permitirá recuperar la inversión de capital en un tiempo aproximado de 5 meses.

Con todos los antecedentes citados previamente se puede concluir que el proyecto ha tenido éxito, lo que beneficia al Centro de Producción y a los autores del proyecto. A continuación de este breve resumen se encuentra el documento donde se fundamenta de manera teórica y práctica el funcionamiento del Horno de Pintura del Centro de Producción ESPE Sede Latacunga.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

El Centro de Producción ESPE sede Latacunga, es una empresa dedicada a la fabricación de muebles metálicos. Entre sus principales productos se encuentran: sillas, escritorios, mesas, anaqueles, gabinetes y otros.

Estos productos luego de ser ensamblados pasan por un proceso de recubrimiento que sirve para dar un buen acabado y protección a los muebles, y además alarga la vida útil de los mismos. El proceso de recubrimiento que utilizan en el centro de producción se conoce como pintura electrostática, el cual consiste en aplicar partículas en polvo (pintura en polvo) que pasan por medio de un campo eléctrico. Estas partículas se ionizan adquiriendo una carga que luego es atraída hacia un cuerpo que está conectado a tierra (mueble metálico).

El proceso de pintura electrostática fue adoptado por el Centro de Producción por todas sus bondades, entre las cuales podemos nombrar: gran acabado superficial, no necesita disolventes tóxicos, reduce la contaminación en el área de trabajo y por ser más resistente a las rayaduras.

Actualmente el Centro de Producción, cuenta con un horno de curado de pintura, el mismo que no trabaja adecuadamente ya que su diseño es de llama directa, y la distribución de calor no es uniforme. Debido a estos inconvenientes, la producción tiene defectos y el horno no puede ser utilizado en su capacidad total ya que la temperatura en la parte inferior del horno es menor a 50 °C respecto a una temperatura requerida de 200 °C.

Como solución a estos problemas, los directivos del Centro de Producción han decidido desarrollar el siguiente proyecto: “DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DE UN HORNO PARA EL CURADO DE PINTURA ELECTROSTÁTICA PARA EL CENTRO DE PRODUCCIÓN E.S.P.E. SEDE LATACUNGA”

1.2. ANTECEDENTES

1.2.1. SITUACIÓN ACTUAL

En 1996 el Centro de Producción ESPE-L implementó el proceso de pintado electrostático, por lo que fue necesario adquirir un horno para el curado de piezas, para ello los egresados de la facultad de Ingeniería Mecánica de la ESPE Sres. Capt. De C.B. Eddie Novillo R. y el Sr. Diego Rovayo B. diseñaron y construyeron el horno que actualmente está en funcionamiento en dicha planta.

Luego de trece años se han evidenciado problemas como la falta de uniformidad en la distribución de temperatura en todo el volumen del horno. Por esta falla, se presentan defectos en los resultados de producción como un alto porcentaje de muebles quemados o con defectos en el acabado de la pintura.

1.2.2. PROBLEMA A RESOLVER

Las desventajas que se tienen con el horno actual son las siguientes:

- Falta de uniformidad en la distribución de temperatura.
- La llama choca directamente con la producción.
- Daños en el sistema de control del horno.
- Mala combustión
- Defectos en la producción

1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

En un mundo globalizado debido al alto nivel de exigencia por parte del consumidor final, es necesaria la implantación de óptimos sistemas de producción para poder elevar la calidad de los productos. El Centro de Producción ESPE-L como una solución a sus problemas ha decidido modificar el horno para el curado de pintura electrostática que permita mejorar sus procesos de producción y de esta manera mejorar la calidad de sus productos y disminuir costos de mala calidad.

Al modificar este horno, el centro de producción obtendrá varias ventajas respecto a su situación actual. Entre estas ventajas podemos citar las siguientes:

- Mejoramiento de los procesos de producción.
- Posibilidad de utilizar la capacidad del horno en su totalidad.
- Distribución uniforme de temperaturas en la cabina del horno.
- Al tener uniformidad en la temperatura se podrá obtener una capa de pintura fuertemente adherente, insoluble y estable.
- Al ser un horno automatizado se puede controlar su funcionamiento durante todo el ciclo del proceso.

Este proyecto será beneficioso tanto para el Centro de Producción ESPE-L y para quienes lo realizan ya que éste permite aplicar los conocimientos adquiridos en las diferentes áreas de la carrera como la Termodinámica, Transferencia de Calor y Masa, Mecánica de Fluidos, Automatización Industrial, Procesos de Manufactura y otros.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. GENERAL

Diseñar, construir y automatizar un horno para el curado de pintura electrostática para el centro de producción E.S.P.E sede Latacunga.

1.4.2. ESPECÍFICOS

- Investigar y analizar el proceso de curado de piezas metálicas mediante la utilización de pintura electrostática e identificar las características y ventajas que nos proporciona su uso.
- Realizar un Diseño Térmico con una alta eficiencia energética que permita reducir los costos de producción.
- Construir y montar el equipo necesario a fin de lograr un correcto funcionamiento y alto desempeño.
- Diseñar e implementar un sistema de control que cumpla adecuadamente con los parámetros de funcionamiento del horno.
- Realizar pruebas para evaluar el funcionamiento del horno y sus componentes con la finalidad de comprobar que el producto obtenido cumpla con los estándares de calidad requeridos.
- Realizar el análisis económico financiero del proyecto.

1.5. ALCANCE

Este proyecto pretende solucionar los problemas actuales del horno de pintura electrostática del centro de producción ESPE sede Latacunga mediante el diseño, construcción y automatización de un horno nuevo para el curado de pintura electrostática que cumpla con los requerimientos de dicho centro. También se buscará un sistema de calentamiento que garantice la uniformidad de la temperatura dentro de todo el volumen del horno, así como también se evitará que los gases de combustión afecten al producto y al personal del centro.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. PINTURA ELECTROSTÁTICA

2.1.1. INTRODUCCIÓN

En la manufactura de distintos productos como muebles metálicos, electrodomésticos y vehículos automotrices, es necesario dar un recubrimiento con la finalidad de lograr una mejor estética y evitar la corrosión.

Uno de los procesos que en la actualidad se utiliza para recubrir los productos mencionados se conoce como proceso de pintura electrostática o pintura en polvo. Este proceso funciona induciendo voltajes relativamente altos a partículas que por medio de una fuerza electrostática se adhieren al producto que está conectado a tierra.

La pintura en polvo es una solución económica para el proceso de revestimiento de productos. Los productos pintados con este proceso son más durables y resistentes a los impactos ambientales.

2.1.2. PROCEDIMIENTO PARA LA FABRICACIÓN DE LA PINTURA EN POLVO

2.1.2.1. Composición de la Pinturas en Polvo

Los componentes de la pintura en polvo son básicamente los siguientes:

- *Resinas*: Son materiales sólidos que provienen principalmente de fuentes vegetales. Las resinas ayudan principalmente a delimitar el rendimiento de la pintura.
- *Pigmentos*: Los pigmentos definen el poder cubritivo, los colores, el acabado, la textura y el brillo de las pinturas
- *Agentes de cura*: Estos agentes reaccionan químicamente con la resina para formar una película continua y protectora.
- *Aditivos*: Permiten optimizar el desempeño y los efectos de terminado de la pintura.

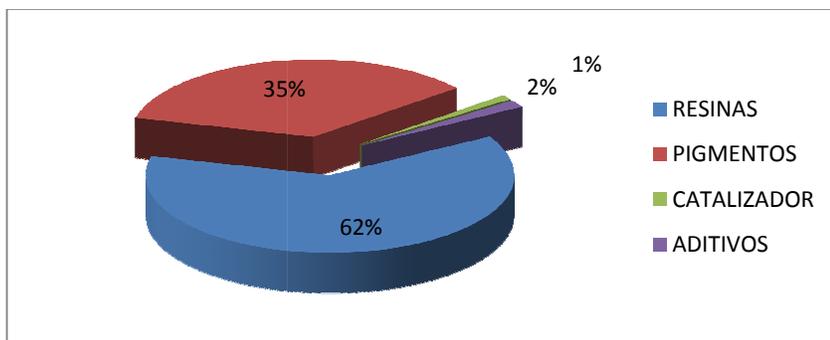


FIG. 2.1 Composición de la pintura en polvo

2.1.2.2. Manufactura de la pintura en polvo

El proceso de fabricación de la pintura en polvo se detalla en función de la siguiente figura.

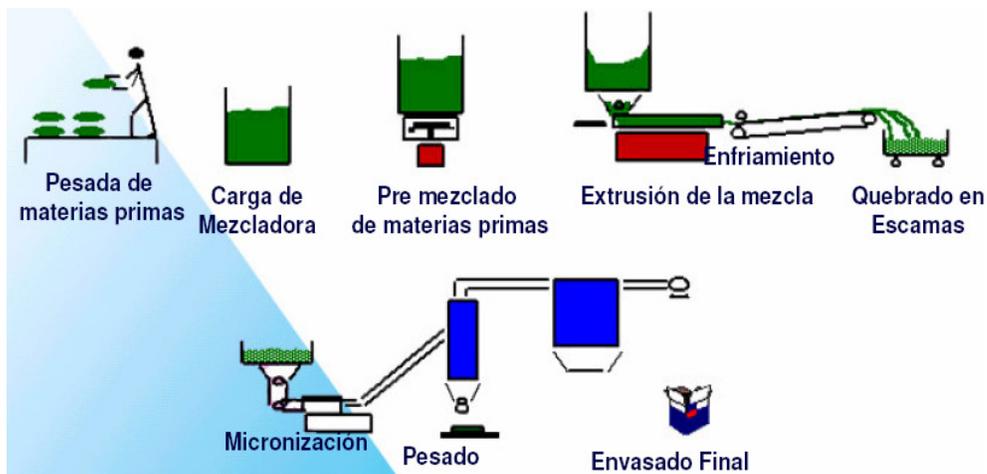


FIG. 2.2 Proceso de fabricación de la pintura en polvo

Los materiales principales que componen la pintura en polvo deben ser mezclados, extruidos, enfriados y micronizados para lograr una mezcla homogénea y pulverizada que contiene básicamente partículas de grano fino, grano grueso y grano inyectado. Dependiendo del tamaño de grano que se requiera, las partículas pasan por un proceso de tamizado. El grano grueso remanente pasa por un proceso adicional de molido y tamizado. Luego de tener el tamaño de grano requerido (150 micras), la pintura es envasada y enviada a su lugar de destino.

2.1.3. TIPOS DE PINTURA EN POLVO TERMOESTABLES

2.1.3.1. Híbridos

Los híbridos combinan las ventajas de las resinas tipo poliéster con las epóxicas. Existen diferentes proporciones entre resinas poliéster y epóxicas. Entre las proporciones más comunes se tienen 50/50, 60/40 y 70/30.

Los híbridos son comúnmente utilizados en aplicaciones decorativas e interiores. Poseen también una elevada resistencia al sobrehorneo y cuentan una buena adherencia sobre superficies metálicas.

Las pinturas en polvo híbridas tienen una reducida resistencia a los rayos ultravioletas. Por ello, no se recomienda este tipo de pintura para exteriores ya que pueden sufrir cambios en su coloración y entizamiento.

2.1.3.2. Poliésteres

Son pinturas recomendadas para usos interiores y exteriores. Tienen una alta resistencia a diferentes condiciones climáticas, a rayos ultravioletas y al sobrehorneo. Además, cuentan con una excelente adherencia sobre superficies metálicas, permitiendo el posterior maquinado de la pieza.

Existen también poliésteres superdurables que están desarrollados específicamente para ambientes exteriores. Este tipo de pinturas no es adecuado para pisos que requieran maquinado posterior debido a sus bajas propiedades mecánicas.

Otra clase de poliésteres se conoce como poliésteres microtexturados los cuales son de usos generales y aptos para uso decorativo en ambientes interiores y exteriores. Poseen elevada resistencia al sobrehorneo y permiten el maquinado posterior de la pieza.

2.1.3.3. Epóxica

Las pinturas epóxicas son formuladas con resina epóxica, las cuales tienen una alta resistencia contra la corrosión y los agentes químicos. Este tipo de pinturas no se recomiendan para uso a la intemperie o para usos donde el producto esté expuesto a los rayos ultravioleta. Cabe recalcar que las pinturas epóxicas fueron los recubrimientos termoestables que estuvieron disponibles en el mercado por primera vez.

2.1.4. APLICACIÓN Y CURADO DE LAS PINTURAS TERMOESTABLES

2.1.4.1. Híbridas

Tabla 2.1. Propiedades de las pinturas Híbridas¹

HIBRIDOS	
CONDICIONES DE APLICACIÓN	
Peso Específico	1.5 - 1.8 g/cm ³
Método de Aplicación	Corona
Voltaje	60 - 70 kV
Espesor	60 micras
Rendimiento Teórico	9 - 11 m ² /kg
Superficies Donde se Puede Aplicar	Acero laminado en frío Acero Galvanizado Aluminio Magnesio
Preparación Superficial	Desengrasado Limpieza Química Fosfatizado con Zinc o Hierro

¹ Hojas Técnicas, Pinturas en polvo, WESCO S.A.

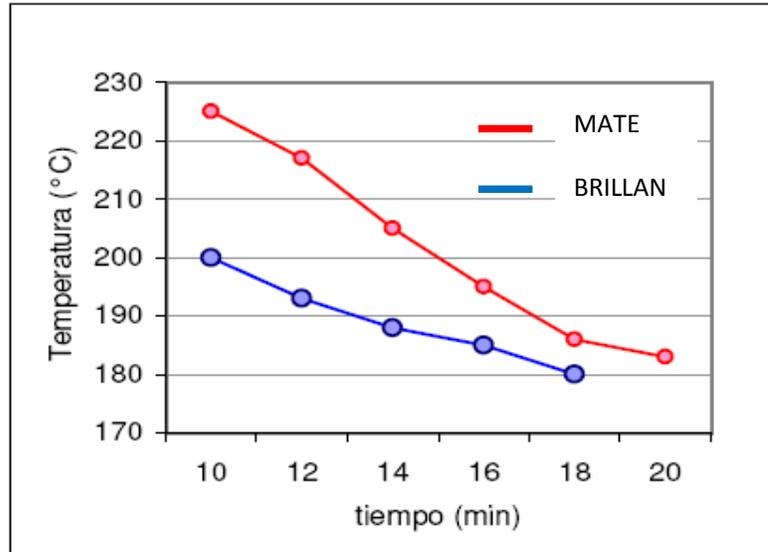


FIG. 2.3 Curva de curado de las pinturas híbridas

2.1.4.2. Poliésteres

Tabla 2.2. Propiedades de las pinturas Poliésteres¹

POLIESTER	
CONDICIONES DE APLICACIÓN	
Peso Específico	1.5 - 1.8 g/cm ³
Método de Aplicación	Corona
Voltaje	60 - 70 kV
Espesor	60 micras
Rendimiento Teórico	9 - 11 m ² /kg
Superficies Donde se Puede Aplicar	Acero laminado en frío Acero Electro galvanizado Aluminio Vidrio Cerámica
Preparación Superficial	Desengrasado Limpieza Química Fosfatizado con Zinc o Hierro

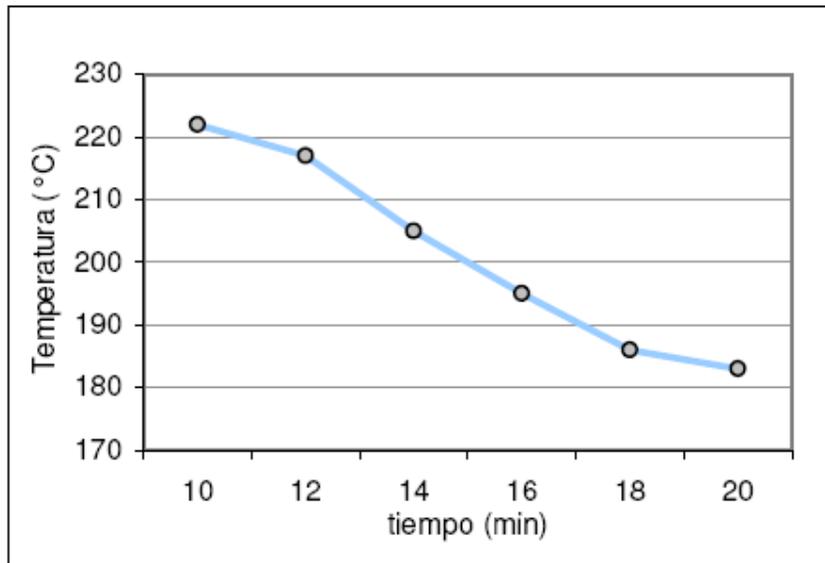


FIG. 2.4 Curva de curado de los poliésteres

2.1.4.3. Epóxica

Tabla 2.3. Propiedades de las pinturas Epóxicas¹

EPOXI	
CONDICIONES DE APLICACIÓN	
Peso Específico	1.5 - 1.7 g/cm ³
Método de Aplicación	Corona
Voltaje	60 - 70 kV
Espesor	60 micras
Rendimiento Teórico	9 - 11 m ² /kg
Superficies Donde se Puede Aplicar	Acero laminado en frío Acero Galvanizado Aluminio Magnesio
Preparación Superficial	Desengrasado Limpieza Química Fosfatizado con Zinc o Hierro

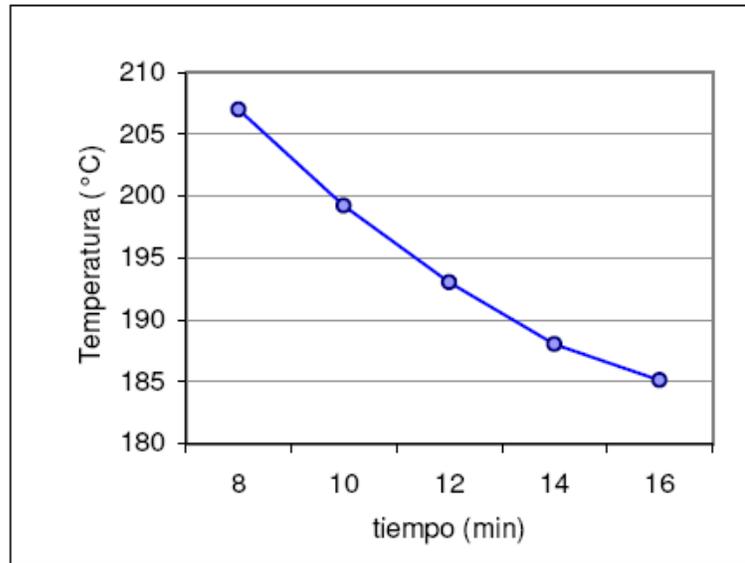


FIG. 2.5 Curva de curado de los epóxicos

2.1.5. SISTEMA DE APLICACIÓN DE PINTURA ELECTROSTÁTICA

2.1.5.1. Principio de pintado electrostático

El principio de pintado por medio de cargas electrostáticas se basa en el concepto de las fuerzas electrostáticas, donde las cargas opuestas se atraen. La pintura en polvo se transporta por medio de mangueras atraída por una fuerza de succión generada por una corriente de aire comprimido a alta velocidad, estas partículas llegan hasta las pistolas de aplicación (llamadas sprayers), comúnmente sistemas de tipo corona, donde son cargadas eléctricamente con voltajes muy altos de alrededor de 60 a 70 KV y corrientes muy bajas, con lo que se elimina la posibilidad de un choque eléctrico. Este proceso carga negativamente a las partículas que son atraídas por medio de las fuerzas electrostáticas hacia la pieza metálica que está conectada a tierra. Existen dos tipos de sistemas de pintura: Corona y Triboeléctrico.

2.1.5.2. Equipo de pintura electrostática

El equipo requerido para depositar la pintura sobre la superficie consta de los siguientes elementos:

1. Contenedor de pintura en polvo.
2. Inyectores de polvo
3. Mangueras de entrega de polvo
4. Pistolas de aplicación con sistema generador de alta tensión.
5. Un panel de control

A continuación se indica el equipo de pintado.

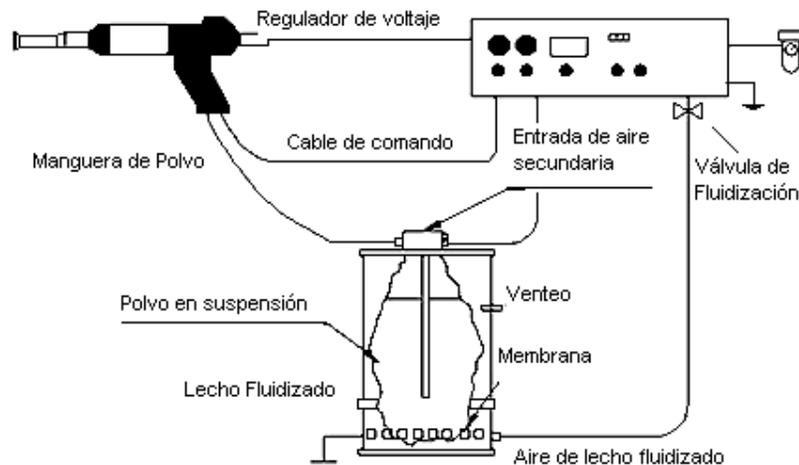


FIG. 2.6 Equipo de pintado

Contenedor de pintura

Dentro del contenedor, el polvo está suspendido gracias a una corriente de aire que atraviesa al mismo, para lograr esta suspensión del polvo el método que se usa es el del lecho fluidizado.

En la base del contenedor se tiene una membrana semipermeable en la que se deposita la pintura en polvo, y por debajo de ella se inyecta aire comprimido. Este atraviesa la membrana y arrastra el polvo suspendiendo al mismo como si

fuese líquido. Para lograr este efecto se usa una válvula de fluidización con la que regulamos la presión del aire.

La presión es muy importante, que si esta es muy alta se pierde pintura a través del venteo del contenedor y con una presión baja la pintura sale apelmazada y se puede entorpecer el flujo.

Inyector de polvo

El inyector de polvo determina la cantidad y velocidad con la que se debe entregar el polvo, este está ubicado sobre el lecho fluidizado, existen tantos inyectores como pistolas de polvo.

El inyector básicamente es una cámara que trabaja bajo el principio del efecto Vénturi en el que la presión del aire entrante genera un vacío en el inyector, con lo que el fluido suspendido en el contenedor es arrastrado hacia la manguera de salida. La entrada del aire a la cámara se la realiza cuando se oprime el pulsador de la pistola el cual activa una válvula solenoide y abre el paso hacia la cámara. En algunos casos el inyector dispone de dos entradas de aire para reducir la succión y aumentar la velocidad del polvo.

A continuación mostramos el inyector en forma esquemática.

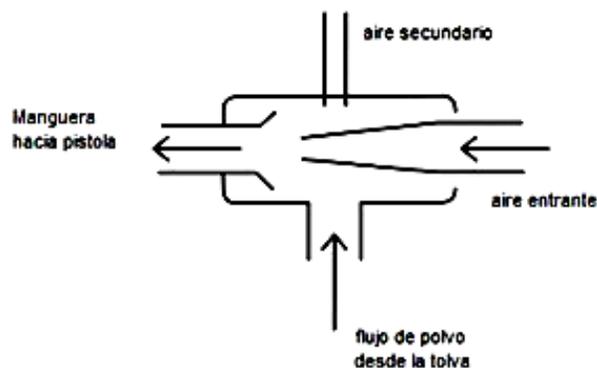


FIG. 2.7 Esquema del Inyector

Manguera de polvo

La manguera de polvo permite conectar el inyector con la pistola y conduce la mezcla aire polvo hacia la misma. Las dimensiones de las mangueras varían según su aplicación, estas van desde 8 milímetros para flujos bajos de polvo hasta 18 milímetros para altas producciones. No se recomienda alterar su longitud o diámetros de las mismas ya que su diseño original contempla el flujo de aire polvo que entrega el inyector. Las alteraciones en las dimensiones de las mangueras de polvo pueden provocar que el polvo se deposite a lo largo de la manguera.

Pistola de aplicación

Previa a que la pintura se deposite sobre la superficie esta tiene que ser cargada. Esta carga puede ser negativa o positiva. Cuando la carga es negativa el polvo tiene que recibir electrones y si se carga positivamente el polvo tiene que perder electrones. Dicha carga se produce en la pistola de aplicación. Existen actualmente dos tipos de pistolas de aplicación. Estas clases son:

- Pistola Corona
- Pistola Triboeléctrica

Pistola Corona

En las pistolas corona los electrones son transportados hacia o desde las partículas de polvo por iones del aire circundante.

El funcionamiento de la pistola corona se da en varias etapas. Primero se genera un campo eléctrico entre el electrodo de la pistola y la tierra, y debido al reducido tamaño del electrodo el campo se concentra y se acumula la carga

La fuerza que produce este campo es suficiente para arrancar electrones de las moléculas de nitrógeno y oxígeno del aire circundante, provocando una región conductora (corona) permitiendo a los electrones libres fluir desde el electrodo

hacia el aire (corona negativa) o desde el aire hacia el electrodo (corona positiva).

Estos electrones chocan con moléculas de oxígeno produciendo iones negativos los cuales siguen las líneas del campo eléctrico. Cuando la pistola impulsa la pintura, las partículas distorsionan las líneas del campo eléctrico de forma tal que los iones tienden a chocar con la pintura. Como consecuencia de este choque, el ión cede su electrón a la partícula de polvo cargándola negativamente, la cual siguiendo las líneas de campo llega hasta la pieza cediéndole su electrón y depositándose en ella.²

Las pistolas corona trabajan con amperajes de 50 micro-amperes y voltaje de entre 30 y 100 Kvolts.

Generalmente con este tipo de pistola, cuando el espesor supera las 100 micras, la capa de pintura automáticamente empieza a repeler el polvo que se deposita

Pistola Triboeléctrica

Las pistolas Triboeléctricas aprovechan el fenómeno que tienen los materiales no conductores al frotarse. Este fenómeno consiste en frotar dos materiales aislantes que posteriormente se cargan electrostáticamente. Análogo a esto las partículas viajan a altas velocidades a través de una manguera de material aislante, lo que provoca fricción entre los dos materiales y provoca una excitación eléctrica en las partículas de polvo. Para estos sistemas el material utilizado comúnmente es el teflón y la ventaja de estos sistemas es que no necesitan de un generador.

² BRASSO, Jorge ; Lussol Pinturas, Boletín N° 1- 2006

2.1.6. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA PINTURA ELECTROSTÁTICA

Tabla 2.4. Ventajas y desventajas de la pintura electrostática.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Evitar que se corra la pintura, ya sea por falta de presión o por la inexperiencia del operador	No se aplica en materiales cuyos espesores son mayores a 1" por el costo que representa en combustible, debemos decir que se le puede aplicar pero no resulta rentable aplicar este proceso de pintado
El metro cuadrado de pintado resulta un 40% más económico que con el pintado a soplete.	Al principio resulta costoso la implementación de todo el equipo necesario para pintar, ya que el horno y el equipo de pintado son caros
Permite que el terminado sea más rápido ya que los muebles pintados salgan secos del horno	Es limitado el pintado de estructuras cuyas dimensiones son grandes, ya que se requeriría un horno muy grande.
Se evita el riesgo de incendio	Los repuestos de los equipos que intervienen en el proceso de curado son caros.
Es polvo que se desperdicia puede ser reutilizado nuevamente	

2.2. HORNOS DE CURADO

2.2.1. INTRODUCCIÓN

En general, los hornos para procesos industriales son mecanismos que permiten transferir calor a diferentes productos. Estos productos pueden ser de distinta índole como: acero, aluminio, aleaciones metálicas, cerámica, polímeros y muchos otros innumerables productos.

En la industria, los hornos tienen distintas aplicaciones como pueden ser fundición de distintos materiales como aceros o vidrio. Por lo general este tipo de hornos funciona a temperaturas *muy altas* (mayores a 1200 °C). Entre otras aplicaciones se tiene, el precalentamiento para procesos de conformado como son rolado, forjado, laminado, doblado y extrusión. Los procesos mencionados trabajan a temperaturas denominadas *altas* (entre 1000 y 1250 °C). Para tratamientos térmicos y metalúrgicos como el recocido, revenido, nitrurado, normalizado, etc. se utilizan hornos que se denominados de *mediana temperatura* (entre 600 y 1000 °C). Finalmente existen hornos que en el mundo industrial se conocen como hornos de *baja temperatura* (temperaturas menores a 593 °C). Estos hornos son muy utilizados en procesos de secado, polimerización y otros cambios químicos.

Para los fines de este proyecto, se dará énfasis a los hornos de *baja temperatura*. Esto se debe a que el curado de la pintura electrostática es un proceso de polimerización que se da a una temperatura aproximada de 200 °C.

2.2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS HORNOS

A nivel industrial los hornos se pueden clasificar según distintos parámetros que serán citados a continuación:

2.2.2.1. Por su fuente de calor

Las fuentes de calor de los hornos por lo general pueden ser de dos tipos: de combustión y de conversión de energía eléctrica a calor. Los hornos que tienen fuentes de combustión por lo general son los más utilizados en la industria, y generalmente son más económicos que los hornos de conversión de energía eléctrica en calor. Por otro lado los hornos eléctricos muchas veces tienen ventajas sobre los hornos de combustión debido a que estos beneficios no pueden ser medidos en términos de costos.

2.2.2.2. Hornos Discontinuos y Continuos

Los hornos discontinuos se caracterizan por tener un punto máximo de temperatura al cual estarán sometidas las cargas. Estos hornos normalmente son cargados manualmente, pero también pueden ser cargados con la ayuda de robots. Luego de finalizar el proceso, la carga debe ser retirada del horno para que luego ingrese una carga nueva. Este tipo de hornos es útil y más económico para procesos de producción discontinua, pero no son de mucha utilidad para procesos de producción en serie o producción continua.

Los hornos continuos mueven el material mientras varía la temperatura. O sea, en los hornos continuos varía la temperatura en función del desplazamiento y en los hornos discontinuos la temperatura varía en función del tiempo. En los hornos continuos el material normalmente se mueve por medio de conveyores, bandas transportadoras o carros movidos por distintos sistemas de transmisión. Los hornos túneles se dividen por zonas en las cuales varía la temperatura. El número de zonas depende de la carga a tratar, del diseño del horno y de muchos otros factores, aunque generalmente los hornos continuos cuentan con cinco zonas de control.

2.2.2.3. Por el tipo de combustible

Antiguamente cambiaba el diseño de los hornos dependiendo del combustible. Por ejemplo, un horno a diesel tenía un diseño muy distinto al de

un horno a gas, sobre todo en su sistema de combustión. Actualmente, existen quemadores duales que pueden quemar dos tipos de combustible, principalmente gas o diesel. Existen algunos hornos que queman combustibles sólidos como el carbón o la leña, pero en la actualidad estos hornos casi no son utilizados en la industria por la gran cantidad de contaminantes que producen.

Los hornos calentados eléctricamente normalmente utilizan resistencias eléctricas o se calientan por medio de inducción. En estos hornos teóricamente no existen pérdidas de calor por medio de los gases de escape. Pero hay que tomar en cuenta que este tipo de hornos son muy costosos por el costo de la energía eléctrica. Además, este tipo de hornos muchas veces requieren de ventiladores para poder mover el fluido de trabajo que en muchas ocasiones es el aire. Este mismo tipo de trabajo puede ser sustituido por los gases de combustión.

Existen muchos otros tipos de calentamiento eléctrico o electrónico. Entre los más importantes métodos de calentamiento podemos citar procesos de calentamiento por arcos de plasma, láser, radiofrecuencias, microondas y calentamiento electromagnético.

2.2.2.4. Hornos por Recirculación

Los hornos de temperaturas medias y bajas (bajo 760 °C) normalmente utilizan sistemas de recirculación de gases. Esto ayuda a ahorrar energía y además permite uniformizar la temperatura en la totalidad del horno. La recirculación puede ser generada por medio de un ventilador.

2.2.2.5. De Fuego Directo o de Fuego Indirecto

Si la llama o los gases de combustión circulan sobre la carga del horno, entonces se puede decir que es un horno de fuego directo. Este tipo de hornos normalmente se utilizan cuando la carga necesita ser tratada a temperaturas muy altas o altas.

Para productos que pueden ser afectados por la llama o por los gases de combustión, se prefiere utilizar otros métodos de calentamiento como pueden ser los tubos radiantes o los intercambiadores de calor.

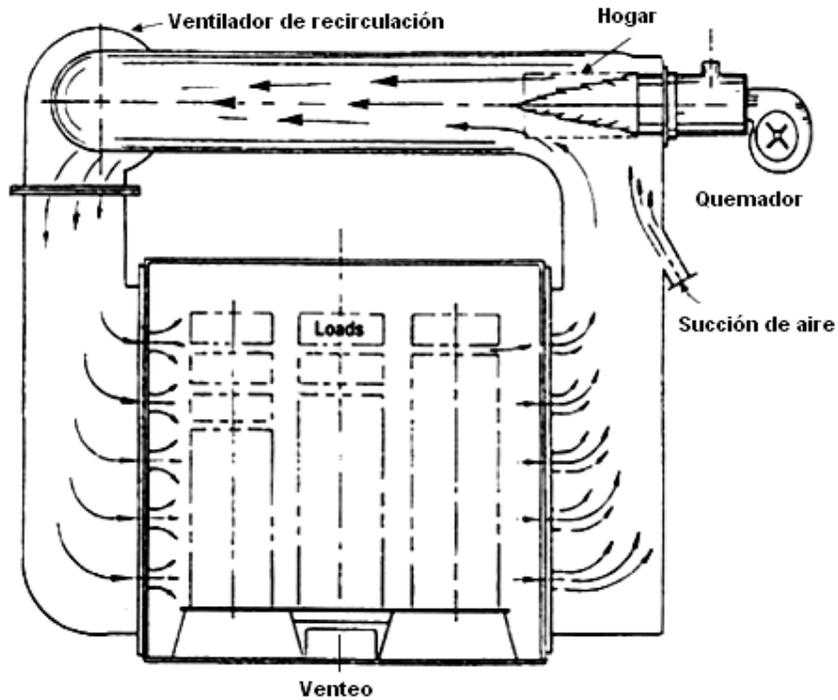


FIG. 2.8 Horno discontinuo con recirculación de aire

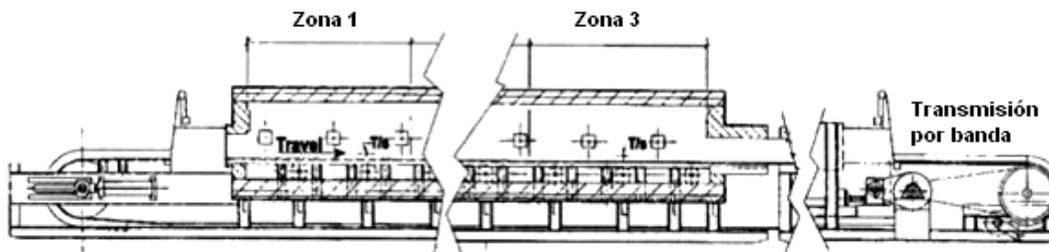


FIG. 2.9 Horno continuo con banda transportadora para tratamientos térmicos.

2.2.2.6. Por el uso del horno

Si se caracterizan los hornos industriales según su uso existe toda una extensa variedad de hornos tanto así, que tomaría mucho tiempo clasificarlos, pero entre los principales tipos de hornos se pueden nombrar los siguientes. *Hornos de calentamiento de lingotes*, que también pueden ser usados para calentar placas, usualmente en posición vertical. *Hornos de forja*, que usualmente son utilizados para calentar piezas completas previamente a un trabajo en forja o soldadura. Los *hornos ranurados para forja*, son similares a los hornos de forja, pero cuentan con una ranura para poder insertar el material a ser calentado. Muchas veces la ranura cumple con la función de escape de gases.

Los hornos también pueden ser nombrados en función del material que es calentado, así pueden ser nombrados; hornos para pernos o tornillos, hornos para cables, hornos de pintura, etc. Otra forma de nombrar hornos puede ser por su función, como por ejemplo: hornos de templado, hornos de fundición, hornos de recocido, nitrurado, etc.

2.2.2.7. Por la forma de recuperar calor

La recuperación de calor en hornos principalmente se enfoca a obtener energía a partir del “calor perdido”. Entre las principales aplicaciones de recuperar calor se tienen el precalentamiento de aire, el precalentamiento de combustible, el precalentamiento de la carga o también se puede precalentar agua para procesos productivos.

El aire precalentado de combustión puede ser calentado por *recuperadores* los cuales son simplemente intercambiadores de calor, o puede ser calentado por un proceso *regenerativo* el cual funciona por medio de un dispositivo que almacena el calor de los gases de escape en pequeñas masa de refractario o metal, cada uno de los cuales tiene una considerable superficie absorbidora de calor. Luego dichas masas son ubicadas en una corriente de aire frío para transmitir el calor que fue almacenado previamente. Los hornos equipados con

este tipo de dispositivos son conocidos normalmente como *hornos recuperativos* u *hornos regenerativos*.

2.3. EQUIPOS DE COMBUSTIÓN

2.3.1. INTRODUCCIÓN

Desde tiempos inmemorables, el hombre conocía el fuego. El único problema es que no sabía controlarlo, sólo lo concebía como incendios forestales o erupciones volcánicas.

El primer paso que dio el hombre para poder controlar el fuego fue aprender a encenderlo y luego aprender a apagarlo. Con el paso del tiempo el hombre comenzó a utilizar el fuego para diferentes actividades como cocinar sus alimentos o quemar piezas cerámicas. El fuego se generaba principalmente a partir de la madera o del carbón. Muchos años tuvieron que pasar para que el hombre aprenda a controlar los procesos de combustión de combustibles líquidos o gaseosos. Además, se tuvo que desarrollar tecnología para aumentar la eficiencia de estos procesos y buscar la mejor alternativa para transferir el calor desde la llama hacia la materia prima. Por ello se han desarrollado importantes creaciones como los quemadores y las cámaras de combustión.

A continuación se explicará detalladamente y se intentará hacer un análisis de los equipos de combustión.

2.3.2. FUNCIONES DE LOS EQUIPOS DE COMBUSTION

Entre las principales funciones que tienen los equipos de combustión podemos citar las siguientes:

- Posicionar a la llama donde existe una liberación de calor útil.
- Iniciar y mantener la ignición

- Mezclar adecuadamente el aire y el combustible
- Volatilizar combustibles sólidos y líquidos
- Dosificar el combustible en función de la masa de aire
- Suministrar aire y combustible en las proporciones correctas y facilitar los cinco procesos anteriores con seguridad.³

2.3.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS QUEMADORES

Las variables que caracterizan a un quemador de otro son las siguientes:

- Forma de la llama
- Volumen de combustión
- Estabilidad
- Velocidad de llama

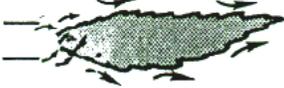
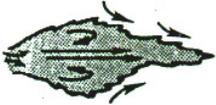
2.3.3.1. Forma de la Llama

Las variables que afectan a la forma de llama en un quemador pueden ser la presión de mezcla o la cantidad de aire de combustión. Si la presión de mezcla es mayor, entonces la llama se alarga. Pero si se aumenta la cantidad de aire primario o aire de combustión la llama se vuelve más corta. También es necesario tomar en cuenta que el espesor de la llama se puede reducir con condiciones de presión ambiental altas y también con altas velocidades de combustión.

Existen otras variables que son mucho más determinantes con la geometría de la llama. Normalmente estas variables están en función del diseño del quemador, el cual determina las velocidades relativas de las corrientes de aire y combustible. Cuando existe suficiente turbulencia, lo que redundaría en una buena mezcla aire/combustible genera una llama corta y gruesa, similar a las de la figuras B o C. Por el contrario, las velocidades bajas dan como resultado llamas largas y esbeltas. La siguiente figura ilustra los principales tipos de llama que existen.

³ REED, Richard; North American Combustion Handbook; Volume II; Third Edition; United States 1995

Tabla 2.5. Tipos de Llama en Quemadores

TIPO DE LLAMA	GAS	DIESEL
A. Tipo Jet		
B. Cabeza de Pin		
C. De bola		
D. Cónica		
E. Larga, luminosa, alzada		
F. Larga, luminosa, tipo manguera		
G. Alta velocidad		

2.3.3.2. Volumen de combustión

El volumen de combustión puede ser definido como el espacio que ocupan el combustible y los productos intermedios durante el proceso de combustión. El volumen de combustión varía considerablemente en función del diseño del quemador, de las presiones y las velocidades de las corrientes, del tipo de combustible y de la aplicación que se le dé al quemador. Por ejemplo, existen quemadores a gas que tienen altísimas presiones de trabajo y pueden generar hasta cuarenta millones de Btu/hr pie³. Por el contrario existen quemadores que pueden ser usados en calderas, cuyo diseño genera de 20000 a 40000 Btu/hr pie³.

2.3.3.3. Estabilidad

La estabilidad es una característica de los quemadores que tiene una importancia muy alta principalmente por seguridad. Un quemador estable es un quemador que mantiene la ignición incluso en condiciones frías, a lo largo de todo el rango de presiones y relaciones aire combustible comúnmente usadas. Si un quemador cuenta con un piloto no necesariamente puede ser considerado como estable.

Un problema que ha molestado por años a los usuarios de quemadores ha sido la inestabilidad de los quemadores en cámaras de combustión frías y estrechas. En muchos casos, la única forma de elevar la temperatura de un horno era la de operar el quemador, a bajas potencias o con una mezcla rica de aire combustible hasta que el horno alcanzaba una temperatura cercana a los 1600 °F sobre los cuales la estabilidad era sostenible a la máxima potencia del quemador.

En cámaras de combustión estrechas que no contienen más oxígeno que el que provee la conexión interna del quemador, una combustión rica al poco tiempo consume todo el oxígeno disponible en la cámara pero una llama estable debe continuar con la combustión a pesar de la atmósfera que le rodea.⁴

Con el objetivo de mantener la ignición en cámaras de combustión frías se desarrollaron quemadores de llama estable los cuales no necesitaban apoyo más que los de sus propias boquillas refractarias. A pesar de esto el problema persistía en cámaras de combustión frías y estrechas incluso cuando los quemadores trabajaban con relaciones aire combustible estequiométricas. El problema se basaba principalmente en que los productos de la combustión volvían a recircular dentro de la boquilla del quemador rodeando la raíz de la llama, generando una atmósfera fría y escasa en oxígeno.

⁴ REED, Richard; North American Combustion Handbook; Volume II; Third Edition; United States 1995

Luego de un rediseño de los quemadores se logró llenar toda la boquilla refractaria con mezcla aire combustible y se evitó que recirculen dentro de la boquilla los productos de la combustión. Con esto se logró eliminar el problema de la inestabilidad en las cámaras de combustión frías y estrechas.

2.3.3.4. Velocidad de llama

Los quemadores de alta velocidad permiten uniformizar la temperatura en los hornos y además mejoran la transferencia de calor por convección. De hecho, las altas velocidades de llama facilitan la recirculación de aire caliente en los hornos lo que beneficia a la eficiencia energética del horno permitiendo ahorrar en gastos energéticos. Otro uso de los quemadores de alta velocidad es el de alcanzar y envolver a las cargas con aire caliente a altas velocidades, con esto se reduce el tiempo de calentamiento de la carga, sobre todo para cargas de grandes espesores, ya que la radiación no es suficiente para calentar en centro del material.

2.3.4. COMPONENTES DE LOS QUEMADORES

Los componentes principales de un quemador son los que se muestran en la siguiente figura.

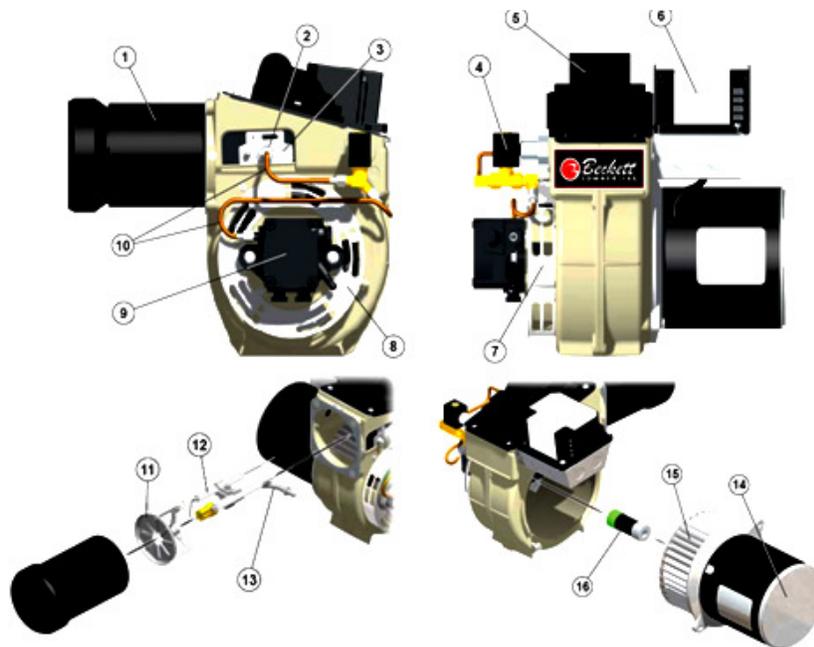


FIG. 2.10 Componentes principales de un quemador

Tabla 2.6. Componentes de un quemador

ITEM	DESCRIPCIÓN	ITEM	DESCRIPCIÓN
1	Tubo de aire	10	Cañerías de combustible
2	Acople	11	Cabeza del quemador
3	Placa de ensamblaje	12	Electrodo
4	Válvula solenoide de bloqueo de combustible	13	Boquilla
5	Ignictor	14	Motor
6	Controlador	15	Rodete del soplador
7	Succión de aire	16	Acoplamiento
8	Obturador de aire	17	Brida
9	Bomba de combustible		

2.3.5. QUEMADORES A GAS

Los quemadores de gas industrial pueden ser clasificados en función de la forma que en que se mezcla el gas con el aire primario. Estos quemadores pueden ser clasificados de la siguiente manera:

- Quemadores de pre mezcla,
- Quemadores de mezcla en la boquilla y
- Quemadores de mezcla retardada.

Quemadores de pre mezcla

En los sistemas de pre mezcla el aire se mezcla con el combustible aguas debajo de la boquilla del quemador con la ayuda de dispositivos conocidos como mezcladores. Estos mezcladores pueden ser mecánicos, de aspirador o inspiradores. En teoría si la velocidad de la mezcla iguala a la velocidad de la llama, entonces la llama se mantendrá estacionaria en el punto donde la ignición sea aplicada. Para estos casos es necesario utilizar una boquilla como estabilizador de flama, si la llama avanza mucho dentro de la

boquilla como resultado de una momentánea reducción en la velocidad de la mezcla la boquilla tiende ahogar a la llama para evitar el retroceso de llama.

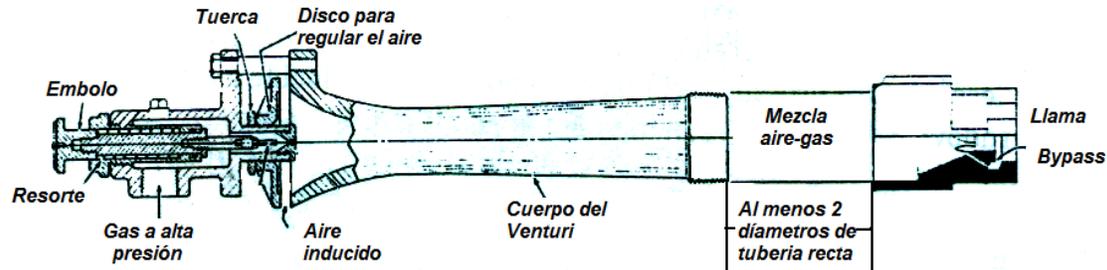


FIG. 2.11. Quemador de pre-mezcla por inspiración

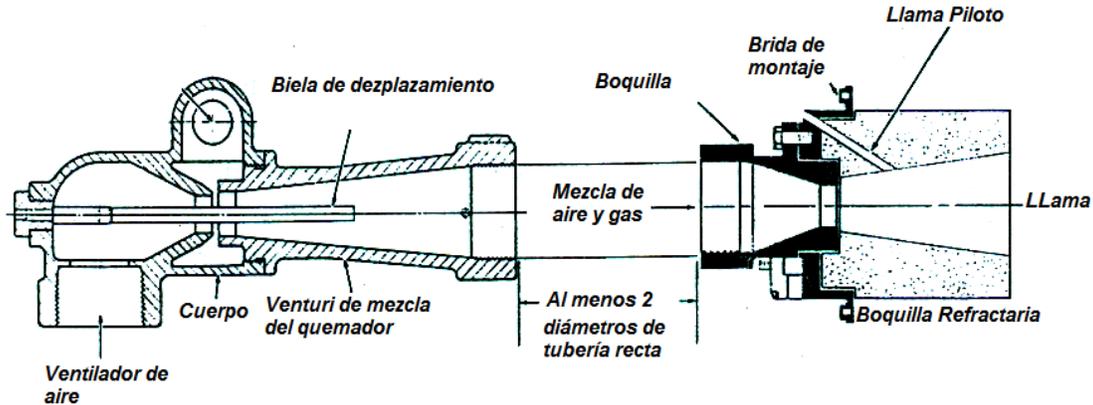


FIG. 2.12. Quemador de pre-mezcla por aspiración.

Quemadores de mezcla en la boquilla

Como su nombre lo dice este tipo de quemadores mezclan al aire y al combustible dentro de la boquilla. En este tipo de boquillas se han diseñado dos orificios que permiten mezclar los dos fluidos justo en el momento en que entran a la boquilla. Los quemadores de mezcla en la boquilla tienen algunas ventajas entre las cuales podemos mencionar las siguientes.

- No existe retroceso de llama ya que el aire y el combustible no están pre mezclados. Esto no solamente colabora con la estabilidad sino que también reduce el riesgo de explosión. Cuando existen sistemas de pre-

mezcla como tuberías o múltiples de cédula 40 o menores puede existir ruptura en diámetros de 4" o mayores.

- Se pueden manejar una gran cantidad de relaciones aire/combustible a diferencia de los quemadores de pre-mezcla que deben trabajar dentro de los rangos de inflamabilidad del combustible.
- Existe una gran flexibilidad en cuanto a los diseños de los quemadores ya que este tipo de quemadores pueden trabajar con varios combustibles desarrollando una gran variedad de geometrías de llama, las cuales fueron indicadas en la *Fig. 2.9*

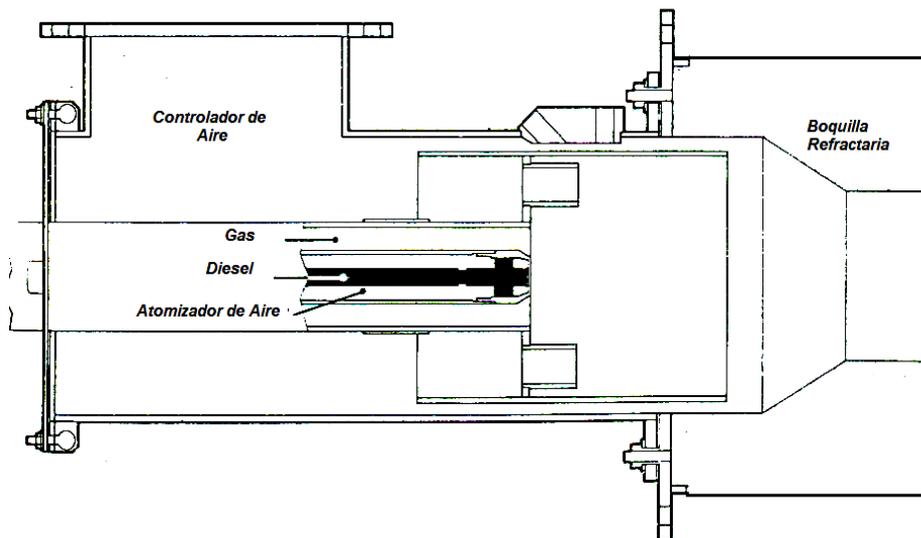


FIG. 2.13 Quemador de alta velocidad dual

Quemadores de mezcla retardada.

Este tipo de quemadores pueden ser de utilidad en el caso de necesitar llamas radiantes de larga longitud. Este tipo de quemadores son frecuentemente usados en hornos extremadamente largos o anchos donde existen distribuciones de calor muy pobres. Las llamas luminosas tienen una considerable longitud y pueden llenar grandes espacios de combustión con

pequeñas variaciones de temperatura en toda su longitud. La uniformidad de temperatura en todo el espacio de combustión permite tener una mayor efectividad en el área central del horno.

Las llamas largas pueden ser producidas si la mezcla aire combustible es muy baja, por lo tanto ambos fluidos tienen que viajar distancias considerables hasta completar la combustión.

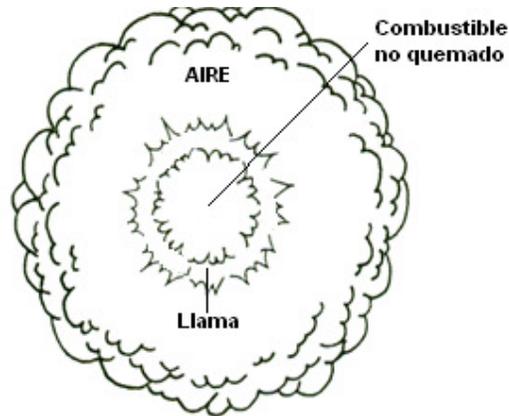


FIG. 2.14 Sección de una llama de mezcla retardada

2.3.6. QUEMADORES PARA COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

Los gasóleos como el diesel y otros combustibles líquidos tienen que ser vaporizados antes de combustionarse. En la antigüedad se utilizaban métodos de vaporización por medio de calor tales como las estufas de gasolina o los quemadores de kerosene, donde el combustible era vaporizado por medio de una placa caliente. Actualmente los quemadores para capacidades industriales atomizan y vaporizan el combustible. El primer paso es el de atomización donde se utiliza un efecto Vénturi para pulverizar al fluido en millones de gotas que tiene diámetros de 10 a 1000 micrones.

Los requerimientos para una correcta vaporización después de la atomización son los siguientes:

- Un gran volumen de aire tiene que estar íntimamente mezclado con las partículas de combustible.

- El aire tiene que ser turbulento y tener altas velocidades para que existe transferencia de masa desde la superficie de las partículas de combustible.
- El calor de la llama debe ser transferido a la mezcla. Este último requerimiento es la función de la boquilla refractaria del quemador.⁵

Existen diferentes formas de atomizar el combustible. A continuación serán citados los principales mecanismos de atomización.

Quemadores con aire de atomización a baja presión.

Este tipo de sistemas de atomización mezclan los dos fluidos y utilizan aire entre 1 a 2 psi. Este tipo de atomización puede ser considerado mediano y utilizan alrededor del 10% del requerimiento total de aire para atomizar el combustible. Los atomizadores de baja presión son usualmente diseñados para manejar combustible con viscosidades de 100 SSU. Las presiones del combustible en el quemador se encuentran entre 1 y 5 psi regularmente.

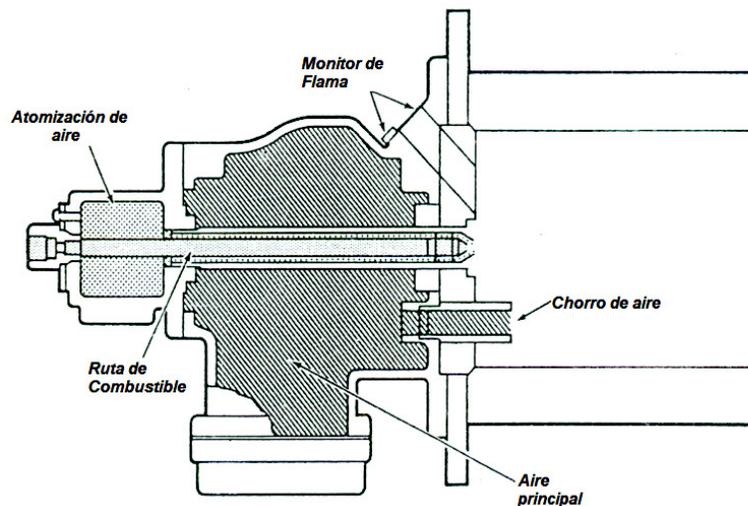


FIG. 2.15 Esquema de un quemador con aire de atomización de baja presión.

⁵ REED, Richard; North American Combustion Handbook; Volume II; Third Edition; United States 1995

Quemadores con aire de atomización a alta presión.

Son atomizadores de dos fluidos que utilizan vapor o aire comprimido para pulverizar el combustible. Las altas velocidades del aire ayudan a obtener una vaporización muy rápida. Este tipo de quemadores están en capacidad de atomizar combustibles livianos y pesados, también son usados para incinerar líquidos. Las presiones de vapor o aire comprimido se encuentran en un rango de 5 a 150 psi. En el caso de utilizar vapor, el consumo podría variar de 1 a 5 libras por galón de combustible y el consumo de aire puede variar de 22 a 100 pies cúbicos de aire a presión estándar por galón. Todos estos factores pueden variar dependiendo del tamaño del atomizador y de la viscosidad del combustible.

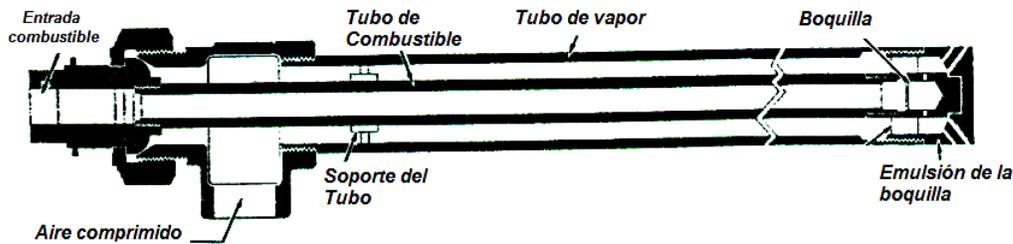


FIG. 2.16 Atomizador de alta presión.

Quemadores con atomización de alta presión de combustible

Este tipo de atomizadores trabajan con un solo fluido y son conocidos también como atomizadores mecánicos. Su mecanismo de funcionamiento se basa en el principio de expandir el fluido a la salida de un pequeño orificio, esto permite que el fluido se pulverice en pequeñas gotas. Estos mecanismos están diseñados para operar a 100 psi con viscosidades menores a 50 SSU.

Quemadores de atomización centrífuga

Estos quemadores utilizan la fuerza centrífuga para pulverizar el combustible. Esto forma una geometría cónica del líquido que permite pulverizarlo rápidamente. Este proceso puede trabajar con bajas presiones de aire, produciendo geometrías cónicas muy amplias, pero si la presión de trabajo es

alta entonces el ángulo del cono se ve reducido. Este tipo de quemadores pueden ser utilizados para calderos pero no son recomendados para hornos de altas temperaturas.

2.4. INTERCAMBIADORES DE CALOR

2.4.1. CONCEPTOS BASICOS

El intercambio de calor entre fluidos a distintas temperaturas es esencial en varios procesos como son:

- Calefacción
- Aire acondicionado
- Procesos industriales
- Procesos químicos

En los procesos donde se requiere que exista dicho intercambio de calor, pero evitando que los fluidos se mezclen por alguna razón; se utilizan dispositivos conocidos como intercambiadores de calor. En los intercambiadores de calor, la transferencia ocurre normalmente por fenómenos de conducción y de convección térmica, por ello es muy importante tomar en cuenta estas variables en este tipo de dispositivos.

Los intercambiadores de calor han adquirido gran importancia ante la necesidad de ahorrar energía y disponer de equipos óptimos no sólo en función de su diseño térmico y del rendimiento económico de la instalación, sino también en función de otros factores como la eficiencia energética del sistema, la disponibilidad y los tipos de materiales a utilizar en el intercambiador, y finalmente el costo del equipo.

Al momento de diseñar un intercambiador de calor es importante tomar en cuenta la gradiente de temperatura que existe entre los fluidos de trabajo. Mientras esta gradiente sea menor, más grande deberá ser el intercambiador de calor y por lo tanto su costo. Por ello, es muy importante determinar de

forma precisa estas variables para lograr un diseño óptimo tanto térmica y económicamente.

2.4.2. TIPOS DE INTERCAMBIADORES DE CALOR

Por la gran cantidad de aplicaciones que tienen los intercambiadores de calor, sobre todo en la industria, se han diseñado varios tipos de intercambiadores de calor, pero la principal variación de un tipo de intercambiador a otro, radica en el sentido de flujo de estos.

2.4.2.1. Intercambiadores de Flujo Paralelo

Los intercambiadores de calor de flujo paralelo son poco utilizados por su baja eficiencia energética, ya que en estos intercambiadores la temperatura de salida del fluido frío nunca puede ser igual a la temperatura de salida del fluido caliente. La curva de temperaturas de este tipo de intercambiadores tiene la siguiente forma:

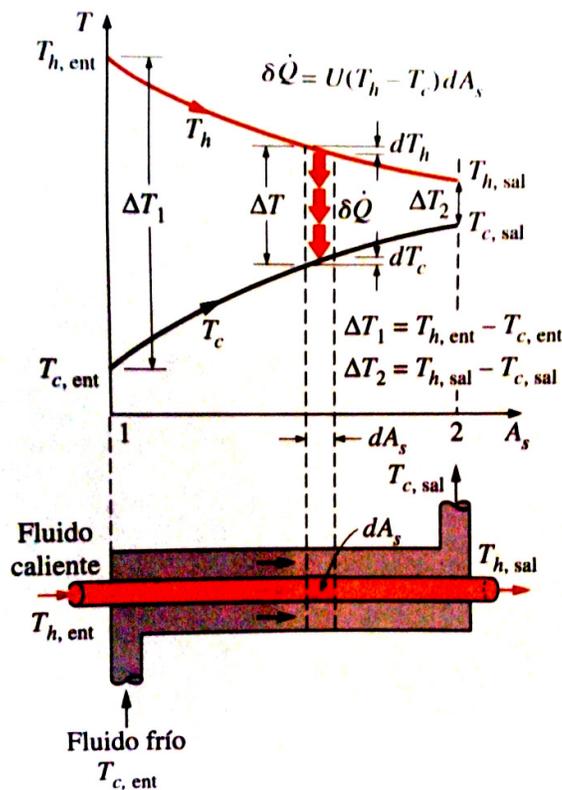


FIG. 2.17 Curva de Temperaturas en Flujo Paralelo

El intercambiador más sencillo es el intercambiador de tubo doble de flujo paralelo, el cual se caracteriza por tener dos tubos concéntricos en los cuales el sentido de los fluidos es el mismo. El problema de este tipo de intercambiador es que no es funcional ni práctico por su baja eficiencia energética.

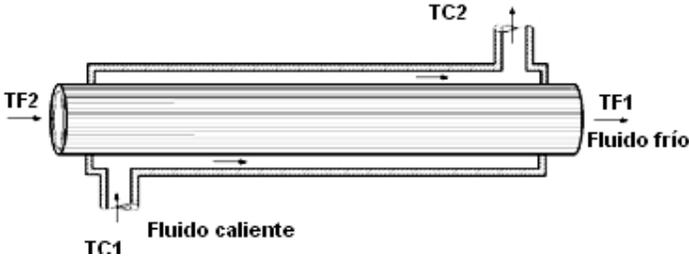


FIG. 2.18 Intercambiador de tubo doble en Flujo Paralelo

Otro tipo de intercambiador de calor en flujo paralelo se conoce como intercambiador de tubos múltiples con flujo paralelo. Este tipo de intercambiador es más útil y compacto que el intercambiador de calor de tubo doble por su mayor área de transferencia de calor. Por concepto de la convección y la conducción térmica, el flujo de calor está directamente relacionado con la magnitud del área de transferencia de calor. Esto demuestra que es mucho más eficiente utilizar intercambiadores de calor de tubos múltiples en procesos de transferencia de calor.

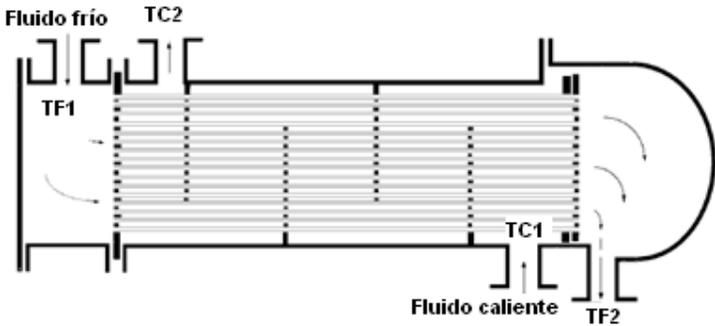


FIG. 2.19 Intercambiador multitubos en Flujo Paralelo

2.4.2.2. Intercambiadores de Flujo Contracorriente

En esta clase de intercambiadores de calor, los fluidos frío y caliente tienen direcciones opuestas. Esto permite que la temperatura de salida del fluido frío pueda ser en algunos casos mayor a la temperatura de salida del fluido caliente. Esto se puede demostrar fácilmente con la curva de temperaturas de un intercambiador de calor en contraflujo.

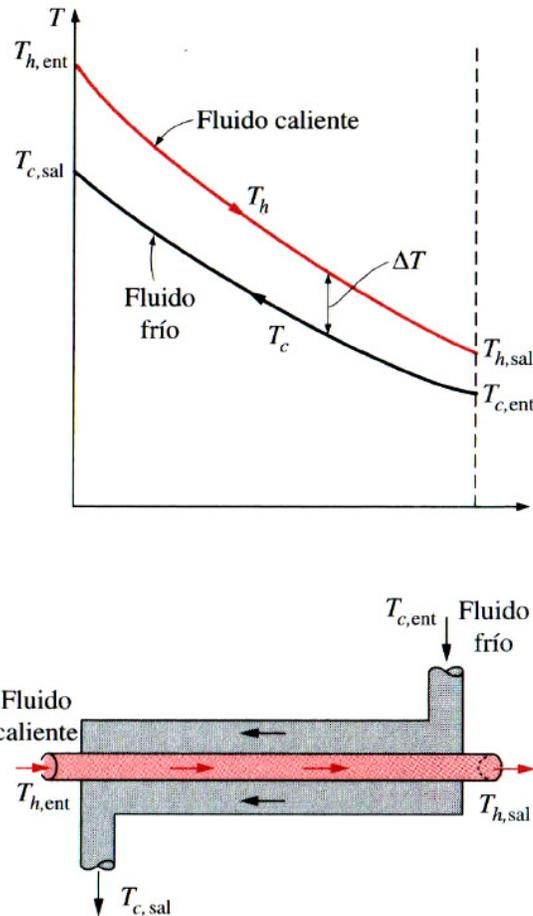


FIG. 2.20 Curva de Temperaturas en Flujo Contracorriente

Los intercambiadores en contra flujo son mucho más eficientes que los intercambiadores de flujo paralelo por la gradiente de temperaturas que son capaces de generar. Este tipo de intercambiadores de calor es mucho más utilizado en la industria y normalmente utilizan deflectores, lo que permite aumentar la tasa de flujo de calor debido a la turbulencia que se genera en la coraza.

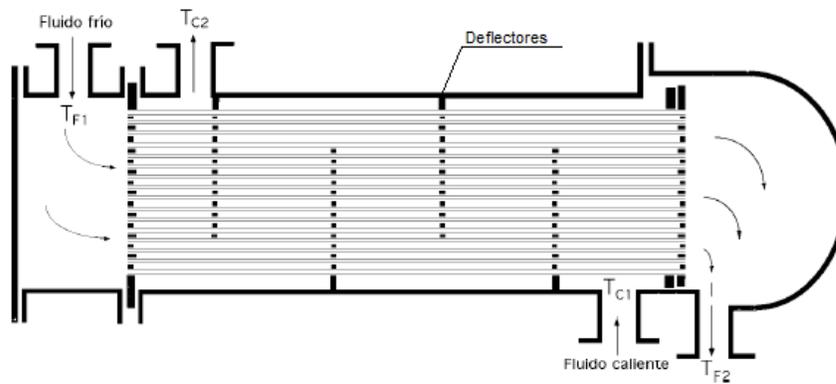


FIG. 2.21 Intercambiador multitubos en Flujo Contracorriente.

2.4.2.3. Intercambiadores de Flujo Cruzado

Los intercambiadores de calor de flujo cruzado tienen mucha utilidad para aplicaciones donde se calientan gases. Si el flujo de este tipo de intercambiadores es direccionado por aletas, se conoce como flujo no mezclado. Por el contrario, si el flujo no es direccionado, se conoce como flujo mezclado.

La diferencia media logarítmica de temperaturas (LMTD) en este tipo de intercambiadores puede ser igualada a la (LMTD) en contracorriente multiplicada por un factor de corrección.

Los intercambiadores de calor de flujo cruzado son muy utilizados en aplicaciones de aire acondicionado, hornos de pintura automotriz y otras aplicaciones de gases a temperaturas relativamente bajas.

Cuando se diseña este tipo de intercambiadores, es importante igualar en el diseño los coeficientes internos y externos de transferencia de calor para evitar los problemas con el fin de evitar una caída excesiva en la temperatura global del sistema, ya que las resistencias térmicas de los fluidos pueden variar mucho.

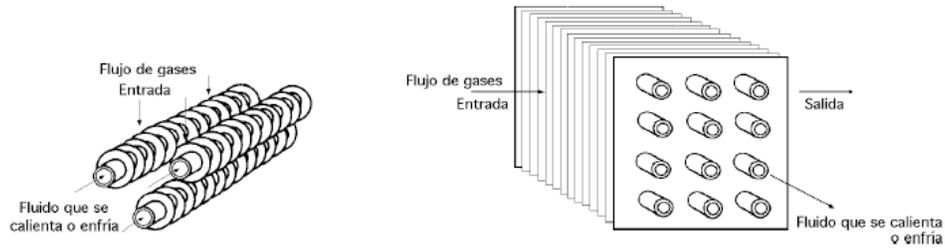


FIG. 2.22 Intercambiador de Flujo Cruzado

2.4.2.4. Coeficiente Global de Transferencia de Calor

En el proceso de intercambio de calor uno de los factores más importantes a determinar es el coeficiente global de transferencia de calor. Por principio de la transferencia de calor el coeficiente global de transferencia de calor es igual al inverso de la suma de las resistencias térmicas multiplicadas por el área de transferencia de calor.

Conociendo que:

$$Ec. (2.1) \text{ Área interior de un tubo}$$

$$Ec. (2.2) \text{ Área exterior de un tubo}$$

El coeficiente global de transferencia de calor para un intercambiador de calor de tubos queda definido por la siguiente ecuación de forma general.

$$UA = \frac{1}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_s}{r_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_s A_s}} \quad Ec. (2.3)$$

Si se toma en cuenta el área superficial de la pared exterior de los tubos, el coeficiente global de transferencia de calor responde a la siguiente ecuación:

$$Ue = \frac{1}{\frac{A_e}{h_i A_i} + \frac{A_e}{2\pi k L} \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right) + \frac{1}{h_e}} \quad \text{Ec. (2.4)}$$

Simplificando la ecuación se obtiene la siguiente expresión

$$Ue = \frac{1}{\frac{r_e}{h_i r_i} + \frac{r_e}{k} \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right) + \frac{1}{h_e}} \quad \text{Ec. (2.5)}$$

Donde:

- re = Radio externo de los tubos
- ri = Radio interno de los tubos
- hi = Coeficiente de transferencia de calor por convección interno
- he = Coeficiente de transferencia de calor externo
- k = Conductividad térmica del material de los tubos
- Ue = Coeficiente global de transferencia de calor

2.4.2.5. Diferencia Media Logarítmica de Temperatura

La diferencia media logarítmica de temperaturas o LMTD puede ser definida como un promedio en la diferencia de temperaturas que existe entre el fluido caliente y el fluido frío que pasan por el intercambiador de calor. Por concepto básico de la transferencia de calor, mientras mayor sea la diferencia de temperaturas, el flujo de calor transferido es mayor.

La LMTD está definida por la siguiente ecuación:

$$LMTD = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad \text{Ec. (2.6)}$$

Es importante tener el conocimiento de esta magnitud al momento de diseñar un intercambiador de calor ya que la LMTD define de forma directa la cantidad de calor que va a ser transferida en el intercambiador ya que la ecuación de transferencia de calor en un intercambiador es la siguiente:

$$Q = U * A * LMTD \quad \text{Ec. (2.7)}$$

Donde:

- Q = Flujo de calor en el intercambiador
- U = Coeficiente global de transferencia de calor
- A = Área de transferencia de calor
- LMTD = Diferencia media logarítmica de temperaturas

2.5. VENTILADORES

Un ventilador es una máquina rotativa que se utiliza para incrementar la presión del aire o de un gas con el fin de forzar al aire a través de ductos, sistemas de ventilación, calefacción.

Las presiones que se tienen en un ventilador son las siguientes.

- *Presión Estática*.- Es la diferencia entre la presión estática de salida y la presión total a la entrada. Esta presión puede ser positiva o negativa. Es una presión debida a la compresión.
- *Presión Dinámica*.- Es la correspondiente al promedio de las velocidades a la salida del ventilador. Es una presión debida al movimiento del impulsor.
- *Presión Total*.- Es la suma de la presión estática y dinámica medida en un punto.

Los ventiladores se clasifican en:

- Ventiladores Axiales
- Ventiladores Centrífugos

Ventiladores Axiales

Son aquellos que tienen la entrada y la salida de aire en el mismo eje. Su característica principal es que trabajan a bajas presiones pero son usados para mover grandes caudales de aire.

Ventiladores de Propulsión

Los ventiladores de propulsión operan a presiones estáticas de cero, y tienen un funcionamiento casi axial, toman aire de un lado y lo descargan del otro lado. Son comúnmente usados para brindar ventilación en viviendas y espacios de trabajo con el fin de brindar comodidades. Las velocidades de operación de estos ventiladores están desde las 600 a 1750 rpm, por lo que utilizan motores eléctricos.

Ventiladores con Envolvente

Los ventiladores con envolvente son muy parecidos a los ventiladores de propulsión la característica que marca la diferencia entre estos dos es que los ventiladores de envolvente están montados dentro de un ducto cilíndrico. Este tipo de ventiladores trabajan con presiones estáticas de hasta 1.5 pulg de H₂O

Impulsores.- Tienen entrada libre y salida entubada.

Extractores.- Tienen entrada entubada y salida libre.

Impulsores Extractores.- Tienen entrada y salida entubada.

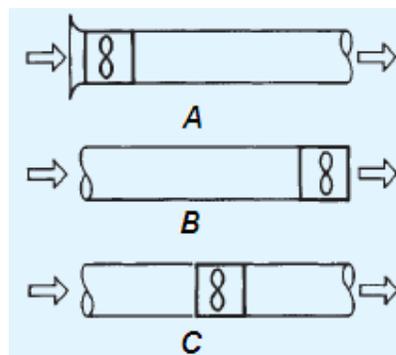


FIG. 2.23 Ventiladores con envolvente

Ventiladores Murales

A este tipo de ventiladores se los conoce como extractores, son utilizados en el campo de la ventilación.

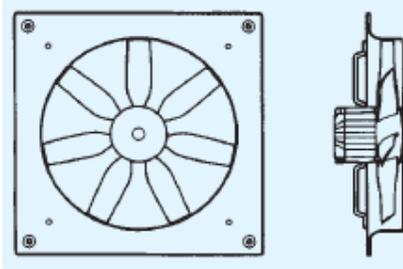


FIG. 2.24 Ventiladores murales

Ventiladores Centrífugos

Es muy fácil de reconocer que se trata de un ventilador centrífugo, ya que la entrada y la salida de aire forman un ángulo de 90°.

Los ventiladores centrífugos toman aire por el centro del rotor, este es lanzado hacia fuera por las aspas generando energía cinética. El aire expulsado por las aspas pasa por la voluta o carcasa del ventilador, convirtiendo la energía cinética en una presión de gas aumentada la que finalmente es entregada a los ductos.

Los ventiladores centrífugos pueden tener diferentes rodetes o impulsores, entre estos tenemos:

- Impulsores hacia delante (a),
- Impulsores hacia atrás (b)
- Impulsores radiales.(c)

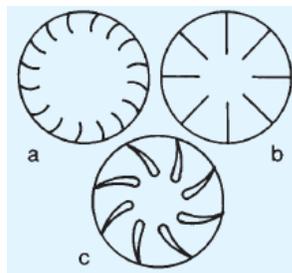


FIG. 2.25 Ventiladores centrífugos

Leyes de los Ventiladores

Los ventiladores normalmente vienen con valores de potencia, caudal y presión que han sido previamente ensayados y medidos en laboratorio. En el caso de que se desee cambiar estas condiciones, no siempre es práctico realizar un nuevo ensayo. Al considerar al aire a baja presión (menor a 3 kPa) se pueden utilizar ecuaciones de la mecánica de fluidos que nos permiten obtener una solución a este problema con una precisión suficiente para las aplicaciones de ingeniería. Estas ecuaciones se conocen como leyes de los ventiladores y cada ley está en función de la variación de uno o más parámetros

Variación de la velocidad de giro

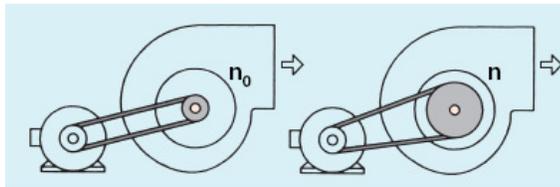


FIG. 2.26 Variación de la velocidad de giro

Caudal

$$Q = \frac{Q_0 n}{n_0} \quad \text{Ec. (2.8)}$$

Presión

$$P = P_0 \left(\frac{n}{n_0} \right)^2 \quad \text{Ec. (2.9)}$$

Potencia

$$Pot = Pot_0 \left(\frac{n}{n_0} \right)^3 \quad \text{Ec. (2.10)}$$

Nivel Sonoro

$$Lw = Lw_0 + 50 \log \left(\frac{n}{n_0} \right) \quad \text{Ec. (2.11)}$$

Donde:

Q = Caudal

Q_o = Caudal nominal

n = Número de revoluciones

n_o = Número de revoluciones nominal

P = Presión

P_o = Presión nominal

Pot = Potencia

Pot_o = Potencia nominal

Lw = Nivel sonoro

Lw_o = Nivel sonoro nominal

VARIACIÓN DE LA DENSIDAD

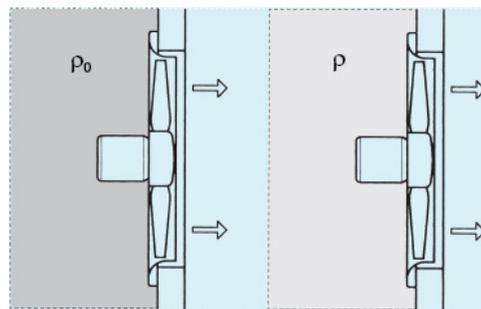


FIG. 2.27 Variación de la densidad

Caudal

$$Q = Q_o \quad \text{Ec. (2.12)}$$

Presión

$$P = P_o \left(\frac{\rho}{\rho_o} \right) \quad \text{Ec. (2.13)}$$

Potencia

$$Pot = Pot_o \left(\frac{\rho}{\rho_o} \right) \quad \text{Ec. (2.14)}$$

Nivel Sonoro

$$Lw = Lw_o + 20 \log \left(\frac{\rho}{\rho_o} \right) \quad \text{Ec. (2.15)}$$

Donde:

Q = Caudal

Q_o = Caudal nominal

ρ = Densidad del aire

ρ_o = Densidad del aire a condiciones normales

P = Presión

Lw_o = Nivel sonoro nominal

P_o = Presión nominal

Pot = Potencia

Pot_o = Potencia nominal

Lw = Nivel sonoro

VARIACION DE LAS PRESTACIONES

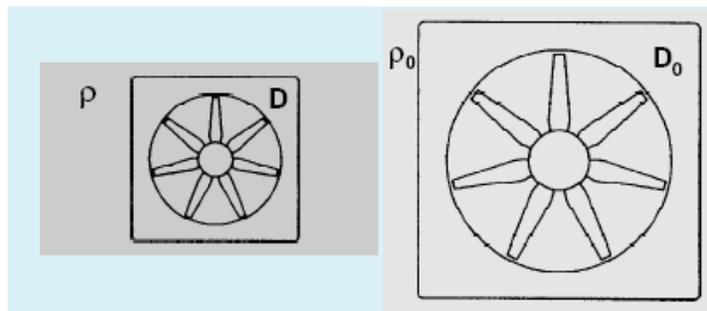


FIG. 2.28 Variación de la densidad y el diámetro

Diámetro

$$D = D_o \left(\frac{Q}{Q_o}\right)^{1/2} \left(\frac{P}{P_o}\right)^{1/4} \left(\frac{\rho}{\rho_o}\right)^{1/4} \quad \text{Ec. (2.20)}$$

Potencia

$$Pot = Pot_o \left(\frac{Q}{Q_o}\right) \left(\frac{P}{P_o}\right) \quad \text{Ec. (2.21)}$$

Velocidad de Giro

$$n = n_o \left(\frac{Q_o}{Q}\right)^{1/2} \left(\frac{P}{P_o}\right)^{3/4} \left(\frac{\rho_o}{\rho}\right)^{3/4} \quad \text{Ec. (2.22)}$$

Nivel Sonoro

$$Lw = Lw_o + 10 \log \left(\frac{Q}{Q_o}\right) + 20 \log \left(\frac{P}{P_o}\right) \quad \text{Ec. (2.23)}$$

Donde:

Q = Caudal

Pot = Potencia

Q_0 = Caudal nominal

Pot_0 = Potencia nominal

ρ = Densidad del aire

Lw = Nivel sonoro

ρ_0 = Densidad del aire a condiciones normales

P = Presión

Lw_0 = Nivel sonoro nominal

P_0 = Presión nomina

n = Número de revoluciones

n_0 = Número de revoluciones nominal

2.6. CHIMENEAS

Las chimeneas son muy importantes en los hornos y generadores de vapor, ya que a través de ella se expulsa los gases de combustión a la atmósfera.

Las funciones principales que tienen las chimeneas son las siguientes:

- Permite reducir gastos de energía al momento de realizar la evacuación de gases
- Evitar que los gases de combustión se dispersen por los alrededores de las instalaciones, para de esta manera evitar afecciones respiratorias al personal de trabajo o a las familias que colinden cerca de ella.

Es evidente que una chimenea alta evita concentración de gases tóxicos cerca del suelo, pero es necesario regirse a las Normas Ambientales Sanitarias de cada país para conocer la concentración máxima de gases tóxicos cerca del suelo.

El principio de funcionamiento de las chimeneas se basa en la diferencia de densidades que tiene el aire caliente producto de la combustión y el aire de la atmosférico, ya que mientras más caliente sea el aire será menos denso. Esta diferencia de densidades provoca una diferencia de presiones entre la base de la chimenea y la atmosférica.

$$\Delta p_{ch} = H * g * (\rho_{air} - \rho_g) \quad Ec. (2.24)$$

Donde:

Hg = Altura de la chimenea

ρ_{air}, ρ_g = Densidad del aire, densidad de los gases de combustión

g = Aceleración de la gravedad

A mayor temperatura y altura de la chimenea, será mayor la diferencia de presión. Es necesario que para el cálculo de las chimeneas se realice un cálculo de pérdidas de presión desde el horno hasta el tope de la chimenea. La experiencia demuestra que conforme pasa el tiempo las pérdidas de presión aumentan debido a que en los ductos se acumulan cenizas, estas pérdidas van del 20 a 30%.

La altura de la chimenea se calcula de la siguiente manera:

$$H = \frac{\Delta p + \zeta \frac{\omega_{os}^2 \rho_o}{2} (1 + \beta t_s)}{g \left(\frac{\rho_{oar}}{1 + \beta t_{ar}} - \frac{\rho_{og}}{1 + \beta t_g} \right) - \frac{\lambda}{2 D_s} \frac{\omega_{os}^2 \rho_{og}}{2} (1 + \beta t_g)} \quad Ec. (2.25)$$

Donde:

ζ = Coeficiente de resistencia localizada en la salida de la chimenea normalmente es de 1.06

ω_{os} = Velocidad de los gases a una temperatura de 0 °C en la salida de la chimenea, en m/s

$\rho_{og}; \rho_{oar}$ = Densidad de los gases a una temperatura de 0 °C, en Kg/m³

t_s = Temperatura de los gases a la salida de la chimenea, en °C

t_g = Temperatura media de los gases por la altura de la chimenea, en °C.

t_{ar} = Temperatura ambiente, en °C

λ = Coeficiente de fricción en la pared interna de la chimenea.

D_s = Diámetro de la salida de la chimenea, en m.

La temperatura de los gases a la salida de la chimenea t_s se calcula con la siguiente ecuación:

$$t_s = t_{base} - H * \Delta t \quad Ec. (2.26)$$

Donde:

t_{base} = Temperatura de los gases en la base de la chimenea, °C

Δt = Caída de temperatura por metro de longitud de chimenea, debido al intercambio de calor con el medio ambiente., en K/m.

A continuación se muestra una tabla donde se indica la caída de temperatura por longitud de chimenea de distintos materiales.

Tabla 2.7. Tabla de variación de temperatura por metro de longitud de chimenea.

MATERIAL DE LA CHIMENEA	Δt, k/m
Ladrillo	1 - 1.5
Acero revestido por dentro	2 - 3
Acero no revestido	3 - 4

2.7. INSTRUMENTACIÓN

Los procesos industriales en la actualidad han mejorado, gracias a los sistemas automáticos que se han implementado en las industrias. Con ello se ha logrado reducir tiempos, fallas de fabricación, y sobre todo se ha logrado independencia en los sistemas. Para que los procesos sean automáticos se implementan instrumentos de control y de medición.

Los instrumentos de medición se utilizan para medir variables físicas como presión, temperatura, humedad, nivel, etc. Los datos generados por los instrumentos son receptados por el controlador, los procesa y envía señales a las salidas.

En la actualidad los instrumentos de control más usados son los programadores lógicos programables, que son unas mini computadoras que se encargan de recibir señales desde las entradas, las procesan y envía señales hacia los actuadores.

2.7.1. SENSORES

Es un dispositivo que tiene la capacidad de recibir información de una magnitud exterior, magnitudes físicas o químicas y transformarla en magnitudes eléctricas (variables de instrumentación).

Existen algunos tipos de sensores como por ejemplo:

Sensores de posición: Su función es detectar la posición de un determinado objeto en el espacio. Para detectar la posición se usan captadores fotoeléctricos cuya función se basa en el empleo de una fuente de señal luminosa (lámparas, diodos LED, diodos láser etc.) y una célula receptora de dicha señal, como pueden ser fotodiodos, fototransistores o LDR etc.

Sensores de contacto: Son dispositivos de funcionamiento muy simple ya que son interruptores que se activan o desactivan cuando entran en contacto con algún objeto, este tipo de sensores que se aplican mucho en el campo de la robótica.

Sensores digitales: Son sensores que pueden cambiar su estado debido a un estímulo, este cambio se lo muestra en valores de cero ó uno ya que trabajan en código binario, no existe valores intermedios y los valores de voltaje que se pueden obtener con este tipo de sensores son de 5V o 0V.

Sensores analógicos: La gran mayoría de sensores entregan su señal de manera continua en el tiempo, los rangos típicos son de, 4 a 20mA, 0 a 20mA, 0 a 5V, 1 a 5V, entre otros.

Sensores mecánicos: Son aquellos que traducen la acción física del elemento medido, en un comportamiento mecánico, típicamente de movimiento y/o calor.

Sensores electro-mecánicos: Es un sensor que utiliza un elemento mecánico elástico combinado con un transductor eléctrico.

2.7.1.1. Sensores de Temperatura

La temperatura es una de las variables físicas que se mide frecuentemente en aplicaciones industriales. Es importante controlar la temperatura en los procesos industriales ya que para cada aplicación demanda cierto valor de temperatura.

TERMOPARES: El funcionamiento de los termopares se basa en la tensión que genera la unión de dos metales en contacto térmico debido a su comportamiento eléctrico. Este tipo de sensores tienen costos bajos, responde rápidamente a cambios de temperatura, y su señal es bastante estable por lo que tiene una linealidad y exactitud razonable.

Los tipos de termopares que se puede encontrar se muestran a continuación.

Tabla 2.8. Tipo de Termopares

Tipo de Termopar	Campo de aplicación	Precisión	Ventajas	Inconvenientes
Tipo T	-200°C a +250°C	2%		
Tipo J	0°C a +750°C	0.5%	Pequeño tamaño, respuesta rápida, precio razonable	Son afectado por la corrosión
Tipo K	0°C a +1300°C	1%		
Tipo R o S	0°C a +1600°C	0.5%		
Tipo W	0°C a +2800°C	1%		

RESISTIVOS: Los sensores resistivos más comunes son los *RTD* (Detector de Temperatura Resistivo). Los RTD más comunes son fabricados de platino, típicamente poseen una resistencia entre 20Ω y 20kΩ. Su principal ventaja es que son lineales dentro del rango de temperatura entre -200°C y 850°C.

Dentro de los sensores resistivos también tenemos los *Termistores*, este tipo de sensores tienen la particularidad de ser más sensibles y pueden tener coeficientes de temperatura positivos o negativos. La relación entre la resistencia y la temperatura no es lineal sino exponencial.

SEMICONDUCTORES: Se basan en la variación de la conducción de una unión p-n polarizada directamente.

2.7.2. ACTUADORES

Los actuadores son dispositivos capaces de generar una fuerza a partir de una señal eléctrica, neumática o a través de un fluido.

Los actuadores permiten controlar de manera indirecta o directa a las variables de proceso, ya que estos dispositivos responden a una señal enviada por el controlador, esta señal activa a un contactor y permite el paso de corriente hacia el actuador.

Los actuadores pueden ser clasificados dependiendo del tipo de energía que necesita para su funcionamiento:

ACTUADORES ELÉCTRICOS: Dentro de los actuadores eléctricos se puede encontrar una gran variedad, como por ejemplo: motores eléctricos, servomotores, electroválvulas, relés entre otros. Pero uno de los más importantes son los motores eléctricos ya que el movimiento rotacional generado por estos gobierna el funcionamiento de la gran cantidad de máquinas de la industria.

ACTUADORES NEUMÁTICOS: Los actuadores neumáticos funcionan a través de las señales de presión de aire que reciben, en la actualidad el campo de los actuadores neumáticos a evolucionado mucho, ya que algunas de las herramientas eléctricas han sido reemplazadas por herramientas neumáticas, por el torque mayor que brindar para procesos de ajuste, así como también por la presión que se puede lograr con la ayuda de estos. Entre los actuadores neumáticos más importantes podemos citar: los pistones neumáticos, válvulas, etc.

ACTUADORES HIDRÁULICOS: En lo que se refiere actuadores hidráulicos se puede decir que el fluido de trabajo que necesitan es aceite, operan de la misma manera que los actuadores neumáticos con la diferencia que con estos se puede generar más fuerza. Es por ello que estos son usados en tractores, volquetes y en la industria los podemos encontrar principalmente en prensas.

2.7.3. RELÉS

Los relés son dispositivos electromecánicos, cuyo funcionamiento se basa al de un interruptor, este es controlador por un circuito eléctrico en el que, a través de una bobina y un electroimán, se acciona un juego de uno o varios contactos que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes.

El electroimán está formado por un núcleo de hierro y una bobina de cobre. Al momento de cerrar el contacto del relé, pasa una corriente eléctrica por la bobina que genera un campo magnético que magnetiza al núcleo de hierro, convirtiéndose en un imán muy potente. Cuando se abre el contacto del relé deja de pasar corriente por la bobina del relé y desaparece el campo magnético y el núcleo de hierro deja de ser imán.

Muchas veces a los relés los consideran como amplificadores ya que estos pueden controlar un circuito de salida de mayor potencia que el de entrada. Cuando se controlan grandes potencias a los relés se les llama contactores.

RELÉS DE TIPO ARMADURA: Su funcionamiento se basa en la basculación de la armadura, esta basculación es generada por el electroimán. La excitación generada por el campo magnético del núcleo sobre la armadura permite que los contactos se abran o se cierren dependiendo de si es NA o NC.

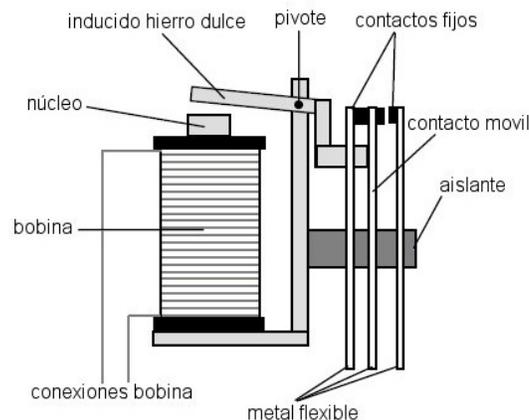
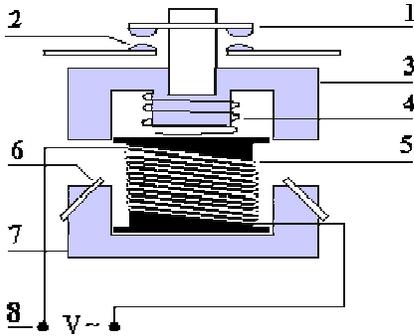


FIG. 2.29 Relé de Armadura

RELÉS DE NÚCLEO MÓVIL: La diferencia de este relé con el anterior es que debido a la fuerza de atracción mayor, se utiliza un solenoide para cerrar sus contactos. Es muy utilizado cuando hay que controlar altas corrientes.



- 1- Contactos móviles. 2 - Contactos fijos.
- 3- Hierro móvil. 4 - Muelle antagonista. 5 - Bobina.
- 6- Espira de sombra (en corriente alterna).
- 7- Hierro fijo. 8 - Alimentación bobina.

FIG. 2.30 Relé de núcleo móvil

RELÉ TIPO REED O DE LENGÜETA: Están formados por una ampolla de vidrio con contactos en su interior, estos contactos a su vez están montados sobre láminas de metal muy delgadas. Los contactos conmutan por la excitación de una bobina, que se encuentra alrededor de la ampolla de vidrio.

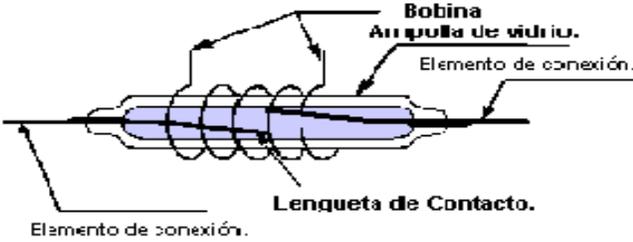


FIG. 2.31 Relé tipo reed

2.8. SISTEMA DE CONTROL

Un sistema de control es un conjunto de elementos que interactúan entre sí con el fin de intervenir a las distintas variables que forman parte de un proceso, el cual funciona de forma independiente a la mano del hombre. El sistema de control normalmente está compuesto de sensores, controladores, actuadores y software.

En la siguiente figura se indica de forma clara la interacción entre los elementos de un sistema de control:

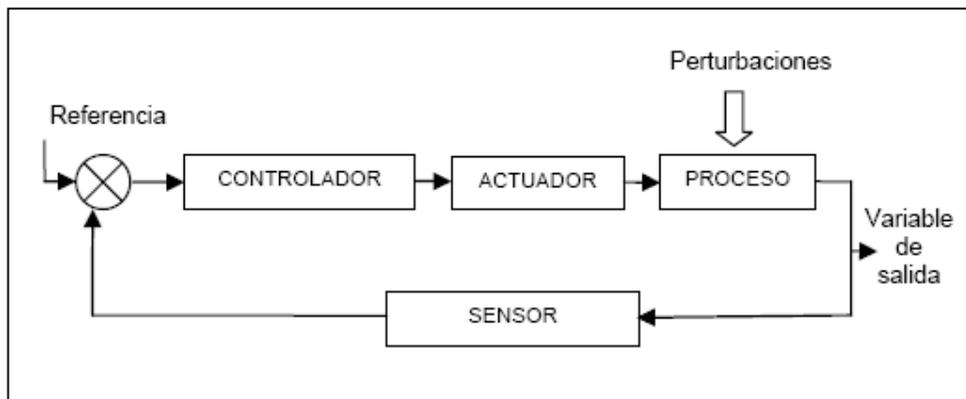


FIG. 2.32 Interacción de los elementos de un sistema de control

Controladores

Un controlador es el elemento del sistema de control que compara los valores deseados de las variables de un proceso con los valores reales que son adquiridos a través de un sensor. Dicho controlador toma una acción a partir de esta información y envía señales a los actuadores para corregir los valores de las variables de control.

Controlador lógico programable (PLC)

En el mercado existen varios tipos de controladores. Estos pueden ser: manuales, neumáticos, eléctricos y electrónicos. Uno de los controladores más utilizados en la industria es el controlador lógico programable o PLC por sus siglas en inglés.

El PLC es un dispositivo con una arquitectura muy similar a la de un computador ya que éste cuenta con un microprocesador, una memoria RAM, dispositivos de programación y comunicaciones, entradas, salidas y alimentación.

De acuerdo con la definición de la "Nema" (National Electrical Manufacturers Association) un controlador programable es: "Un aparato electrónico operado digitalmente, que usa una memoria programable para el almacenamiento interno de instrucciones para implementar funciones específicas, tales como lógica, secuenciación, registro y control de tiempos, conteo y operaciones aritméticas para controlar, a través de módulos de entrada/salida digitales (ON/OFF) o analógicos (1-5 VDC, 4-20 mA, etc.), varios tipos de máquinas o procesos".

Existen PLC compactos que reúnen en una sola unidad, la fuente de poder, el CPU, la memoria y las interfaces I/O. Esta versión representa grandes ventajas en lo que se refiere a costos más accesibles, utilización de espacios reducidos, su selección se hace más fácil, responde con alto desempeño en condiciones hostiles del ambiente de trabajo, pueden ser programados mediante paquetes de software desde una PC.

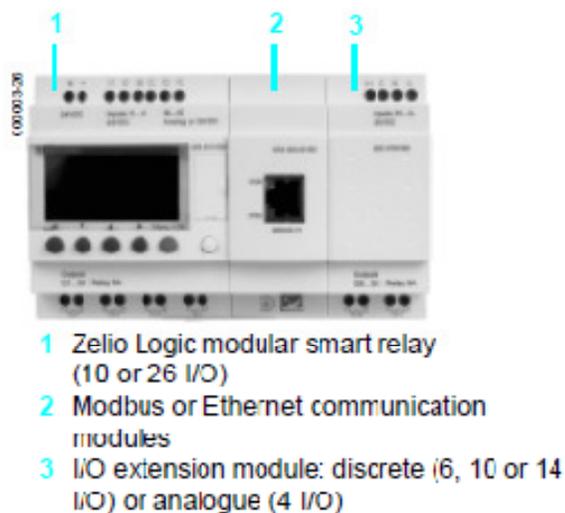


FIG. 2.33 PLC compacto adjunto a módulos de I/O analógicas

Entre las principales ventajas de un PLC se pueden nombrar las siguientes:

- Mínimo espacio requerido para instalar el dispositivo.
- Ahorro de tiempo y facilidad en la programación.
- Costo relativamente bajo del dispositivo.
- Facilidad de realizar mantenimiento e instalación de nuevos dispositivos, lo que es muy útil para las industrias que constantemente están renovando y mejorando sus procesos.

Elementos y partes de un PLC

CPU:

La CPU o unidad central de procesamiento realiza cálculos y ejecuta las instrucciones del programa de aplicación según sea necesario. El elemento más importante de la CPU es el microprocesador.

Memoria:

La memoria es el dispositivo electrónico donde el PLC guarda el programa y los datos que son adquiridos por los sensores. En un PLC pueden existir los siguientes tipos de memorias:

- Memoria RAM (Random Access Memory)
- Memoria ROM (Read Only Memory)
- Memoria PROM (Programmable Read Only Memory)
- Memoria EPROM (Electrical Programmable Read Only Memory)
- Memoria EEPROM (Electrical Erase Programmable Read Only Memory)

Dispositivos de programación y comunicaciones

Estos dispositivos permiten al PLC comunicarse con el usuario y los periféricos que se encuentran en torno al PLC. Existen diversas formas para comunicarse con el PLC. Entre las principales podemos nombrar las siguientes:

1. Conexión con ordenadores a través de cables como el SR2CBL01
2. Programadores manuales
3. Pantallas

4. Otros PLC

Entradas

Las entradas de un PLC pueden ser tanto analógicas como digitales.

Las entradas analógicas mandan una señal de voltaje variable, las cuales tienen que ser acondicionadas y digitalizadas para ser procesadas.

Las entradas digitales funcionan en función de señales que se activan por circuitos de voltajes altos. Las señales digitales funcionan con la lógica del lenguaje binario lenguaje binario, lo que significa que una señal de voltaje tiene un valor de 1, caso contrario el valor de la señal es 0.

Salidas

Realiza la interface entre el procesador y los dispositivos conectados como salida, proporcionando señales a los actuadores.

Software de programación

En la actualidad existen varias formas de programar un PLC. Entre los principales métodos de programación de PLCs se tienen los siguientes:

- LD Diagrama de Escalera
- FBD Diagrama de Bloque
- ST Texto Estructurado, el cual está basado en la lógica de la programación estructurada en lenguajes como Pascal o C.
- IL Lista de Instrucciones
- SFC Cuadro Secuencial de Funciones

Los lenguajes más sencillos y más utilizados en la actualidad son el diagrama de escalera y el diagrama de bloque. Es importante recalcar que todos los lenguajes citados previamente se encuentran basados en la norma IEC 1131-3.

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL HORNO

3.1. GENERALIDADES

La Escuela Politécnica del Ejército Sede Latacunga, cuenta con un centro de producción de muebles metálicos que son utilizados principalmente en entidades militares y del estado. Con el fin de mejorar sus procesos, en el año de 1996 se decidió adoptar el proceso de pintura en polvo para dar el recubrimiento y la protección necesaria a la producción, con ello fue necesario construir el horno de curado que tiene una temperatura de trabajo de aproximadamente 200 °C.

Los problemas actuales que presenta el horno son:

- Carencia de uniformidad en la distribución de temperaturas, debido a que es de llama directa la producción resulta afectada.
- Baja eficiencia en la producción ya que se tiene que rotar las piezas para curar los dos lados.
- Debido a problemas de temperatura y de la llama, no se puede usar el horno en toda su capacidad.
- Mal funcionamiento en la chimenea, por lo que existía contaminación en el ambiente de trabajo.

En vista de todos estos problemas fue necesario hacer una re-ingeniería del horno con el fin de mejorar los procesos de producción y la calidad del producto.

3.2. ALTERNATIVAS

Para el Diseño del Horno fue necesario buscar algunas alternativas para luego poder tomar la decisión más óptima, fiable y rentable para el proceso de producción que se lleva a cabo en la empresa.

Según la teoría revisada, para hornos de baja temperatura es mejor aprovechar la convección que la radiación de llama, ya que a temperaturas muy bajas ($< 593\text{ }^{\circ}\text{C}$) la radiación puede resultar muy baja y generalmente es superada por la convección. Por esta razón, es mejor aprovechar la convección generando mayor turbulencia en el aire o en los gases de combustión para obtener coeficientes de convección elevados que permitan una transferencia de calor alta.

A partir de estas hipótesis se obtuvieron las siguientes alternativas:

- A. Horno de Convección, con sistemas de calentamiento de aire a través de una Cámara de Mezcla.

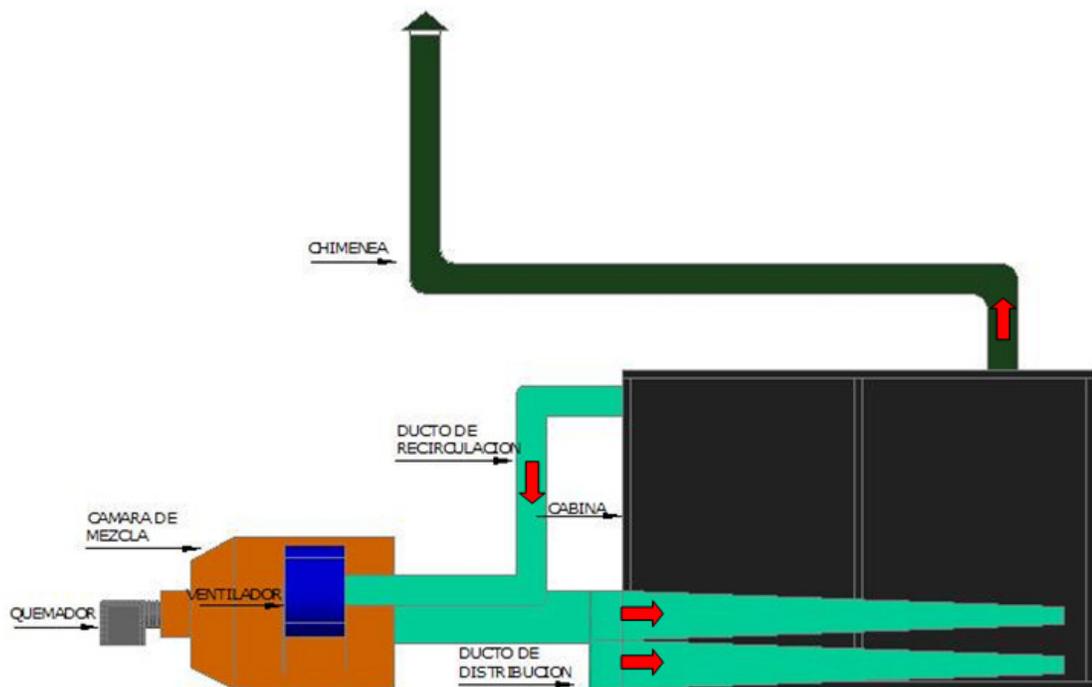


FIG. 3.1 Horno de Convección con Cámara de Mezcla

B. Horno de Convección, con sistemas de calentamiento de aire a través de un Intercambiador de Calor

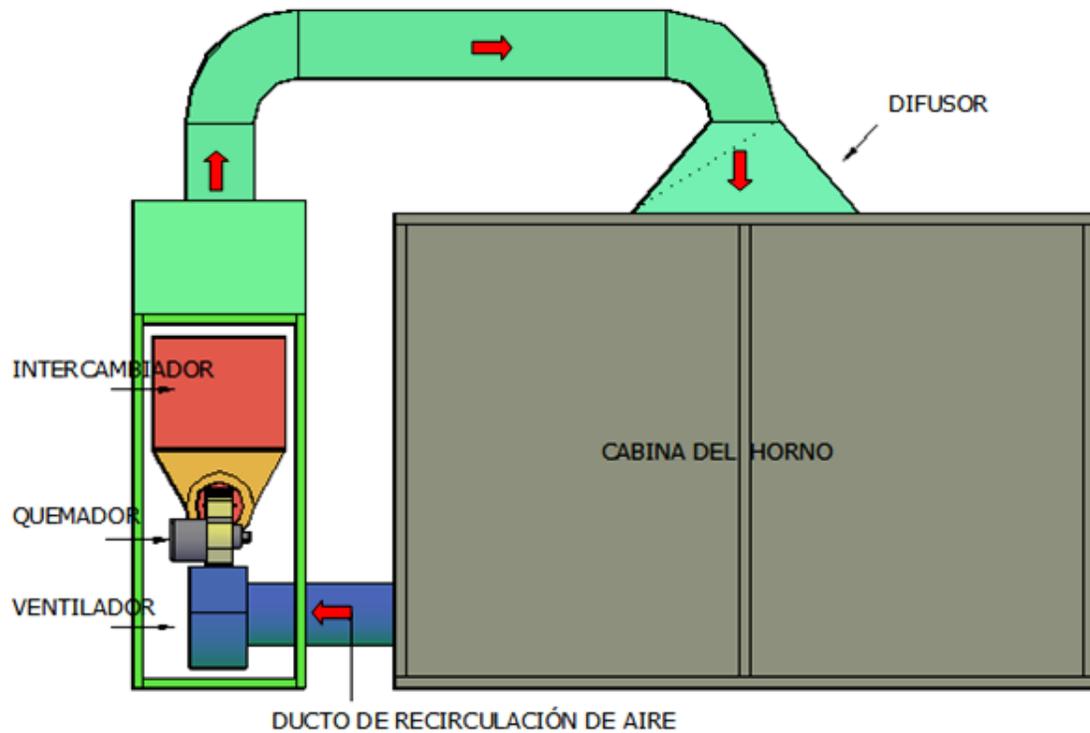


FIG. 3.2 Horno de Convección con Intercambiador de Calor

A continuación se muestra una matriz de ponderación, en la que se evaluará ciertos parámetros técnicos, económicos y complementarios, los mismos que ayudarán a escoger la mejor opción para el diseño del horno de pintura electrostática por convección.

Tabla 3.1. Matriz de ponderación para selección del tipo de sistema de calentamiento

ASPECTOS	PONDERACION	ALTERNATIVAS	
		A	B
TECNICOS	40	23	33
Durabilidad	10	7	9
Versatilidad (Fácil Manejo)	10	6	9
Bajo nivel de contaminación	10	5	5
Control de variables	5	3	5
No contaminación a la producción	5	2	5
ECONÓMICOS	30	24	22
Costo de materiales	10	9	7
Costo de mantenimiento	10	7	8
Costo de instalación	5	4	7
Costo de mano de obra	5	3	3
COMPLEMENTARIOS	30	19	26
Seguridad	20	13	17
Funcionalidad	10	6	9
PUNTUACION TOTAL	100	65	84

ALTERNATIVA A: Sistema de calentamiento directo

ALTERNATIVA B: Sistema con intercambiador de calor

3.3. DIMENSIONAMIENTO DEL HORNO

En este proyecto no es esencial dimensionar el tamaño de la cabina del horno ya que se pretende utilizar la cabina que se encuentra ya dimensionada. De todas formas, se hará una evaluación en lo que respecta a las dimensiones de la cabina actual con la finalidad de verificar que no existan problemas de espacio que puedan afectar a la productividad del centro.

Actualmente la cabina tiene las siguientes dimensiones:

- Largo: 3m
- Alto: 2m
- Ancho: 2m

En dicha cabina se espera que puedan entrar entre 15 y 20 sillas. Luego de hacer el arreglo que se presenta en la siguiente figura, se demuestra que el tamaño de la cabina es adecuado.

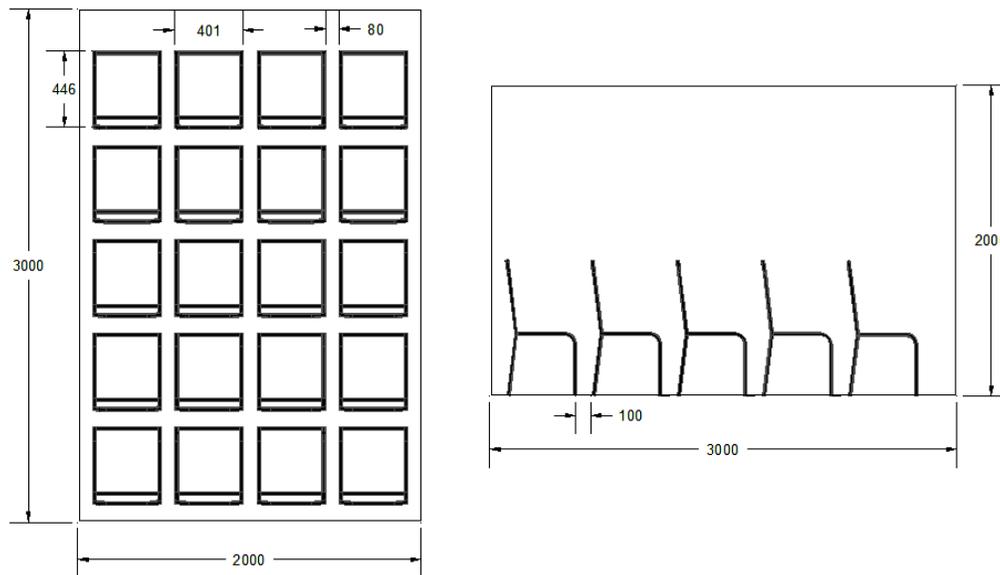


FIG. 3.3 Distribución de materia prima en la cabina del horno

Cuando se diseña un horno, es importante conocer cuál es la forma más óptima para distribuir las cargas. Este factor es muy importante, ya que se tiene que encontrar un equilibrio entre el espaciamiento entre cargas y la cantidad de materia prima que ingresa al horno con la finalidad de buscar una solución en la que se optimice la producción sin dejar de lado la calidad del producto.

En el caso del curado de la pintura electrostática es importante que la pieza se encuentre expuesta al ambiente caliente del horno para que su proceso de curado sea el más óptimo y de esta forma mantener la calidad.

A continuación se determina el porcentaje de exposición de la carga al ambiente del horno. El primer paso para determinar estos valores es hallar una relación entre la separación de las cargas entre centros [C] y los espesores [e] de la materia prima.

$$R = C/e \quad \text{Ec. (3.1)}$$

A continuación se indican las dimensiones de la separación y los espesores de la materia prima:

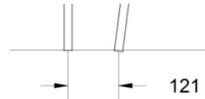


FIG. 3.4 Espacio requerido entre la materia prima

Para este caso no se tomará en cuenta al espesor del perfil, sino a su ancho, ya que nos interesa que la parte externa sea la que esté expuesta al calor.

$$R = \frac{121}{21} = 5.76$$

Luego de obtener este resultado se tiene que hallar el porcentaje de exposición con la siguiente figura:

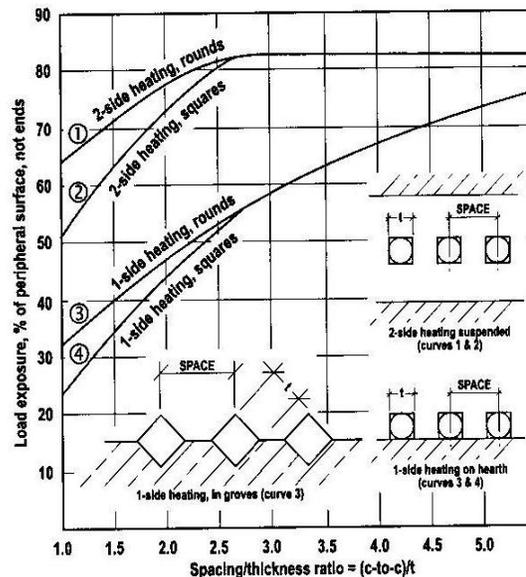


FIG. 3.5 Porcentaje de exposición de la carga en función de su separación⁶

⁶ TRINKS, W; Industrial Furnaces; Sexta edición; United States 2003

Con la relación de 5.76 se obtiene un porcentaje de exposición al calor de aproximadamente 83%, lo que determina que no existen problemas con la distribución de la carga en función de su exposición al calor. Esto indica que el horno funcionará de forma adecuada en función de su volumen.

3.4. SELECCIÓN DE MATERIALES DEL HORNO

3.4.1. MATERIALES DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

Para definir el tipo de materiales con los que será construido el intercambiador de calor se tuvieron que tomar en cuenta varios factores como el costo de los materiales, el presupuesto que se tiene para la fabricación del mismo, la conductividad térmica de los materiales y las condiciones a las que va a estar sometido dicho material.

Luego de investigar las características técnicas y costos de los materiales con proveedores, se decidió utilizar los siguientes materiales para el diseño y la construcción del intercambiador de calor:

Tabla 3.2. Materiales utilizados en el intercambiador de calor

USO	MATERIAL	CARACTERISTICAS
Cámara de combustión	Acero AISI 304	Acero inoxidable austenítico con excelente resistencia a la corrosión y a la presión. Buena soldabilidad. Buena conductividad térmica. Puede trabajar a temperaturas máximas de 720 °C.
Tubos	Tubería ISO 2"	Buena soldabilidad, resistencia a la tracción mínima de 25 KSI. Se recomienda para conducción de agua, gas, vapor, petróleo, aire presurizado y fluidos no corrosivos. Alta conductividad térmica.
Espejos	Acero ASTM A-36	Acero estructural con resistencia a la tracción de 248 MPa. Buena soldabilidad. Conductividad térmica de 60 W/m.
Aislamiento	Fibra mineral	Resistencia a la temperatura de hasta 1038 °C. Fácil aplicación. Conductividad térmica muy baja. Buen aislante térmico.

Paredes interiores	Acero ASTM A-36	Acero estructural con resistencia a la tracción de 248 MPa. Buena soldabilidad. Conductividad térmica de 60 W/m.
Paredes exteriores	Acero galvanizado	Resistente a la corrosión. Recubrimiento de Zinc. Resistente a la abrasión. Resistencia mecánica elevada. Protección integral de los elementos internos. Ausencia de mantenimiento. Fácil de pintar.

A continuación se muestra una figura donde se indican las partes del intercambiador de calor:

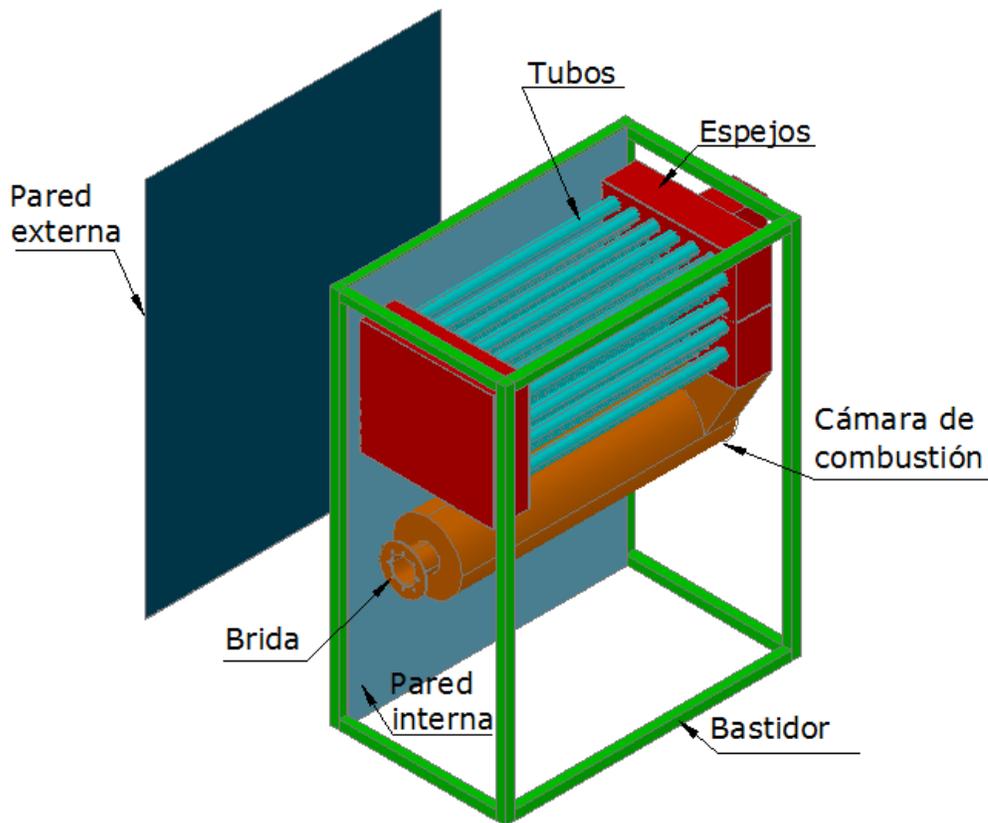


FIG. 3.6 Partes y piezas del intercambiador de calor

3.5. DISEÑO TÉRMICO

3.5.1. ANÁLISIS TÉRMICO DEL COMBUSTIBLE

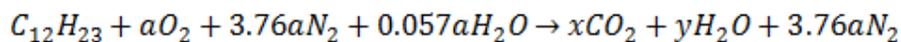
Es muy importante realizar un análisis térmico del combustible, ya que al quemar el combustible se tienen que tomar en cuenta muchas variables y factores como el exceso de aire que se requiere, la cantidad de calor que suministra el combustible, la temperatura de flama, la resistencia de los materiales a la temperatura, la relación estequiometría aire – combustible y otros que serán desarrollados y explicados más adelante.

En esta parte del capítulo, se pretende principalmente determinar la temperatura de flama adiabática con la que trabajará el intercambiador de calor. Todo esto con el fin de no afectar a los materiales con los que estará construido el intercambiador de calor, y además con la finalidad de transferir la suficiente cantidad de calor que requiere el horno para su adecuado funcionamiento.

Como se mencionó previamente, la cámara de combustión del intercambiador de calor será construida de acero inoxidable AISI 304 el cual puede trabajar a una temperatura máxima de 720°C. Es muy importante tomar en cuenta este dato, ya que la temperatura de flama no tiene que superar este valor para que no se vean afectadas las propiedades metalúrgicas de la cámara de combustión.

Para determinar la temperatura de flama adiabática se tiene que obtener la ecuación estequiométrica de los reactivos y los productos de la combustión. Esta ecuación es muy necesaria para poder determinar la temperatura de flama adiabática.

Para igualar la ecuación estequiométrica se puede partir de la siguiente ecuación química donde se toma en cuenta la composición promedio del Diesel # 2.



Ec. (3.2) Ecuación estequiométrica del Diesel #2 no igualada

Igualando la ecuación química con el método algébrico se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$C: 12 = x$$

$$O: 2a + 0.057a = 2x + y$$

$$H: 23 + 0.114a = 2y$$

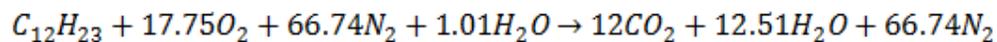
Resolviendo el sistema de ecuaciones se obtienen los siguientes valores de los coeficientes:

$$a = 17.75$$

$$x = 12$$

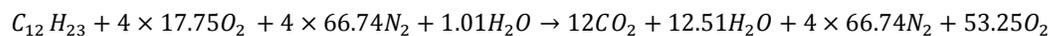
$$y = 12.512$$

Reemplazando los coeficientes encontrados se obtiene la siguiente ecuación química:



Ec. (3.3) Ecuación estequiométrica del Diesel #2

Como mencionamos anteriormente la temperatura dentro de la cámara de combustión no debe exceder los 720 °C, por lo que será necesario añadir un exceso de aire al momento de la combustión. Para esto se igualará la ecuación química con un 300% de exceso de aire.



Ec. (3.4) Ecuación estequiométrica con 300% de exceso de aire

3.5.1.1. Relación aire combustible (AC)

Una cantidad utilizada frecuentemente en el análisis de procesos de combustión para cuantificar las cantidades de combustible y aire es la **relación aire-combustible**, AC. Suele expresarse en una base de masa y se define

como la relación entre la masa del aire y la masa del combustible en un proceso de combustión.⁷

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}} = \frac{NM_{aire}}{NM_C + NM_{H_2}}$$

Ec. (3.5) Relación aire combustible

A continuación se determina la relación aire combustible en función de los valores obtenidos previamente en la ecuación con 300% de exceso de aire:

$$AC = (N_{O_2}M_{O_2} + N_{N_2}M_{N_2}) / (N_C M_C + N_{H_2} M_{H_2})$$

$$AC = \frac{71 * 32 + 266.96 * 28}{12 * 12 + 12.51 * 2}$$

$$AC = 57.67$$

3.5.1.2. Temperatura de flama adiabática

La temperatura de flama adiabática es la temperatura máxima que alcanzan los productos de la combustión. Por lo tanto, el calor transferido es igual a cero ($Q = 0$) y el trabajo mecánico también es igual a cero ($W = 0$). De esto resulta que la entalpía de los productos es igual a la entalpía total de los reactantes obteniendo la siguiente ecuación:

$$H_{prod} = H_{react}$$

De lo que se deduce lo siguiente:

$$\sum N_p (hf^\circ + h + h^e) = \sum N_r (hf^\circ + h + h^e)$$

Ec. (3.6) Balance energético para un sistema de flujo permanente

Donde:

hf° = Entalpía de formación del componente a 298 K

h = Entalpía del componente a la temperatura ambiental indicada

h° = Entalpía del componente a 298 °K

⁷ CENGEL – BOLES; Termodinámica; Quinta Edición; México 2002

Tomando en cuenta una temperatura ambiental mínima de 10°C en la ciudad de Latacunga, obtenemos los valores requeridos para calcular la temperatura de flama adiabática.

Tabla 3.3. Entalpías de Reactantes y Productos⁸

REACTANTES			
Sustancia	h^f (kJ/kg-mol)	$h_T @ 283\text{ K}$ (kJ/kg-mol)	h° (kJ/kg-mol)
C₁₂ H₂₃	-373600	0	0
O₂	0	8150	8682
N₂	0	8141	8669
H₂O	-241820	9296	9904

PRODUCTOS			
Sustancia	h^f (kJ/kg-mol)	$h_T @ T_f$ (kJ/kg-mol)	h° (kJ/kg-mol)
CO₂	-393520	$h_T \text{ CO}_2$	9364
H₂O	-241820	$h_T \text{ H}_2\text{O}$	9904
O₂	0	$h_T \text{ O}_2$	8682
N₂	0	$h_T \text{ N}_2$	8669

Con los valores de la tabla 3.3 reemplazamos en la ecuación (3.6) con el objetivo de obtener la temperatura de flama con 300% de exceso de aire.

$$\sum N_r(h^f_r + h - h^\circ_r) = (-373600) + 71 * (0 + 8150 - 8682) + 266.96 * (0 + 8141 - 8669) + 1.01 * (-241820 + 9226 - 9904)$$

$$\sum N_r(h^f_r + h - h^\circ_r) = -797250$$

$$\sum N_p(h^f_p + h - h^\circ_p) = 12 * (-393520 + h_T \text{ CO}_2 - 9364) + 12.51 * (-241820 + h_T \text{ H}_2\text{O} - 9904) + 266.96 * (0 + h_T \text{ N}_2 - 8669) + 53.25 * (0 + h_T \text{ O}_2 - 8682)$$

⁸ CENGEL – BOLES; Termodinámica; Quinta Edición; México 2002

Igualando productos con reactantes:

$$-797250 = 12 * (h_T CO_2) + 12.51 * (h_T H_2O) + 266.96 * (h_T N_2) + 53.25 * (h_T O_2) - 10796267.98$$

Ec. (3.7) Entalpías de los productos a la temperatura de flama

$$9999018.12 = 344.72 * (h_T N_2)$$

Cuando el oxidante es aire, los gases producto se componen principalmente de N_2 , es por eso que nuestra primera aproximación para la temperatura de flama adiabática la hacemos sumando los coeficientes (h_T) de la entalpía a la temperatura de flama y los igualamos de la siguiente forma:

$$(h_T N_2) = \frac{9999018.12}{344.72} = 29006.2 \frac{KJ}{Kmol}$$

Según la tabla A-18 (Propiedades del Gas Ideal del Nitrógeno) de CENGEL – BOLES; Termodinámica; Quinta Edición; México 2002. Para que la entalpía tenga un valor de 26777 kJ/kmol, la temperatura de flama debe ser de 697 °C.

Con este valor de temperatura reemplazamos los valores de entalpía de los productos en la ecuación (3.7.)

$$9999018.12 = 12 * (41145) + 12.51 * (34653) + 266.96 * (29151) + 53.25 * (30345)$$

$$9999018.12 = 10325271.24$$

Con estos valores se tiene un error aproximado del 3.26%, lo que nos permite tener una certeza de que la temperatura estará dentro del rango necesario.

3.5.2. ANÁLISIS TÉRMICO DEL HORNO

Calor requerido por la carga y el horno

Para evaluar los requerimientos del horno es necesario determinar la cantidad de calor que necesita la carga y el horno. Por esto, se debe conocer la carga másica mas critica (m_c), el calor específico del acero ASTM A-36 con el que son fabricados los muebles (C_{p_c}), y la variación de temperatura ($T_{max} - T_{min}$). Para calcular la cantidad de calor que se necesita se utiliza la siguiente ecuación:

$m_c := 210$	kg	Carga del horno
$T_{max} := 185$	°C	Temperatura máxima a la que llega el horno
$T_{min} := 10$	°C	Temperatura de entrada de la carga en un día frío

$$T_{med} := \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$$

$T_{med} = 97.5$	°C	Temperatura media de la carga
------------------	----	-------------------------------

$C_{p_c} := 0.487$	$\frac{KJ}{Kg \cdot K}$	Calor específico del acero AISI 1010 a 370 °K
--------------------	-------------------------	---

$$Q_c := m_c \cdot C_{p_c} \cdot (T_{max} - T_{min})$$

$$Q_c = 17897.25 \quad kJ$$

De la misma forma, es muy importante calcular la cantidad de calor que necesitan las paredes del horno para llegar a la temperatura de trabajo. Es esencial tomar en cuenta este factor porque muchas veces las partes del horno absorben una gran cantidad de calor que incluso puede ser mayor a la absorbida por las cargas. Para este caso se tiene que tomar en cuenta la masa de las paredes del horno (m_{pi}), el calor específico del acero al carbono ($C_{p_{pi}}$), y la variación de temperatura que es igual a la de la carga ($T_{max} - T_{min}$).

$\rho_p := 7832$	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Densidad del acero AISI 1010
$m_{pi} := V_p \cdot \rho_p$		Masa total de las paredes del horno
$m_{pi} = 156.64$	kg	
$C_{p_{pi}} := 0.487$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	Calor específico de las paredes a 370 °K
$Q_{pi} := m_{pi} \cdot C_{p_{pi}} \cdot (T_{\text{max}} - T_{\text{min}})$		Calor a impartir a las paredes interiores del horno.
$Q_{pi} = 13349.644$	kJ	

Como el techo y el piso del horno tienen un valor diferente de espesor se calculará a parte el calor que requieren estas partes del horno. En este caso, la cantidad de calor se calcula de la misma forma. Para este caso las variables tendrán la siguiente denominación. La masa del techo y el piso será conocida como (m_t), el calor específico (C_{p_t}), y la variación de temperaturas será conocida como ($T_{\text{max}} - T_{\text{min}}$).

$\rho_{pt} := 7832$	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Densidad del acero AISI 1010
$m_t := V_p \cdot \rho_{pt}$		Masa total del techo y el piso del horno
$m_t = 281.952$	kg	
$C_{p_t} := 0.487$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	Calor específico del techo y el piso a 370 °K
$Q_t := m_t \cdot C_{p_t} \cdot (T_{\text{max}} - T_{\text{min}})$		Calor a impartir al techo y al piso del horno.
$Q_t = 24029.359$	kJ	

Coefficiente de transferencia de calor por convección al interior del horno

Para hacer un análisis completo de transferencia de calor al interior del horno, se requiere conocer los coeficientes de transferencia de calor por convección, conducción y radiación. En esta parte del capítulo sólo será calculado el coeficiente de transferencia de calor por convección al interior del horno, ya que este nos permitirá determinar la temperatura media a la que se encuentran los gases al interior del horno. A continuación se determina dicho coeficiente utilizando la teoría de convección forzada por flujo interno ya que se tiene un flujo de aire al interior del horno. Por recomendación de W. Trinks, Hornos Industriales, para hornos de baja temperatura es una buena práctica contar con velocidades que varíen entre 0.8 y 2 m/s. Para este caso es conveniente utilizar velocidades de 0.3 m/s con la finalidad de no afectar a la capa de pintura en polvo.

$$\mu_g := 2.507 \cdot 10^{-5} \quad \frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \quad \text{Viscosidad dinámica @ 190}^\circ\text{C}$$

$$\rho_g := 0.774 \quad \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Densidad del aire a 190}^\circ\text{C}$$

$$v_g := 0.3 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{Velocidad de los gases al interior del horno}$$

$$A_t := 6 \quad \text{m}^2 \quad \text{Área transversal de flujo}$$

$$P_m := 10 \quad \text{m} \quad \text{Perímetro mojado}$$

$$D_h := \frac{4 \cdot A_t}{P_m} \quad \text{Diámetro hidráulico}$$

$$D_h = 2.4 \quad \text{m}$$

$$Re_g := \frac{\rho_g \cdot v_g \cdot D_h}{\mu_g} \quad \text{Ec.(3.8) Número de Reynolds para el aire caliente dentro de la cabina del horno}$$

$$Re_g = 22228.959 \quad \text{Flujo turbulento}$$

$n := 0.4$		Para calentamiento
$Pr_g := 0.69$		Número de Prandtl a 300 °C
$Nu := 0.023 \cdot Re_g^{0.8} \cdot Pr_g^n$		Ec.(3.9) Ecuación de Dittus-Boelter para convección forzada al interior de un tubo.
$Nu = 59.539$		
$k_g := 0.0373$	$\frac{W}{m \cdot K}$	Conductividad térmica del aire a 190 °C
$hi := \frac{k_g \cdot Nu}{Dh}$		Coefficiente de transferencia de calor por convección.
$hi = 0.925$	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	

Finalmente, se ha determinado el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección del aire al interior del horno. A continuación, se calculará la temperatura media de los gases al interior valiéndonos de esta variable.

Temperatura del aire al interior del horno

Para resolver el problema de obtener el valor de la temperatura del gas al interior del horno se ha utilizado. La teoría de la conducción en estado transitorio y en particular el método de la resistencia interna despreciable. Este método es bastante útil cuando se tiene que calentar o enfriar un sólido que se encuentra sumergido en un fluido. Es decir, existe principalmente transferencia de calor por convección.

Para un mejor entendimiento se ejemplificará el proceso. En un proceso industrial se requiere calentar una pieza, la cual se encuentra a una temperatura T_1 dicha pieza es ingresada a un horno de convección de aire caliente el cual se encuentra a una temperatura T_∞ y llega a una temperatura $T_2 > T_1$, luego de un intervalo de tiempo determinado Δt . Para el caso de este proyecto se conocen las temperaturas T_1 , T_2 , y Δt y lo que se desea conocer es

T_{∞} , o sea, la temperatura a la que se encuentran los gases al interior de la cabina del horno.

Con el objetivo de resolver este problema de una forma sencilla, lo que se hará es utilizar el método de la resistencia despreciable, donde se parte de la premisa de que existen gradientes de temperatura insignificantes dentro de la carga. Según la ley de Fourier, la conducción de temperatura con la ausencia de una gradiente, implica la existencia de una conductividad térmica infinita. Esta condición es claramente imposible. Sin embargo, aunque la condición nunca se satisface de forma exacta, se acerca mucho a ello si la resistencia a la conducción dentro del sólido es pequeña comparada con la resistencia a la transferencia de calor entre el sólido y sus alrededores⁹.

El caso mencionado previamente es precisamente el mismo caso de horno de pintura que se desea construir, ya que no existen gradientes de temperatura significantes dentro del sólido porque los espesores de las cargas son muy pequeños y además las resistencias térmicas en los alrededores son mucho mayores. De todas formas, estas premisas serán demostradas matemáticamente más adelante.

Partiendo de todas las suposiciones previas, se debe tener en cuenta que la energía almacenada por el sólido es igual a la energía absorbida por convección teniendo lo siguiente:

$$-E_{entra} = E_{alm}$$

$$-h_i \cdot A_s \cdot (T_g - T) = \rho \cdot V \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt}$$

Si $\theta = T_g - T$ y aceptamos que dT/dt es igual que $d\theta/dt$ e integramos tomando en cuenta el límite de frontera de que para $t = 0$, $T(0) = T_i$, donde T_i es la temperatura inicial de la carga, o sea, la temperatura ambiental mínima.

⁹ **INCROPERA – DE WITT**; Fundamentos de Transferencia de Calor; Ed. Pearson; México 1996.

$$\int_0^t 1 dt = \frac{-\rho \cdot V \cdot C_p}{h \cdot A_s} \cdot \int_{\theta_i}^{\theta} \frac{1}{\theta} d\theta$$

Integrando la ecuación se llega al siguiente resultado:

$$\frac{T_g - T}{T_g - T_i} = e^{-\left(\frac{h_i \cdot A_s \cdot t}{\rho \cdot V \cdot C_p}\right)}$$

Como se desea conocer la temperatura de los gases, se despeja la ecuación anterior hallando la siguiente expresión:

$$T_g = \frac{T - T_i \cdot e^{-\left(\frac{h_i \cdot A_s \cdot t}{\rho \cdot V \cdot C_p}\right)}}{1 - e^{-\left(\frac{h_i \cdot A_s \cdot t}{\rho \cdot V \cdot C_p}\right)}}$$

Ec. (3.11) Temperatura promedio del aire al interior del horno

Con esta expresión y los datos que se tienen, se puede determinar la temperatura de los gases. Pero antes de calcular la temperatura de los gases por el método de la resistencia despreciable hay que calcular el número de Biot, el cual nos permitirá saber si en realidad es útil para este caso utilizar el método de la resistencia despreciable.

Número de Biot

El método de la resistencia despreciable es el método más sencillo para resolver problemas donde existe conducción transitoria, pero para utilizar este método hay que conocer en qué casos es útil y preciso este método. Para ello se retomará una premisa mencionada previamente, donde se decía que la resistencia por conducción es despreciable comparada con la resistencia térmica de los alrededores. Esto se puede determinar fácilmente dividiendo la resistencia de por conducción del sólido entre la resistencia por convección de los alrededores obteniendo la siguiente expresión:

$$\frac{R_{cond}}{R_{conv}} = \frac{hL}{K} = Bi$$

Ec. (3.12) Número de Biot

Donde:

h : Coeficiente de convección del horno

L : Longitud característica del sólido

K : Conductividad térmica del sólido

Esta expresión es un número adimensional conocida como número de *Biot* la cual nos permite definir si en realidad es posible utilizar el método de la resistencia despreciable cuando $Bi \ll 1$, o sea, Biot es mucho menor que uno. En otras palabras, la resistencia por convección es mucho mayor a la resistencia por conducción.

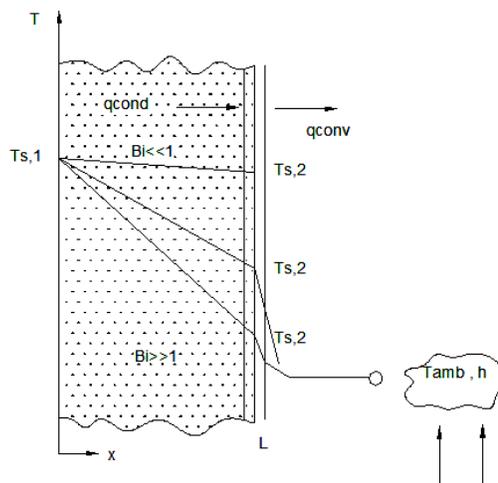


FIG. 3.7 Efecto del número de Biot en la distribución de temperaturas¹⁰

A continuación será calculado el número de Biot tomando en cuenta que el horno se encuentra lleno de sillas. Cabe resaltar que la longitud característica de la silla fue calculada dividiendo el volumen total de la silla para su área superficial total.

$$L_{c_{silla}} = 0.0017 \quad m$$

¹⁰ INCROPERA – DE WITT; Fundamentos de Transferencia de Calor; Ed. Pearson; México 1996.

$$K_{ac} := 48 \frac{W}{m \cdot K} \quad \text{Conductividad térmica del acero a } 600 \text{ } ^\circ K$$

$$Bi := \frac{h_i \cdot L_{c\text{silla}}}{K_{ac}} \quad \text{Número de Biot para la conducción transitoria de la silla.}$$

$$Bi := 0.0000329$$

$$Bi < 0.1$$

Como $Bi \ll 0.1$ se tiene la certeza de que los valores que se obtengan tendrán una precisión adecuada para la aplicación que se tiene. Por lo tanto, se puede continuar con el cálculo de la temperatura de los gases utilizando el método de la resistencia despreciable.

Ahora se continuará con el cálculo de la temperatura del gas reemplazando los datos obtenidos en la ecuación (3.11)

$$t_{\text{calentamiento}} := 900 \text{ s}$$

$$T_g := \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{min}} \cdot e^{-\left(\frac{h_i \cdot A_{\text{silla}} \cdot t_{\text{calentamiento}}}{\rho_p \cdot V_{\text{silla}} \cdot C_{p_p}}\right)}}{1 - e^{-\left(\frac{h_i \cdot A_{\text{silla}} \cdot t_{\text{calentamiento}}}{\rho_p \cdot V_{\text{silla}} \cdot C_{p_p}}\right)}}$$

$$T_g = 185 \text{ } ^\circ C$$

Donde:

- $t_{\text{calentamiento}}$ = Es el tiempo de calentamiento del horno
- T_g = Es la temperatura de los gases al interior del horno
- T_{max} = Temperatura máxima de curado de la pintura (210 °C)
- T_{min} = Temperatura ambiental mínima en Latacunga (10 °C)
- h_i = Coeficiente de convección al interior del horno
- A_{silla} = Área superficial de la silla (0.293 m²)
- V_{silla} = Volumen total de la silla (0.0005 m³)
- C_{p_p} = Calor específico del acero al carbono
- ρ_p = Densidad del acero al carbono

Con el resultado obtenido se confirma que no se necesita que el aire se encuentre a una temperatura mayor a la de la carga del horno. Lo que permitirá ahorrar energía al momento de tratar la pintura. Este dato servirá a futuro para programar el tablero de control automático del horno.

Calor a impartir al aire caliente

Al trabajar en un horno de convección, el aire es fluido de trabajo encargado de transferir el calor necesario a la carga y a las paredes del horno, pero además este tiene que absorber energía. Para llegar a un diseño térmico óptimo, es primordial tomar en cuenta toda la energía que requiere el horno para trabajar. Por lo tanto es esencial determinar qué cantidad de calor necesita absorber el aire. A continuación se calcula la cantidad de calor que se tiene que impartir al aire de una manera similar a la que se calculó el calor a impartir a la carga y a las paredes del horno.

Primero hay que calcular la masa de aire que existe en la cabina del horno. Esta masa tiene que estar corregida para las condiciones de temperatura a las que estará sometida y a la altura de Latacunga.

$$\rho_a := 1.246 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Densidad del aire a } 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$C_{p_a} := 1.027 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \quad \text{Calor específico del aire}$$

$$\rho_{lat} := 0.9290 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Densidad del aire a 2785 m de altura.}$$

$$\rho_{nm} := 1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Densidad del aire a nivel del mar.}$$

$$G := \frac{\rho_{lat}}{\rho_{nm}} \quad \text{Ec. (3.13) Factor de corrección por altura}$$

$$G = 0.758$$

$V_a := 2 \cdot 2 \cdot 3$ Volumen de la cabina del horno

$$V_a = 12 \text{ m}^3$$

$$m_a := V_a \cdot \rho_a \cdot G$$

$m_a = 11.339 \text{ kg}$ Masa de aire al interior del horno

Luego de haber determinado la masa de aire que se necesita calentar, se procede a calcular la cantidad de calor que se utilizará en este proceso. Para este caso el proceso de cálculo es igual al utilizado en la carga y en las paredes. Este proceso difiere en las propiedades termo físicas que se utilizan.

$$Q_a := m_a \cdot C_{p_a} \cdot (T_a - T_{min})$$

$$Q_a = 2142.729 \text{ kJ}$$

Ahora ya se ha calculado toda la cantidad de calor que es necesaria para que funcione el horno. Esta cantidad de calor sería la necesaria si el proceso fuese adiabático, pero en la realidad este tipo de procesos no se dan. Por lo tanto hay que calcular las pérdidas de calor que existen en paredes. En la siguiente parte del diseño térmico se calculará la transferencia de calor que existe entre las paredes del horno y el ambiente, y finalmente se podrá determinar cuánta energía requiere el horno para cumplir con el proceso.

Cálculo de pérdidas de energía en las paredes del horno

En los sistemas térmicos, normalmente no existen aislantes perfectos, por lo que generalmente existirán pérdidas energéticas. Este caso no es la excepción. Por lo tanto, es necesario calcular la cantidad de energía que se pierde en el horno para que su diseño térmico se ajuste a la realidad.

A continuación se muestra un esquema de cómo están construidas las paredes del horno:

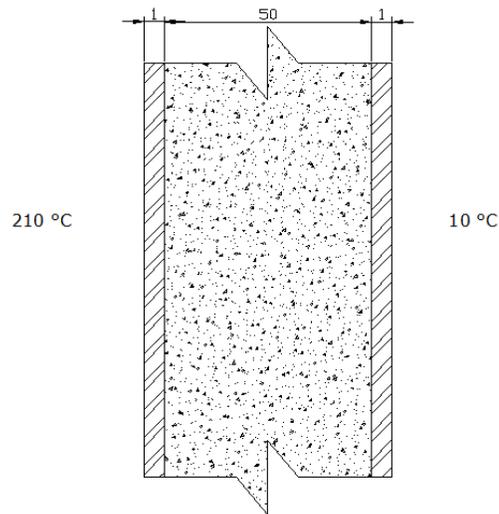


FIG. 3.8 Dimensiones de las paredes del horno

Para calcular la cantidad de calor que se pierde por conducción, convección y radiación al ambiente, se puede hacer una analogía eléctrica de resistencias térmicas. De esta analogía se obtiene el siguiente resultado gráfico:

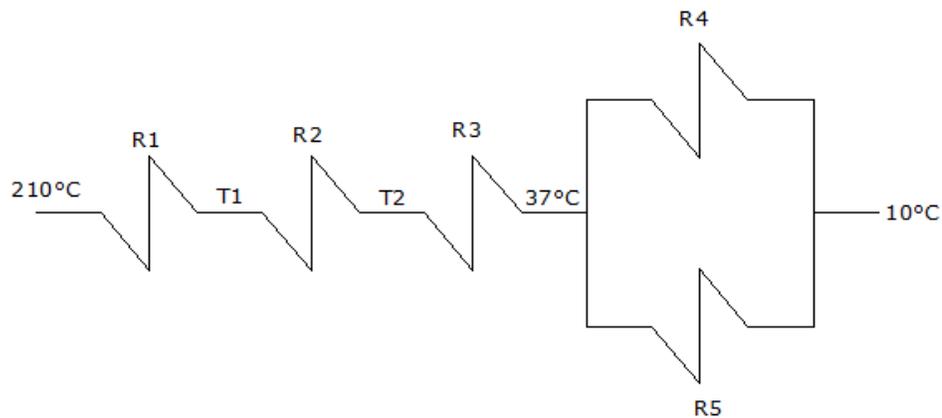


FIG. 3.9 Analogía eléctrica en las paredes del horno

En este gráfico R1 corresponde a la placa interior del horno, R2 al aislante térmico y R3 a la pared exterior del horno. R4 corresponde a la resistencia por convección al exterior del horno y finalmente R5 corresponde a la resistencia debido a la radiación.

Ya teniendo el esquema de las resistencias térmicas, se procede a calcularlas para conocer cuál es la cantidad de energía que se pierde en las paredes del horno.

Resistencias térmicas por conducción

Una resistencia térmica es una analogía a las resistencias eléctricas. La resistencia eléctrica puede ser definida como la oposición que presenta un cuerpo al paso de corriente. De la misma manera, una resistencia térmica se define como todo cuerpo que se opone al flujo de calor. Una resistencia térmica por conducción puede ser definida matemáticamente de la siguiente forma:

$$R_{cond} = \frac{L}{KA} \quad \text{Ec. (3.14) Resistencia térmica para la conducción}$$

Luego de haber definido matemáticamente a la resistencia térmica para la conducción, se calcularán las resistencias térmicas debido a la conducción. En la figura (3.9.) Las resistencias térmicas que se producen debido a la conducción son la R1, R2 y R3. A continuación serán calculadas estas tres resistencias térmicas.

Resistencia de las paredes interiores del horno (R1)

$$L := 0.001 \text{ m}$$

Espesor de la pared del horno

$$A1 := 2(2 \cdot 3 + 2 \cdot 2) \text{ m}^2$$

Área total de las paredes laterales y frontales del horno.

$$k := 48.8 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Conductividad térmica del acero al carbono

$$R1 := \frac{L}{k \cdot A1}$$

Resistencia térmica de la pared interior del horno

$$R1 = 1.02459 \times 10^{-6} \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

Resistencia del aislamiento térmico (R2)

$L := 0.0508 \quad \text{m}$ Espesor del aislante térmico

$k_v := 0.065 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ Conductividad térmica de la lana de vidrio

$R2 := \frac{L}{k \cdot A1}$ Resistencia térmica del aislante térmico

$$R2 = 7.81538 \times 10^{-2} \quad \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

Resistencia de las paredes exteriores del horno (R3)

$L := 0.001 \quad \text{m}$ Espesor de la pared del horno

$k := 58.7 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ Conductividad térmica del acero al carbono

$R3 := \frac{L}{k \cdot A1}$ Resistencia térmica de la pared exterior del horno

$$R3 = 1.70358 \times 10^{-6} \quad \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

Resistencias térmicas por convección y radiación

Luego de haber calculado las resistencias por conducción se deben calcular las resistencias debido a la convección (R4) y a la radiación (R5). Estas resistencias se definen de forma similar a la resistencia para la conducción. A continuación se especifican las ecuaciones para calcular las resistencias por convección y por radiación respectivamente.

$$R_{conv} = \frac{1}{hA} \quad \text{Ec. (3.15) Resistencia térmica para la convección}$$

$$R_{rad} = \frac{1}{h_r A} \quad \text{Ec. (3.16) Resistencia térmica para la radiación}$$

Nótese que para hallar los valores de las resistencias por convección y radiación se necesita conocer los coeficientes de transferencia de calor por

convección y radiación h y h_r respectivamente. Por lo tanto se tienen determinar los valores de estos coeficientes antes de calcular dichas resistencias térmicas.

Coefficiente de convección al exterior del horno (h_{ext})

El coeficiente de transferencia por convección al exterior del horno será calculado utilizando la teoría de la convección libre. Para este caso se utilizará una ecuación que se acopla al de una placa vertical que pierde calor por convección libre. La expresión es la siguiente:

$$Nu = 0.1 * Ra^{1/3} Ec. (3.17) \text{ Nusselt para una placa vertical}^{11}$$

Con la expresión anterior se calculará el valor adimensional de Nusselt para una placa vertical.

$g := 9.8 \frac{m}{s^2}$	Aceleración gravitacional
$\beta_{aire} := \frac{1}{T_{min}}$	Coefficiente de expansión volumétrica
$T_p := 37 \text{ } ^\circ\text{C}$	Temperatura superficial de la placa
$T_{min} = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$	Temperatura ambiental
$L := 2 \text{ m}$	Longitud característica para una placa vertical
$\nu_{aire} := 1.426 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$	Viscosidad cinemática del aire
$Pr := 0.7336$	
$k_{aire} := 0.02439$	

¹¹ CENGEL – BOLES; Transferencia de Calor; Ed. Mc Graw Hill

$$Ra := \frac{g \cdot \beta_{aire} \cdot (T_p - T_{min}) \cdot L^3}{\nu_{aire}^2} Pr \quad \text{Número de Raleigh}$$

$$Ra = 7.637 \times 10^{11}$$

$$Nu := 0.1 \cdot Ra^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu = 914.043$$

$$h_{ext} := \frac{k_{aire} \cdot Nu}{L} \quad \text{Coeficiente de transferencia de calor exterior al horno}$$

$$h_{ext} = 11.147 \quad \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$R_4 := \frac{1}{h_{ext} \cdot A_1} \quad \text{Resistencia térmica debida a la convección}$$

$$R_4 = 0.004 \quad \frac{K}{W}$$

Coeficiente de radiación al exterior del horno (h_r)

Ahora que ya se conoce el valor de la resistencia para la convección, se tiene que calcular la resistencia debida a la radiación, pero antes de eso se debe hallar el valor del coeficiente de radiación. Para ello se utilizará la siguiente ecuación:

$$h_r = \sigma \varepsilon \frac{(T_p^4 - T_{\infty}^4)}{T_p - T_{\infty}} \quad \text{Ec. (3.18) Coeficiente de radiación para una placa}$$

En base de esta expresión será calculado el coeficiente de transferencia de calor por radiación de la siguiente forma:

$$\sigma := 5.7 \cdot 10^{-8} \quad \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \quad \text{Constante de Stefan-Boltzman}$$

$$\varepsilon := 0.3 \quad \text{Emisividad del acero a } 27^\circ\text{C}$$

$$h_{r_v} := \sigma \cdot \varepsilon \cdot \frac{(T_p^4 - T_{min}^4)}{T_p - T_{min}} \quad \text{Coeficiente de transferencia de calor por radiación}$$

$$hr = 0.001 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$R5 := \frac{1}{hr \cdot A1} \quad \text{Resistencia debida a la radiación}$$

$$R5 = 42.35 \frac{K}{W}$$

Resistencia equivalente por radiación y convección

Como las resistencias por radiación y convección se encuentran en paralelo, es necesario hallar un equivalente de las dos que se pueda sumar en serie con el resto de resistencias térmicas. Al igual que en un circuito eléctrico, el inverso del equivalente de las resistencias en paralelo es igual a la suma de los inversos de las resistencias.

$$\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$$

Ec. (3.19) Resistencia equivalente de un sistema de resistencias en paralelo

Aplicando la ecuación (3.19) se obtiene lo siguiente:

$$Req := \frac{1}{\frac{1}{R4} + \frac{1}{R5}}$$

$$Req = 0.009 \frac{K}{W}$$

Resistencia total del sistema

Conociendo la resistencia equivalente del sistema, a éste se lo puede graficar de la siguiente forma:

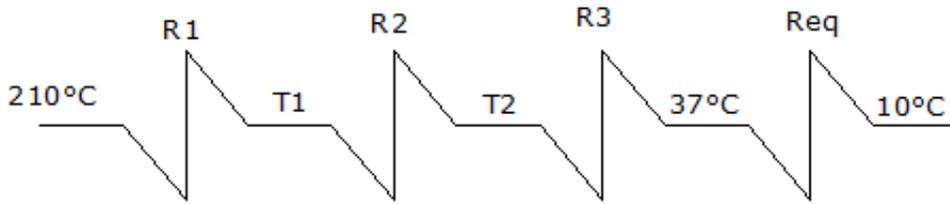


FIG. 3.10 Analogía eléctrica en las paredes del horno

La resistencia total de un sistema en serie se calcula sumando directamente todas las resistencias. Aplicando este concepto, se puede determinar la resistencia total.

$$R_{\text{tot.}} := R_{\text{eq}} + R1 + R2 + R3$$

$$R_{\text{tot.}} = 0.14$$

Coefficiente global de transferencia de calor

El coeficiente global es un valor que relaciona a todas las resistencias térmicas del sistema y al área de transferencia de calor total de la siguiente forma:

$$U := \frac{1}{R_{\text{tot}} \cdot A1} \quad \text{Ec. (3.20) Coeficiente global de transferencia de calor}$$

$$U = 1.148 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Calor perdido por las paredes laterales

Ya conociendo el área de transferencia de calor (A_i), el coeficiente global de transferencia de calor y la variación de la temperatura ($T_{\text{max}} - T_{\text{min}}$), se puede determinar el flujo de calor que pasa a través de las paredes del horno.

$$Q_p := \frac{U \cdot A1 \cdot (T_{\text{max}} - T_{\text{min}})}{1000}$$

$$Q_p = 4.017 \text{ kW}$$

Cálculo de pérdidas de energía en el techo del horno

Basándose en el mismo método utilizado para calcular el calor perdido se pueden calcular las pérdidas en el techo. A continuación se presenta el cálculo de pérdidas en el techo del horno.

Para este cálculo se puede usar como referencia la figura 3.9 para tener una idea de la analogía eléctrica de las resistencias térmicas. También serán utilizadas las ecuaciones (3.14) a la (3.20.)

Resistencia de las paredes interiores del horno (R1)

$$L := 0.001 \quad \text{m} \quad \text{Espesor de la pared del horno}$$

$$A1 := 2 \cdot 3 + 2 \cdot 2 \quad \text{m}^2 \quad \text{Área total de una pared lateral y una pared frontal.}$$

$$k := 48.8 \quad \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$R1 := \frac{L}{k \cdot A1} \quad \text{Resistencia térmica de la pared interior del horno}$$

$$R1 = 2.04918 \times 10^{-6} \quad \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

Resistencia del aislamiento térmico (R2)

$$L_2 := 0.0508 \quad \text{m} \quad \text{Espesor del aislante térmico}$$

$$k_2 := 0.065 \quad \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$R2 := \frac{L_2}{k_2 \cdot A_2} \quad \text{Resistencia térmica del aislante térmico}$$

$$R2 = 1.30256 \times 10^{-1} \quad \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

Resistencia de las paredes exteriores del horno (R3)

$$k_s := 58.7 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$R3 := \frac{L}{k \cdot A_t} \quad \text{Resistencia térmica de la pared exterior del horno}$$

$$R3 = 5.67859 \times 10^{-3} \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

Coefficiente de convección al exterior del horno (h_{ext})

$$g_s := 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad \text{Aceleración gravitacional}$$

$$\beta_{\text{aire}} := \frac{1}{T_{\text{min}}} \quad \text{Coeficiente de expansión volumétrica}$$

$$T_p := 37 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{Temperatura superficial de la placa}$$

$$T_{\text{min}} = 10 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{Temperatura ambiental}$$

$$L := 2 \text{ m} \quad \text{Longitud característica para una placa vertical}$$

$$\nu_{\text{aire}} := 1.426 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad \text{Viscosidad cinemática del aire}$$

$$Pr := 0.7336$$

$$k_{\text{aire}} := 0.02439$$

$$Ra_s := \frac{g_s \cdot \beta_{\text{aire}} \cdot (T_p - T_{\text{min}}) \cdot L^3}{\nu_{\text{aire}}^2} Pr \quad \text{Número de Raleigh}$$

$$Ra = 7.637 \times 10^{11}$$

$$Nu := 0.15 \cdot Ra^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu = 1371.065$$

$$h_{\text{ext}} := \frac{k_{\text{aire}} \cdot Nu}{L} \quad \text{Coeficiente de transferencia de calor exterior al horno}$$

$$h_{\text{ext}} = 16.72 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$R4 := \frac{1}{h_{ext} \cdot A_t}$$

$$R4 = 0.01 \quad \frac{K}{W}$$

Coeficiente de radiación al exterior del horno (h_r)

$$\sigma := 5.7 \cdot 10^{-8} \quad \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$$

Constante de Stefan-Boltzman

$$\varepsilon := 0.3$$

Emisividad del acero a 27°C

$$h_r := \sigma \cdot \varepsilon \cdot \frac{(T_p^4 - T_{min}^4)}{T_p - T_{min}}$$

$$h_r = 0.001 \quad \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$R5 := \frac{1}{h_r \cdot A_t}$$

Resistencia debida a la radiación

$$R5 = 141.167 \quad \frac{K}{W}$$

Resistencia equivalente por radiación y convección

$$Req := \frac{1}{\frac{1}{R4} + \frac{1}{R5}}$$

$$Req = 0.01 \quad \frac{K}{W}$$

Resistencia total del sistema

$$R_{tot.} := Req + R1 + R2 + R3$$

$$R_{tot.} = 0.146$$

Coefficiente global de transferencia de calor

$$U := \frac{1}{R_{\text{tot}} \cdot A_t}$$

$$U = 3.826 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Calor perdido por el techo del horno

$$Q_{\text{te}} := \frac{U \cdot A_t \cdot (T_{\text{max}} - T_{\text{min}})}{1000}$$

$$Q_{\text{te}} = 1.205 \text{ kW}$$

Cálculo de pérdidas de energía en el piso del horno

Antes de determinar la cantidad de calor que se pierde por el piso del horno, hay que mencionar que actualmente el piso de la cabina del horno no se encuentra aislado térmicamente. Por ello se hizo un cálculo previo tomando en cuenta una analogía eléctrica de la siguiente forma:

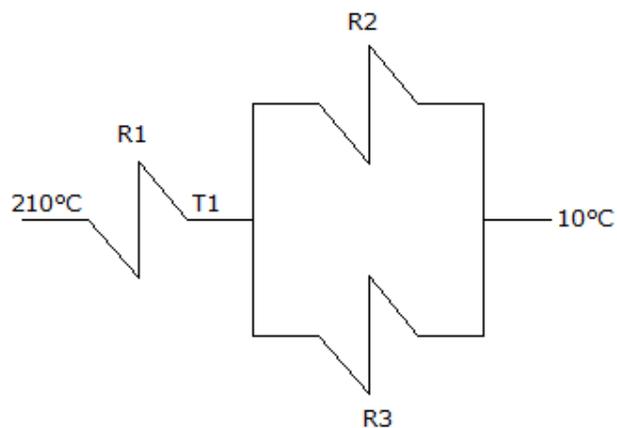


FIG. 3.11 Analogía eléctrica en el piso del horno

Siguiendo un procedimiento similar al anterior, se pudo determinar que la cantidad de calor que pierde el piso es el siguiente:

$$Q_{\text{pis}} := \frac{U \cdot A_t \cdot (T_{\text{max}} - T_{\text{min}})}{1000}$$

$$Q_{\text{pis}} = 21.696 \quad \text{kW}$$

Como se puede observar, la cantidad de calor que se pierde por el piso es muy elevada. Por lo tanto, se deberá aislar el piso del horno, con el fin de aumentar su eficiencia térmica. En el caso de que el piso sea aislado, la cantidad de calor que se perderá será igual a la del techo, ya que su modelo por resistencias térmicas es el mismo. En consecuencia, la cantidad de calor que se perderá por el piso será de 1.377 Kw, lo que permitirá ahorrar alrededor de 25 Kw de energía que se desperdician en el proceso actual del horno.

Potencia total requerida por el horno

En este punto del diseño ya se ha determinado la cantidad total de energía que se requiere para calentar la carga y además se conoce el flujo de calor que se pierde entre las paredes del horno y el ambiente. Con todos estos datos se puede determinar la potencia que requiere el horno. Con la finalidad de mantener un nivel de producción adecuado, se ha impuesto un tiempo de calentamiento del horno de 15 minutos (900 s). Partiendo de estas premisas y de los valores obtenidos previamente la potencia del horno se calcula de la siguiente manera.

Primero se determina la potencia requerida por la carga, el horno y el aire.

$$t := 900 \quad \text{s}$$

Tiempo de calentamiento del horno

$$Q_1 := \frac{Q_c + Q_{\text{pi}} + Q_t + Q_a}{t}$$

Flujo de calor a impartir al horno y a la carga

$$Q_1 = 63.799 \quad \text{kW}$$

Donde:

- t = Tiempo que se demora en calentarse el horno
- Q1 = Flujo de calor a impartir al horno y a la carga
- Qc = Energía que necesita la carga
- Q_{pi} = Energía requerida por las paredes interiores
- Q_t = Energía requerida por el piso y el techo del horno
- Q_a = Calor requerido por el aire dentro de la cabina del horno

Ya determinada la potencia que requiere el horno y la carga, hay que tomar en cuenta el flujo de calor que se transmite por las paredes del horno hacia el ambiente. La transferencia de calor desde el horno hacia el ambiente es la siguiente:

$$Q_2 := Q_p + 2Q_{te} \quad \text{El calor que se pierde por el techo es muy similar al que se perdería por el piso, por ello se duplica ese valor}$$

$$Q_2 = 6.427 \quad \text{kW}$$

Donde:

- Q2 = Flujo total de calor entre el horno y el ambiente
- Q_p = Flujo de calor perdido entre el horno y las paredes laterales, frontal y posterior
- Q_{te} = Flujo de calor perdido en el techo del horno

Nótese que el calor perdido por el techo se multiplica por dos ya que el piso será aislado de manera similar al techo. Por lo tanto el flujo de calor el piso será similar al del techo.

Conociendo la potencia requerida por el horno y las pérdidas, Q1 y Q2 respectivamente, se puede cuantificar el total de calor que necesita el horno para funcionar de forma adecuada al sumar Q1 y Q2.

$$Q_{\text{total}} := Q_1 + Q_2 \quad \text{Potencia total requerida por el sistema}$$

$$Q_{\text{total}} = 70.226 \quad \text{kW}$$

3.5.3. DISEÑO TÉRMICO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

Este equipo generalmente se utiliza para intercambiar calor entre dos fluidos a diferentes temperaturas; su objetivo principal es enfriar o calentar a uno de los fluidos ó calentar a los dos.

Su diseño se basa en un intercambiador de flujo cruzado mezclado, por los tubos circula aire caliente producido por la combustión del quemador y por la parte exterior circula libremente aire frío forzado que pasa perpendicularmente por el haz de tubos. Se dispone de un arreglo de tubos escalonado con la finalidad de aumentar la turbulencia aire y por ende aumenta el coeficiente global de transferencia de calor. Si el coeficiente global de transferencia de calor aumenta, el calor transferido por los tubos al aire será mayor.

Para el diseño del intercambiador es necesario realizar un proceso iterativo para encontrar el número de pasos, número de tubos, longitud, diámetro y cantidad de tubos. Es necesario ir modificando estas variables hasta encontrar el calor que necesitamos que produzca el intercambiador.

Para este caso se realizó cinco iteraciones después de las cuales se encontró los valores más fiables que se acoplan al diseño propuesto y de los cuales se obtuvo lo siguiente:

Los tubos a usar son ISO de 2", y sus características son:

$\phi_{ext} := 0.051$	m	Diámetro exterior de Tubo
$e := 0.002$	m	Espesor del Tubo
$\phi_{int} := \phi_{ext} - 2e$		
$\phi_{int} = 0.047$	m	Diámetro interior del Tubo
$N_{tl} := 4$		Numero de tubos en sentido longitudinal
$N_{tt} := 6$		Número de tubos en sentido transversal

Long := 0.9 m Longitud de los tubos

Np := 2 Número de pasos

Espaciado de los tubos

El espaciado de los tubos se caracteriza por el paso transversal **St**, el paso longitudinal **SL**, y el paso diagonal **Sd**, este espaciado depende de la configuración del arreglo de tubos que se tenga, para una configuración de tubos escalonados el espaciado recomendado es de $1 \frac{1}{4}$ del diámetro exterior del tubo.

St := 0.085 m Paso transversal

SL := 0.05 m Paso longitudinal

$$Sd := \sqrt{SL^2 + \left(\frac{St}{2}\right)^2}$$
 Paso diagonal

Sd = 0.066 m

Potencia del quemador

El quemador tiene una capacidad de 3 – 7 gal/hr, por cada galón quemado se produce 144000 BTU/hr. Con estos datos se obtendrá un valor aproximado de la temperatura de la cámara de combustión así como también del flujo másico de los gases de combustión.

Según recomendaciones del catálogo del quemador Wayne por cada 1000 pies de altura pierde un 2% de potencia el quemador, debido a que la Ciudad del Latacunga se encuentra cerca de los 9000 pies de altura se perderá un 18% de potencia en el quemador. Para este caso se usará una pérdida de potencia del 25% por motivos de seguridad en el cálculo. Esta pérdida de potencia es debido al que la presión atmosférica es menor a mayor altura y por

ende el aire es menos denso. Dicho en otras palabras en un mismo volumen de aire hay menos oxígeno.

Los quemadores disponen de diferentes tipos de boquilla, que permiten aumentar o disminuir la potencia del quemador, en este caso se usará una boquilla de 3.5 gal/hr, con lo cual se tiene una potencia nominal de 504000 BTU/hr, para de esta manera obtener una potencia real de 378000 BTU/hr.

$$\text{Pot}_{\text{nominal}} := 504000 \frac{\text{Btu}}{\text{hr}} \quad \text{Potencia nominal del quemador}$$

$$\text{Pot}_{\text{real}} := \text{Pot}_{\text{nominal}}^{0.75} \quad \text{Potencia real del quemador}$$

$$\text{Pot}_{\text{real}} = 378000 \frac{\text{Btu}}{\text{hr}}$$

Flujos máxicos

Una vez determinada la potencia real que tendrá el quemador se encontrará la masa de combustible que se requiere para este proceso. Para determinar esta masa de combustible se usará la siguiente ecuación:

$$P = C * m^o$$

Ec. (3.22) Potencia

Donde:

P = Potencia

C = Poder Calórico del Diesel = 43600 Btu/kg

m^o = Flujo máxico del Diesel

Despejando la ecuación 3.21 se tiene:

$$m^o_{\text{diesel}} := \frac{\text{Pot}_{\text{real}}}{C_{\text{diesel}}} \cdot \frac{1}{3600} \quad \text{Flujo máxico del diesel}$$

$$m^o_{\text{diesel}} = 2.408 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Para determinar el Flujo Másico del Aire se usará la Ecuación de la Relación Aire-Combustible E_c (3.5), con la cual se determinará la cantidad de aire que se necesita para el proceso. Despejando la masa de aire de esta ecuación se tiene:

$$m^{\circ}_{ac} := m^{\circ}_{diesel} \cdot R_{AC}$$

$$m^{\circ}_{ac} = 0.174 \quad \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad \text{Flujo másico del aire}$$

Una vez determinados los flujos másicos, se procederá a calcular la masa total de aire que circulará por los tubos del intercambiador. Esta masa total de aire se la calcula sumando el flujo másico del aire más el flujo másico del diesel.

$$m^{\circ}_{gtotal} := m^{\circ}_{ac} + m^{\circ}_{diesel} \quad \text{Flujo másico Total}$$

$$m^{\circ}_{gtotal} = 0.176 \quad \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Temperatura de salida de los gases de combustión

La temperatura de salida de los gases es muy importante cuando se diseña un intercambiador de calor, ya que si esta es muy alta significa que la eficiencia del intercambiador es baja. De acuerdo al cálculo realizado anteriormente la temperatura de flama adiabática es de 970 °K, con esta temperatura el calor específico del aire es:

$$Thi := 970 \quad ^{\circ}\text{K} \quad \text{Temperatura de flama adiabática}$$

$$Cp_g := 1.13 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad \text{Calor específica del aire @ 970}^{\circ}\text{K}$$

$$Qo := 70.226 \quad \text{kW} \quad \text{Potencia requerida por el horno}$$

$$Tho := Thi - \frac{Qo}{m^{\circ}_{gtotal} \cdot Cp_g} \quad \text{Temperatura de salida de los gases}$$

$$Tho = 617.366 \quad ^{\circ}\text{K}$$

Temperatura del aire posterior al paso por los tubos

Para una temperatura ambiente de 10°C ~ 283°K en la ciudad de Latacunga se tiene las siguientes propiedades:

$$C_{pa} := 1.007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad \text{Calor específico}$$

$$\rho_a := 1.16 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Densidad del aire}$$

Por efectos de la altura se debe corregir la densidad con la gravedad relativa del aire a los 2850 m.

$$G := 0.75 \quad \text{Gravedad relativa del aire}$$

Densidad corregida del aire

$$\rho_a = 0.87 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Usando la ecuación del Calor, se calcula la temperatura de salida del aire luego de pasar por el intercambiador de calor.

$$T_{ci} = 283 \text{ } ^\circ\text{K} \quad \text{Temperatura ambiente}$$

$$Q_o = 70.226 \quad \text{Potencia requerida por el Horno}$$

$$T_{co} := \frac{Q_o}{m_a^\circ \cdot C_{pa}} + T_{ci} \quad \text{Temperatura de salida del aire}$$

$$T_{co} = 325.547 \text{ } ^\circ\text{K}$$

Coeficientes de transferencia de calor

Se puede definir como la velocidad de transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido por unidad de área superficial por unidad de diferencia en la temperatura¹³.

Coeficiente de transferencia de calor externa (ho)

En la convección externa la transferencia de calor se da desde la superficie de los tubos hacia el flujo externo. Para realizar el cálculo del coeficiente de convección externa se calculará ciertos parámetros como Velocidad del aire, Número de Reynolds y Número de Nusselt.

Velocidad del aire

$$V_a^{\circ} := 4000 \quad \text{cfm} \quad \text{Caudal del ventilador}$$

$$V_a^{\circ} = 1.884 \quad \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$A_a = 0.616 \quad \text{m}^2 \quad \text{Área de flujo del aire}$$

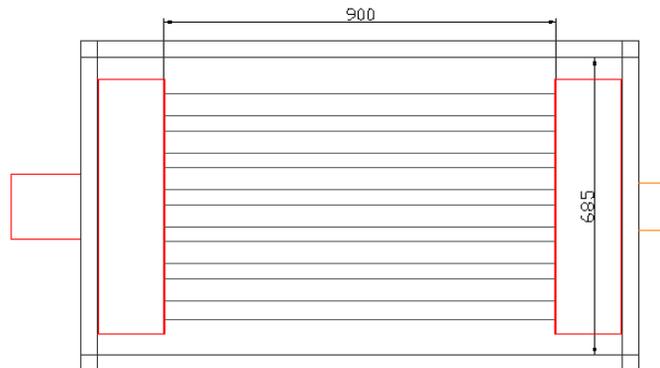


FIG. 3.12 Área de Flujo de Aire del Intercambiador de Calor

¹³ CENGEL – BOLES; Transferencia de Calor y Masa; Quinta Edición; México 2002

Una vez calculado área de flujo la velocidad del aire por el exterior de los tubos es la siguiente.

$$v_a := \frac{V_a^\circ}{A_a} \quad \text{Velocidad del aire}$$

$$v_a = 3.101 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Número de Reynolds

Es un numero adimensional que se utiliza para determinar la naturaleza del fluido, ya que puede ser un fluido laminar o turbulento.

El número de Reynolds máximo se fundamenta en la velocidad máxima del fluido que ocurre dentro del banco de tubos. Cuando se trata de una configuración escalonada la velocidad máxima ocurre en el plano transversal A1 o en el plano diagonal A2 como se muestra en la siguiente figura¹⁴:

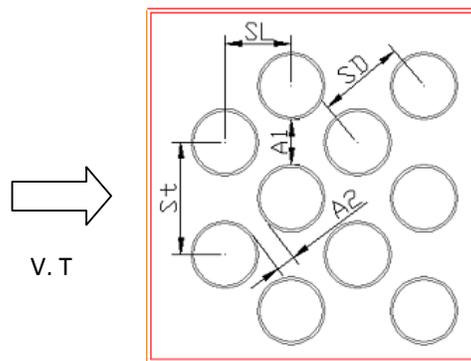


FIG. 3.13 Arreglo de Tubos en un banco Escalonado

Para determinar la velocidad máxima se debe asegurar en que plano ocurre esta, y para ello se comprueba de la siguiente manera.

Si entonces la velocidad máxima está en A2

¹⁴ INCROPERA – FRANK; Fundamentos de Transferencia de Calor, 4th edición; México 1999

Reemplazado los valores de los pasos resulta que la velocidad máxima ocurre en el plano diagonal A2, por lo que se usa la siguiente ecuación:

$$v_{\max} := \frac{St}{2(Sd - \phi_{\text{ext}})} \cdot v_a \quad \text{Ec. (3.23) Velocidad máxima}$$

$$v_{\max} = 9.014 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Donde:

- St = Paso transversal
- Sd = Paso diagonal
- ϕ_{ext} = Diámetro exterior de los tubos
- v_a = Velocidad del aire

Con la velocidad máxima se calcula el Reynolds máximo.

$$Re_a := v_{\max} \cdot \frac{\phi_{\text{ext}}}{v_a} \quad \text{Número de Reynolds máximo}$$

$$Re_a = 28930.926 \quad \text{Flujo turbulento completamente desarrollado}$$

Número de Nusselt

Es un número adimensional que mide el aumento de la transferencia de calor desde una superficie por la que un fluido circula (transferencia de calor por convección).

El flujo a través de bancos de tubos se estudia de forma experimental ya que es muy complejo evaluarlo de forma analítica, por este motivo Zukauskas desarrolló una ecuación general para el número de Nusselt, la misma que los valores de C, m y n depende del valor del Número de Reynolds. Es importante señalar que esta ecuación se la usa para configuraciones mayores a 16 filas, si este no fuera el caso se debe multiplicar por un factor de corrección **F** que se determina según la configuración del banco de tubos y el número de filas.

$$Nu_D = C * Re_D^m * Pr^n * \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0.25}$$

Ec. (3.24) Número de Nusselt promedio para flujo cruzado en banco de tubos.

Todas las propiedades que intervienen en la ecuación se deben evaluar a la temperatura media del aire que circula por el exterior del intercambiador, excepto Pr_s que se la debe evaluar a la Temperatura superficial **TS** de la pared del tubo.

Para este caso como se tiene un Reynolds de 28930.926 y configuración escalonada, la ecuación a usar se muestra a continuación.

Propiedades a la temperatura media del aire de 300°K

$\rho_a := 0.882$	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Densidad del Aire
$Cp_a := 1.007$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$	Calor específico
$k_a := 26.3 \cdot 10^{-3}$	$\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$	Conductividad Térmica
$Pr_a := 0.707$		Número de Prandtl
$Pr_s := .694$		Número de Prandtl @ 280°C = TS

$$Nu_g := 0.35 \cdot \left(\frac{St}{SL}\right)^{0.2} \cdot Re_a^{0.6} \cdot Pr_a^{0.36} \cdot \left(\frac{Pr_a}{Pr_s}\right)^{0.25} \quad \text{Ec. (3.25) Número de Nusselt para Reynolds entre } 1000 - 2 \times 10^5$$

$$Nu_g := 163.98$$

Corrigiendo el Nusselt se tiene lo siguiente:

$$F = 0.96 \quad \text{Factor de corrección para 8 filas}$$

$$Nu_g = F \cdot Nu_g$$

$$Nu_g = 157.417$$

Conociendo el valor del Número de Nusselt se determina el coeficiente de transferencia de calor externo.

$$h_o := \frac{Nu_g \cdot k_a}{\phi_{ext}} \quad \text{Ec. (3.26) Coeficiente de transferencia de calor externo}$$

$$h_o = 81.178 \quad \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Coeficiente de transferencia de calor interno (hi)

Para calcular el coeficiente de transferencia de calor interno se debe determinar el área de flujo, la velocidad de los gases de combustión, el número de Reynolds y el de Nusselt.

Velocidad de los gases de combustión

Para este caso el área de flujo es el área interna de todos de los tubos por el cual circulan los gases de combustión.

$$A_g = 0.042 \quad m^2 \quad \text{Área de flujo de los gases de combustión}$$

Con el área de flujo se calcula la velocidad de los gases de la siguiente forma.

$$V_g^\circ = 0.495 \quad \frac{m^3}{s} \quad \text{Caudal de los gases de combustión}$$

$$v_g := \frac{V_g^\circ}{A_g} \quad \text{Velocidad de los gases de combustión}$$

$$v_g = 11.881 \quad \frac{m}{s}$$

$$Re_g := v_g \cdot \frac{\phi_{int}}{v_g} \quad \text{Número de Reynolds}$$

$$Re_g = 7311.703 \quad \text{Flujo turbulento}$$

Número de Nusselt

Como se trata de convección interna forzada el Número de Nusselt será calculado por los métodos de convección en tubos circulares sometidos a flujo turbulento. A este caso es aplicable la ecuación de Gnielinski la misma que según datos experimentales nos arroja un error menor al 10%.

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12.7 \cdot \left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad \begin{array}{l} (0.5 \leq Pr \leq 2000) \\ (3 \times 10^3 < Re < 5 \times 10^6) \end{array}$$

Ec. (3.27) Número de Nusselt convección interna forzada

Las propiedades termo físicas se deben determinar a la Temperatura media de los gases de combustión 750 °K y son las siguientes.

$$\rho_g := 0.361 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Densidad de los Gases de Combustión}$$

$$Cp_g := 1.087 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad \text{Calor específico de los Gases de Combustión}$$

$$k_g := 54.9 \cdot 10^{-3} \quad \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad \text{Conductividad Térmica de los Gases de Combustión}$$

$$Pr_g := 0.702 \quad \text{Número de Prandtl}$$

El factor f que se encuentra en la ecuación (3.27) es el factor de fricción para tubos para lo cual usamos la ecuación de Colebrook, con lo cual se determinará el factor de fricción para tubos ISO.

$$\varepsilon := 0.00015 \quad \text{mm} \quad \text{Aspereza para tubos comerciales}$$

$$f := \frac{1}{\left[-1.8 \cdot \log \left[\frac{6.9}{Re_g} + \left(\frac{\varepsilon}{\phi_{int} \cdot 3.7 \cdot 1000} \right)^{1.11} \right] \right]^2} = 0.034 \quad \text{Ec. 3.28 Factor de fricción}$$

Reemplazando los datos calculados anteriormente en la ecuación (3.27) se obtiene el valor del Nusselt.

$$Nu_i = 23.121$$

Con este valor el coeficiente de transferencia de calor interno es:

$$h_i := Nu_i \cdot \frac{k_g}{\phi_{int}} \quad \text{Coeficiente de transferencia de calor por convección en la parte interna de los tubos.}$$

$$h_i = 26.393 \quad \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Cálculo de la diferencia media logarítmico de temperaturas

La Diferencia Media Logarítmica de Temperaturas se obtiene siguiendo el perfil real de las temperaturas de los fluidos a lo largo del intercambiador y es una representación exacta de la diferencia de temperaturas promedio entre los fluidos caliente y frío.¹⁵

Con la ecuación que se muestra a continuación se calcula de diferencia media logarítmica de temperaturas, pero es importante señalar que es aplicable para intercambiadores de flujo paralelo o contraflujo, como en este caso se trata de un intercambiador de calor de flujo cruzado se debe multiplicar el LMTD por un factor de corrección, el cual se lo determina en base el *Anexo A*

$$LMTD := \frac{(Th_o - Tc_i) - (Th_i - Tc_o)}{\ln \left[\frac{(Th_o - Tc_i)}{(Th_i - Tc_o)} \right]} \quad \text{Ec. (3.29) Diferencia media logarítmica de temperaturas}$$

$$LMTD = 472.574 \quad ^\circ(K)$$

Donde:

- Th_o = Temperatura de salida de los Gases de Combustión
- Tc_o = Temperatura de salida del aire al pasar por el intercambiador
- Tc_i = Temperatura ambiente del aire
- Th_i = Temperatura de Flama Adiabática

¹⁵ CENGEL – BOLES; Transferencia de Calor y Masa; Quinta Edición; México 2002

Para encontrar el factor de corrección se determina las razones P y R entre dos temperaturas que se definen como:

$$P := \frac{T_{ho} - T_{hi}}{T_{ci} - T_{hi}} \quad P = 0.513$$

$$R := \frac{T_{ci} - T_{co}}{T_{ho} - T_{hi}} \quad R = 0.121$$

Con estos valores se ingresa en el *Anexo A* y se obtiene el factor de corrección **F_c**.

$$F_c := 1 \quad \text{Factor de corrección de LMTD}$$

$$\text{LMTD}_C := F_c \cdot \text{LMTD} \quad \text{LMTD corregida}$$

$$\text{LMTD}_C = 472.57 \quad ^\circ(\text{K})$$

Coefficiente global de transferencia de calor

Como se dijo anteriormente en un intercambiador de calor se relacionan dos fluidos que fluyen separados por una pared sólida. El calor de los gases de combustión se transfiere hacia la pared de los tubos del intercambiador por *convección*, después a través de las paredes de los tubos por *conducción* y finalmente desde la pared de los tubos hacia el fluido frío que circula por el exterior intercambiador por *convección*.

Las resistencias que intervienen en este proceso son dos resistencias por convección y una por conducción, como se muestra en la figura.

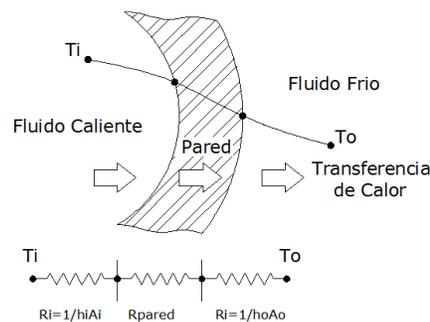


FIG. 3.14 Analogía eléctrica en un tubo

Para analizar intercambiadores de calor es necesario relacionar todas las resistencias térmicas que se encuentran en la trayectoria de la transferencia de calor, desde el fluido frío hasta el fluido caliente, para de esta manera expresar la razón de la transferencia de calor.

$$U_o := \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{\phi_{ext}}{2kt} \cdot \ln\left(\frac{\phi_{ext}}{\phi_{int}}\right) + \frac{\phi_{int}}{\phi_{ext} \cdot h_i} + r_{fo}}$$

Ec. (3.30) Coeficiente Global de Transferencia de Calor

Donde:

- U_o = Coeficiente Global de Transferencia de Calor
- h_o = Coeficiente de Convección externo
- h_i = Coeficiente de Convección Interno
- ϕ_{int} = Diámetro interior del tubo
- ϕ_{ext} = Diámetro exterior del tubo
- K_t = Constante de Conductividad Térmica del tubo
- r_{fo} = Factores de obstrucción

K_t:= 60 Conductividad térmica del acero A36

r_{fo} := 0.0004 Factor de obstrucción

$$U_o := \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{\phi_{ext}}{2kt} \cdot \ln\left(\frac{\phi_{ext}}{\phi_{int}}\right) + \frac{\phi_{int}}{\phi_{ext} \cdot h_i} + r_{fo}} = 20.97 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Calor transferido por el intercambiador de calor

Para determinar el calor que transfiere el intercambiador se usará la ecuación de la Ley de Newton del enfriamiento.

$$Q = U_o * A_{tc} * LMTD_c \quad \text{Ec. (3.31) Calor Transferido}$$

$$A_{tc} := \pi \cdot \phi_{ext} \cdot Long \cdot N_{tt} \cdot N_{tl} \cdot N_p$$

Área de Transferencia de Calor

$$A_{tc} = 6.922 \quad m^2$$

$$Q := U_o \cdot A_{tc} \cdot \frac{LMTD_c}{1000}$$

Calor Transferido por el Intercambiador

$$Q = 68.61 \quad kW$$

Calor transferido desde la cámara de combustión

Es importante tomar en cuenta el calor que está en capacidad de transmitir la cámara de combustión al aire para no sobredimensionar el intercambiador de calor, ya que normalmente el calor que transmiten las cámaras es una cantidad importante de calor.

Para calcular la cantidad de energía que transfiere la cámara de combustión, también conocida como hogar, se utilizará el método de cálculo empírico de Hilpert, ya que éste método que da una aproximación de las condiciones globales que son las que interesan para aplicaciones de ingeniería.

Las dimensiones de la cámara de combustión son las siguientes.

$$\phi_{cc} := 0.35 \quad m$$

Diámetro de la cámara de combustión

$$L_{cc} := 1.2 \quad m$$

Largo de la cámara de combustión

Velocidad de flujo

$$A_{fcc} = 0.39 \quad m^2$$

Área de flujo

$$v_{cc} := \frac{V_a}{A_{fcc}}$$

Velocidad de flujo

$$v_{cc} = 4.831 \quad \frac{m}{s}$$

Número de Reynolds

$$Re_{cc} := v_{cc} \cdot \frac{\phi_{cc}}{v_a}$$

Número de Reynolds

$$Re_{cc} = 106404.60$$

Flujo turbulento completamente desarrollado

La Temperatura superficial de la cámara de Combustión es de 638 °K con un Prandtl de ($Pr_s = 0.69$).

Número de Nusselt

$$C := 0.027$$

$$m := 0.805$$

$$n := 0.37$$

$$Nu_{cc} := C \cdot Re_{cc}^m \cdot Pr_a^n \cdot \left(\frac{Pr_a}{Pr_s} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Constantes de la ecuación de Hilbert

$$Nu_{cc} = 266.069$$

Ec. (3.32) Ecuación de Hilbert

Coefficiente de convección

$$h_{cc} := \frac{k_a \cdot Nu_{cc}}{\phi_{cc}}$$

$$h_{cc} = 19.993 \quad \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Calor trasferido por la cámara

$$Q_{cc} := \frac{h_{cc} \cdot \pi \cdot \phi_{cc} \cdot L_{cc} \cdot (T_s - T_{cm})}{1000}$$

Ec. (3.33) Calor Transferido por el hogar

$$Q_{cc} = 8.781 \quad kW$$

Calor total transferido por el intercambiador de calor

El Calor Total Transferido por el Intercambiador de Calor es la suma del Calor Transferido por la Cámara mas el Calor Transferido por el Intercambiador.

$$Q_{\text{total}} := Q_{\text{CC}} + Q$$

$$Q_{\text{total}} = 77.396 \quad \text{kW}$$

Como se puede ver el calor que va a transferir el intercambiador de calor es de 77.396 KW, y lo que requiere el horno es de 70.226 KW, con lo cual se puede demostrar que el intercambiador de calor cumple con los requerimientos de calor que necesita el el horno para funcionar de forma adecuada.

Caída de presión en el intercambiador de calor

La caída de presión ΔP en un banco de tubos es muy importante, ya que determina la resistencia que ofrecen los tubos al flujo. Esta diferencia de presiones se da entre las presiones de admisión y la salida del banco de tubos. La caída de presión se calcula con la siguiente ecuación.

$$\Delta P = N_{tl} \cdot N_p \cdot f \cdot X \cdot \left(\frac{\rho \cdot V_{\text{max}}^2}{2} \right)$$

Ec. (3.34) Caída de presión en un banco de tubos

Donde:

N_{tl} = Número de tubos en sentido longitudinal

N_p = Número de pasos

f = Factor de fricción

X = Factor de Corrección

ρ = Densidad

V_{max} = Velocidad máxima

Los valores de X y f se obtienen de la gráfica del *Anexo B*

$$X := 1$$

$$f = 0.035$$

$$\Delta P := N_t \cdot N_p \cdot f \cdot X \cdot \left(\frac{\rho_a \cdot V_{\max}^2}{2} \right)$$

$$\Delta P = 100.33 \text{ Pa}$$

3.6. EFICIENCIA TÉRMICA DEL HORNO

Según la segunda ley de la termodinámica, el flujo de calor en un proceso puede seguir una sola dirección. Por ejemplo, un proceso de calentamiento de un horno genera pérdidas de temperatura que se van hacia el ambiente circundante que está a menor temperatura que el horno, pero no puede suceder el proceso contrario. Es decir, el aire a menor temperatura, no puede perder calor para que el horno se caliente. Por lo tanto, la eficiencia térmica en cualquier proceso térmico no puede ser mayor que 1 o lo que es lo mismo, no puede ser mayor al 100%.

Se sabe que la eficiencia térmica de un sistema responde a la siguiente ecuación:

$$\eta_{ter} = \frac{Q_{util}}{Q_{total}}$$

Ec. (3.35) Eficiencia térmica

Conociendo esta ecuación se tienen los siguientes datos:

$$V^{\circ}_H := 3.25 \text{ GPH} \quad \text{Cantidad de combustible quemada.}$$

$$Q_H := 137.8 \text{ kW} \quad \text{Energía generada por el quemador}$$

$$Q_U := 19 \text{ kW} \quad \text{Calor necesario para tratar las piezas}$$

Con todos estos datos se puede determinar la eficiencia térmica del sistema.

$$\eta := \frac{Q_U}{Q_H} \cdot 100 \quad \text{Eficiencia térmica}$$

$$\eta = 13.788 \quad \%$$

El resultado de la eficiencia térmica que se ha obtenido es lógico a pesar de que puede parecer algo bajo. Esto se da porque existen pérdidas en todas las paredes del horno. Además, se calientan las paredes internas del horno, lo que no produce ningún resultado beneficioso para la producción. Adicionalmente, el quemador pierde alrededor del 20% de su energía debido a la altura a la que se encuentra la ciudad de Latacunga.

3.7. PRESIÓN REQUERIDA POR EL SISTEMA

El sistema de transporte y circulación de aire caliente debe ser dimensionado adecuadamente con el fin de generar un flujo continuo de aire que permita mantener una temperatura uniforme en el horno, y que genere suficiente convección para tratar a la pintura. Para esto se tiene que determinar la presión que debe generar el ventilador para vencer todas las obstrucciones. Los principales obstáculos que tiene que vencer el ventilador son los siguientes:

- Caídas de presión en ductos.
- Caída de presión en el intercambiador de calor
- Efecto chimenea generado por diferencia de temperaturas en la cabina

A continuación se presenta el cálculo de pérdidas de presión con la finalidad de determinar la presión estática que debe ser generada por el ventilador.

3.7.1. PÉRDIDAS DE PRESIÓN

La caída de presión en ductos será calculada según el método de la fricción igual de la norma ASHRAE. Este método toma en cuenta que existe una pérdida uniforme por fricción por unidad de longitud de ducto. Este método puede ser utilizado en este caso ya que se tienen longitudes relativamente cortas de ductos.

Para estimar las pérdidas en ductos se deben estimar las pérdidas por fricción y las pérdidas dinámicas. Las pérdidas por fricción se deben al rozamiento que existe entre el aire y las paredes de los ductos. Estas pérdidas pueden ser establecidas según figuras presentadas en el ASHRAE Handbook indicada en el *Anexo C*. Por otro lado, las pérdidas dinámicas se generan en los accesorios y se encuentran en función de la velocidad del aire. A continuación se estima el valor de las pérdidas por fricción y dinámicas de los ductos.

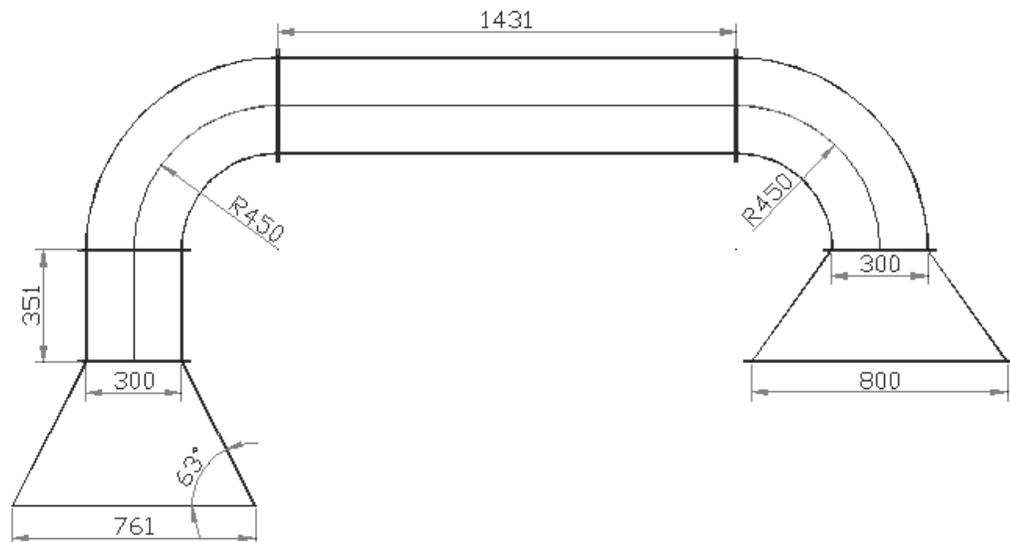


FIG. 3.15 Dimensiones de los ductos de aire

Pérdidas por fricción:

Los datos con los que se cuenta para determinar las pérdidas por fricción son los siguientes:

$$A_h := 6 \text{ m}^2 \quad \text{Área transversal del horno}$$

$$v := 0.3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{Velocidad de los gases}$$

$$V^\circ := A_h \cdot v \quad \text{Flujo volumétrico requerido}$$

$$V^\circ = 1.8 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$A := 0.3 \cdot 0.5 \text{ m}^2 \quad \text{Área transversal de los ductos}$$

$$A = 0.15 \text{ m}^2$$

$$v := \frac{V^\circ}{A} \quad \text{Velocidad del aire en los ductos}$$

$$v = 12 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Se tiene que determinar también el diámetro equivalente de los ductos.

$$a := 0.3 \text{ m} \quad \text{Longitudes de los ductos}$$

$$b := 0.5 \text{ m}$$

$$De := \frac{1.3 \cdot (a \cdot b)^{\frac{5}{8}}}{(a + b)^{\frac{1}{4}}} \quad \text{Ec. (3.36) Diámetro equivalente en ductos}$$

$$De = 0.42 \text{ m}$$

Con todos los datos que se tienen se puede determinar la caída de presión por cada cien metros de longitud (h_L) según la figura del *Anexo C*.

$h_L := 4.5 \frac{\text{Pa}}{\text{m}}$	Caída de presión por cada 100 m de longitud
$L := 1.78 \text{ m}$	Longitud total de los ductos
$H_L := \frac{h_L \cdot L}{100}$	Caída total de presión en el sistema
$H_L = 0.08 \text{ Pa}$	

Ahora que ya se ha determinado la caída total de presión por fricción, se calcula la caída de presión dinámica. Las pérdidas dinámicas en accesorios se calculan con coeficientes multiplicados por la presión de velocidad. La presión de velocidad se expresa según la siguiente ecuación.

$$H_v := \left(\frac{v}{1.289} \right)^2 \quad \text{Ec. (3.37) Presión de velocidad}$$

$$H_v = 86.668 \text{ Pa}$$

Conociendo la presión de velocidad, se pueden determinar las pérdidas en acoplamientos. Para determinar los coeficientes se ha utilizado la tabla mostrada en el *Anexo D*.

Pérdidas en los codos

$$C1 := 0.17$$

$$H_{L1} := 2C1 \cdot H_v$$

$$H_{L1} = 29.467 \text{ Pa}$$

Pérdidas en el difusor

Dentro de la bibliografía consultada no se ha podido encontrar un método de cálculo para pérdidas en difusores, por ello se recurrió a distribuidores especializados como MEGAFRIO S.A. donde se determinó que para un difusor similar al requerido por el sistema y que trabaja con el mismo caudal, se tiene una caída de presión aproximada de 0.4" w.c.

$$V^{\circ} := 6480 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

$$H_i := 600 \text{ mm} \quad \text{Altura nominal de la rejilla}$$

$$L := 900 \text{ mm} \quad \text{Anchura nominal de la rejilla}$$

$$H_{L2} := 23 \quad \text{Pa}$$

Caída de presión en el intercambiador de calor

La caída de presión en el intercambiador ya fue determinada previamente, obteniendo el siguiente valor

$$H_{iC} := 100.33 \quad \text{Pa}$$

3.7.2. PRESIÓN DEBIDA AL EFECTO CHIMENEA

En el horno van a existir diferencias de temperaturas en los gases, principalmente cuando el sistema sea arrancado. Debido a la diferencia de temperaturas en corrientes de aire a diferentes temperaturas se genera un efecto conocido como efecto chimenea, el cual genera una diferencia de presiones entre las corrientes de aire. Esta presión tiene que ser vencida por el ventilador para que todo el aire pueda circular en el sistema. La presión generada por el efecto chimenea se puede determinar según la siguiente ecuación:

$$\Delta p = (\rho_2 - \rho_1)g \cdot h \quad \text{Ec. (3.38) Presión debida al efecto chimenea}$$

Donde:

Δp = Variación de presión entre las corrientes de aire fría y caliente

ρ_2 = Densidad del aire frío

ρ_1 = Densidad del aire caliente

g = Aceleración gravitacional

h = Altura del horno

Ahora se aplica la ecuación tomando en cuenta las condiciones más desfavorables para este caso que es cuando el horno recién arranca. Para esto asumiremos que el aire caliente se encuentra aproximadamente a 200°C y el aire frío está a 10°C. Partiendo de esto, tenemos los siguientes datos:

$$\rho_2 := 1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_1 := 0.746 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

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

$$h := 2 \text{ m}$$

$$\Delta p := (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot h \quad \text{Presión debida al efecto chimenea}$$

$$\Delta p = 9.388$$

Conociendo todas las caídas de presión del sistema y la presión que se tiene que vencer debido al efecto chimenea, se puede calcular la presión total que debe ser generada por el ventilador.

Presión total requerida por el sistema.

$$H_{\text{tot}} := H_L + H_{L1} + H_{L2} + H_{iC} + \Delta p$$

$$H_{\text{tot}} = 162.27 \text{ Pa}$$

Transformando la caída total de presión pulgadas de agua se tiene lo siguiente:

$$H_{\text{tot1}} := \frac{H_{\text{tot}}}{249.09}$$

$$H_{\text{tot1}} = 0.651 \text{ "w.c.}$$

3.7.3. SELECCIÓN DEL VENTILADOR

Los factores que determinan la selección de un ventilador son normalmente el caudal, la presión, la velocidad y la potencia con la que funciona el ventilador. Estos parámetros se determinan en función de los requerimientos del sistema a ser ventilado.

Para casos donde las condiciones de selección del ventilador no son estándar (21 °C y 760 mmHg) se tienen que efectuar correcciones. A continuación se selecciona el ventilador en función de las condiciones a las que va a funcionar.

Determinación de la gravedad específica

La gravedad específica se calcula en función de la altura sobre el nivel del mar que se encuentra el sistema y de la temperatura a la que se encuentra el sistema.

Según datos tomados del North American Combustion Handbook, se determinaron los siguientes valores para la gravedad específica.

$G_1 := 0.75$ Gravedad específica para la altura de Latacunga

$G_2 := 0.61$ Gravedad de gas a 200 °C

$G := G_1 \cdot G_2$ Gravedad específica corregida por altura y temperatura

$G = 0.458$

La presión estática equivalente corregida por altura y temperatura se determina dividiendo la presión estática requerida por el sistema para el factor de corrección G .

$P := 1.4$ "wc Presión requerida por el sistema

$P_c := \frac{P}{G}$ Ec. (3.39) Presión estática equivalente

$P_c = 3.06$

Conociendo el caudal que es de 4000 cfm y la presión corregida, se tiene que entrar a la tabla característica del ventilador *Anexo E* con el fin de obtener la potencia y la velocidad necesaria.

Luego de entrar a la tabla se han obtenido los siguientes valores de potencia y velocidad del ventilador.

Potencia requerida: 3.01 HP

Velocidad requerida: 1865 RPM

3.8. DISEÑO DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN

En la actualidad la automatización es de suma importancia para el funcionamiento de cualquier máquina, debido que facilita la operación de las máquinas mediante el uso de sistemas computarizados.

Para la automatización de este proyecto se usará un Controlador Lógico programable PLC, el mismo que leerá las entradas a través de sensores y en base al programa que se encuentra cargado en el mismo, este generará salidas hacia los actuadores. Para con ello controlar de forma precisa el proceso con el cual debe trabajar el horno.

3.8.1. DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES DE CONTROL

Para determinar las variables de control a continuación se da una breve explicación del proceso de funcionamiento del horno.

1. Mediante el accionamiento de un selector de dos posiciones se enciende el ventilador y el quemador, esto se lo debe realizar para evitar que el material del hogar supere los 700°C y el acero inoxidable empieza a perder sus propiedades.
2. El quemador debe elevar la temperatura del aire hasta los 180°C y se apagará.
3. Los 180°C se deben mantener durante 10 minutos (corresponde al tiempo de curado de la pintura), por lo que si la temperatura baja de los 180°C el quemador deberá encenderse para mantener la temperatura de curado.

4. Posterior a los 10 minutos empieza el tiempo de enfriamiento del horno el valor de este tiempo es de 15 minutos, ya que es necesario refrigerar tanto la carga que se encuentra dentro del horno así como también el hogar del intercambiador de calor.
5. Al concluir con este tiempo el ciclo debe llegar a su fin.
6. Si existiere el caso de que el horno vuelva a ser cargado se deberá reiniciar el ciclo manualmente.

Con la explicación detallada anteriormente las variables de control que demanda el proceso de curado de pintura electrostática son las siguientes.

- Tiempo (De calentamiento y de enfriamiento)
- Temperatura.

3.8.2. DETERMINACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN Y SU UBICACIÓN.

3.8.2.1. Sensores

Los sensores que se utilizarán son determinados en base a las variables de control que demanda el proceso.

Sensor de Temperatura

Para la selección del sensor de temperatura se tomará en cuenta los siguientes aspectos:

- Rango de Temperatura: 0 – 300 °C
- Costo
- Linealidad
- Acondicionamiento

Existen algunos tipos de sensores de temperatura que dan el rango de temperatura requerido, por lo cual se presenta una matriz de ponderación para la selección del sensor.

Tabla 3.4. Matriz de ponderación de sensores de temperatura

ASPECTOS	PONDERACIÓN	RTD	TEMOCUPLA	TERMISTOR
Costo (economía)	40	20	40	40
Rango de temperaturas	20	20	20	20
Linealidad	20	20	18	10
No necesidad de acondicionamiento	20	20	10	5
PUNTUACION TOTAL	100	80	88	75

Las termocuplas son la opción más útil y económica para esta aplicación por los siguientes aspectos:

- Son más económicos que los otros sensores de temperatura comparados en la tabla 3.4.
- Su rango de temperaturas está dentro de lo que se necesita para el funcionamiento del horno 200°C.
- La termocupla nos da una señal análoga, pero por medio de un controlador de temperatura se la transformará en señal digital. El controlador de temperatura es mucho más económico que un acondicionador de señal.

Con lo anteriormente expuesto se seleccionó una termocupla tipo J cuyas características se muestran a continuación:

Tabla 3.5. Características Termocupla Tipo J

Termopar :	Tipo J
Rango Temperatura:	-200 – 700 °C
Precisión:	1%
Recubierto:	Acero inoxidable
Composición:	Hierro – Cobre y Níquel

La ubicación de la termocupla será en las esquinas o puntos fríos del horno ya que en estos puntos tomará más tiempo llegar a la temperatura deseada. Con ellos se puede tener la certeza que en todos los puntos del horno se tendrá una temperatura homogénea.

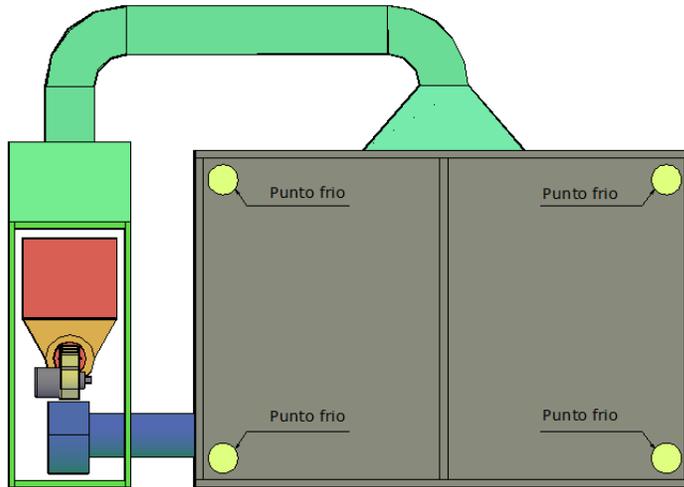


FIG. 3.16 Puntos Fríos del Horno

3.8.2.2. Actuadores y Pre-Actuadores

La selección de actuadores se determina en función de las acciones que el proceso necesita cumplir. Para este caso los actuadores usados son el Quemador y el motor del ventilador, pero dichas acciones deben ser controladas por pre-actuadores, en este caso Relés.

Quemador

El quemador fue seleccionado en función de las características que se detallan a continuación:

- Potencia: 504 000 BTU/hr (mayor que 3 GPH)
- Marca
- Precio
- Disponibilidad en el mercado

El quemador seleccionado tiene las siguientes características:

Tabla 3.6. Características del Quemador

Marca:	Wayne
Capacidad:	3 – 6 GPH
Revoluciones de la bomba:	3450 RPM
Control:	15 segundos con una célula de cadmio
Ignición:	10000 V transformador de trabajo constante
Motor:	¼ HP , 3450 RPM , 115 V/ 60Hz



FIG. 3.17 Quemador Wayne

Motor Eléctrico

La selección del motor se la realizó en base al cálculo de la selección del ventilador obteniéndose los siguientes valores en cuanto a potencia y velocidad del motor.

- Potencia requerida: 3.01 HP
- Velocidad requerida: 1865 RPM

Debido a los requerimientos de la parte contratante de optar por la marca SIEMENS para el motor, es necesario señalar que en el mercado Ecuatoriano no existen motores trifásicos con las características requeridas, por lo que las características del motor adquirido van por cuenta de la parte contratante. Las características del motor adquirido son las siguientes:

Tabla 3.7. Características del motor

Marca:	SIEMENS
Tipo:	Trifásico
Revoluciones:	1662 RPM
Potencia:	3 HP
Voltaje:	230 $\Delta\Delta$ / 400YY/ 460 Δ V
Amperaje:	9.2 / 5.3 / 4.6 A
Frecuencia:	60 Hz
Eficiencia:	74.5
FP:	0.82



FIG. 3.18 Motor eléctrico Siemens

Relés

Para el control de los dos actuadores se usará dos relés el uno para el quemador y el otro para el motor eléctrico

La selección de Relés se las realizó considerando los siguientes aspectos:

Tabla 3.8. Consideraciones para selección de relés

VARIABLE	QUEMADOR	MOTOR
Voltaje de operación	110 V	230 V
Amperaje	7 A	9 A
Disponibilidad en el mercado		

Relé para el Quemador

Como se mencionó anteriormente el quemador cuenta con un motor eléctrico de ¼ HP, con un máximo de 7A, y una entrada de voltaje de 110 V, por lo que el relé necesario para esta aplicación tiene las siguientes características.

Tabla 3.9. Características Relé del quemador

Marca:	SSASIN
Modelo:	3SR8-D1312
Cantidad:	1 Relés
Tipo:	Electromecánico de armadura
Rango de ajuste de intensidad:	7 – 10 A
Frecuencia:	50 – 60 Hz
Voltaje:	Hasta 660 V
Conexión:	Instalación de acople en contactor

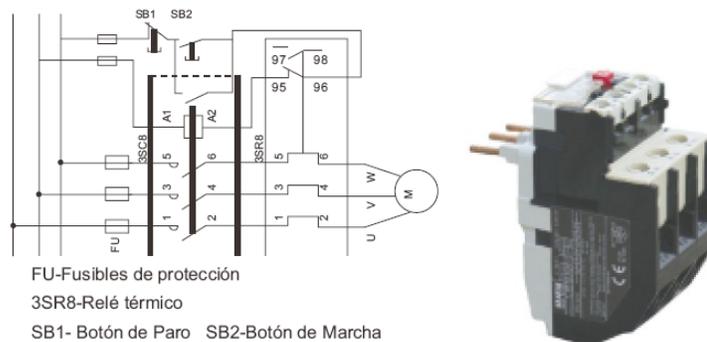


FIG. 3.19 Diagrama de conexiones del Relé

Relé para el Motor Eléctrico

En base a las características de placa del motor eléctrico el relé seleccionado es el siguiente.

Tabla 3.10. Características Relé del Motor Eléctrico

Marca:	SSASIN
Modelo:	3SR8-D1314
Cantidad:	1 Relés
Tipo:	Electromecánico de armadura
Rango de ajuste de intensidad:	9 – 13 A
Frecuencia:	50 – 60 Hz
Voltaje:	Hasta 660 V
Conexión:	Instalación de acople en contactor

3.8.3. DETERMINACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

Como mencionamos anteriormente se usará un Programador Lógico Programable para el control del horno por las facilidades de operación que se les puede dar a los trabajadores del Centro de Producción, así como también por la flexibilidad que se tiene al momento de cambiar de control o el de reconfigurarlo completamente.

3.8.3.1. Hardware

Programador Lógico Programable

Para evaluar el controlador lógico programable que cumpla con las expectativas de funcionamiento se deben considerar los siguientes aspectos:

- Número de entradas: 1
- Número de salidas: 2
- La alimentación de corriente necesaria: 110 Voltios
- La capacidad de memoria que se necesita.
 - Dispositivos de comunicación.
 - Facilidad de programación
 - Precio del controlador.
 - Marca
 - Disponibilidad en el mercado.

Para seleccionar el tipo de PLC aplicable, se realizará una matriz de ponderación con la cual se tomará la mejor selección del tipo de programador requerido.

Las alternativas que tenemos son:

- A. Micro PLC TELEMECANIQUE SR2 A
- B. Micro PLC SIEMENS LOGOS 230 RC

Tabla 3.11. Matriz de ponderación del PLC

ASPECTOS	PONDERACION	ALTERNATIVAS	
		A	B
Número de I/O	15	15	15
Alimentación	15	15	15
Memoria	10	10	10
Dispositivos de comunicación	10	10	10
Facilidad de programación	10	10	10
Precio	20	20	10
Marca	10	10	10
Disponibilidad	10	10	10
PUNTUACION TOTAL	100	100	90

Podemos decir que los dos PLC tienen las mismas características, pero lo que marca la diferencia entre los dos es el precio. El precio del PLC TELEMECANIQUE es de 150 dólares, mientras que el SIEMENS es de 250 dólares y en cuanto a calidad las dos marcas son muy buenas.

El PLC seleccionado para esta aplicación es el TELEMECANIQUE SR2 A el cual tiene las siguientes características:

Tabla 3.12. Características del PLC

Marca:	TELEMECANIQUE
Modelo:	SR2 A
Referencia:	SR2B121FU
Número de I/O:	12
Número de entradas discretas:	8
Voltaje de entradas:	100 – 240V
Número de salidas:	4
Voltaje de salidas	5V -12V
Software de Programación:	Zelio Soft 2 V4.3
Conexión:	USB 01

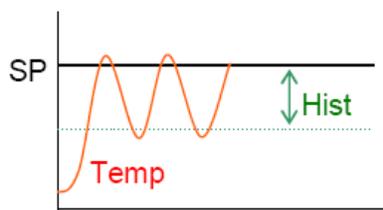
Controlador de Temperatura

Debido a que el PLC, no tiene entradas análogas es necesario usar un controlador de temperatura, el mismo que lee entradas análogas de la termocupla y las convierte en salidas digitales.

El control de este dispositivo requiere dos parámetros:

1. Set point [SP] (Temperatura deseada)
2. Histéresis (Banda muerta)

La histéresis en el rango de temperatura en el que el control no cambia el estado de las salidas. Cuando la temperatura del horno sea mayor o igual a la temperatura deseada la salida se desconectará (estado normal), y cuando sea menor que la SP se conectará (estado activo). Cuando la temperatura se mantenga dentro del ancho de histéresis conservará su estado.



. FIG. 3.20 Histéresis del controlador de temperatura

Las características del pirómetro seleccionado son las siguientes:

Tabla 3.13. Características del controlador de temperatura

Marca:	PTC
Rango de medición:	-50 a 600 °C
Precisión:	0.5%
Tiempo de refresco de salida:	1 segundo
Tipo de termocupla:	Tipo J
Indicación digital:	3 dígitos
Tipo de Entrada:	Análoga
Tipo de Salida	Digital

3.8.3.2. Software

El software de programación del PLC Zelio SR2, permite programar la aplicación en lenguaje BDF o en lenguaje de contactos (Ladder). Para programar mediante el software, es necesario que se haya establecido una conexión con el PC. Dicha conexión se debe realizar en el puerto serie del PC por medio de un cable SR2CBL01.

El manejo del software es muy sencillo, al momento de ejecutar el programa aparecerá la ventana siguiente:

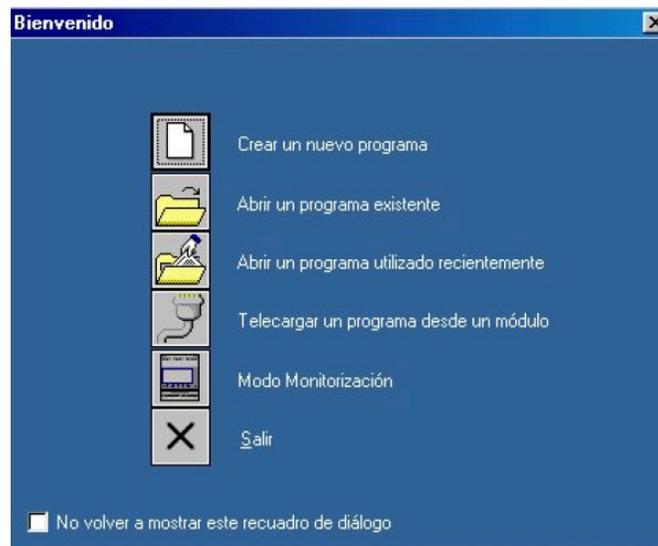


FIG. 3.21 Ventana de Presentación del Zelio Soft

En esta ventana se selecciona **Crear un nuevo programa**, y si ya arrancó el software en el menú del programa se puede seleccionar **Nuevo**. Posterior a este paso aparece la siguiente ventana para seleccionar el módulo lógico.

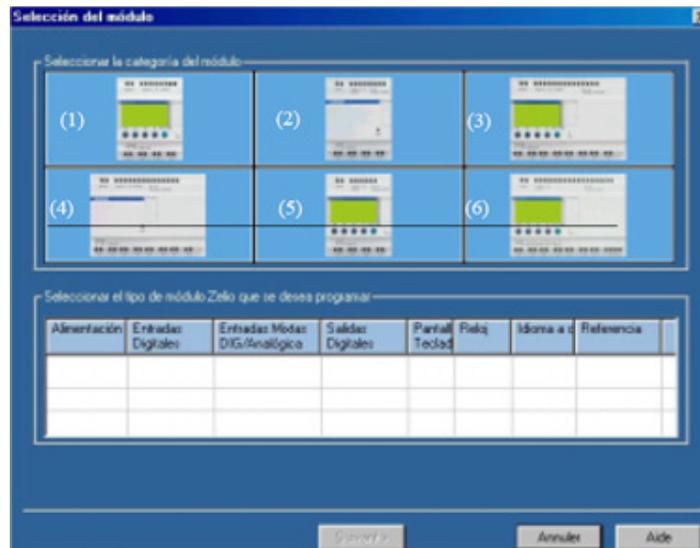


FIG. 3.22 Selección del módulo en el Zelio Soft

Hacemos clic en la categoría (1), y buscamos el PLC en la lista que se despliega, para nuestro caso con la siguiente referencia SR2B121FU, y damos clic en siguiente.

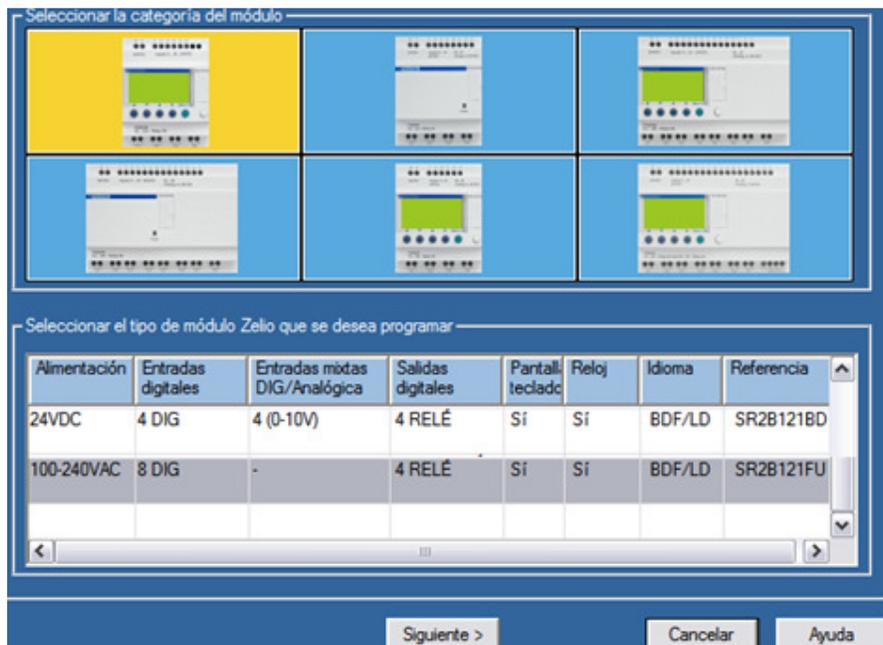


FIG. 3.23 Selección de la categoría del módulo en el Zelio Soft

Una vez seleccionada la categoría del módulo seleccionamos el tipo de programación que vamos a realizar, seleccionamos **Ladder**



FIG. 3.24 Selección del tipo de programación en el Zelio Soft

En esta pantalla que se muestra a continuación es donde se realiza la introducción del programa.

El esquema de programación está dividido en columnas que permiten distinguir el tipo de bloque que se va a colocar. Las columnas en color amarillo están reservadas a los contactos, la sexta columna en azul para la bobina de salida y la última para la introducción de comentarios relacionados con cada una de las filas. Las líneas punteadas que se tiene en el esquema se las utiliza para conectar las funciones entre las diferentes columnas y con ello desempeñar las funciones lógicas elementales O e Y.

Para la creación de un bloque se seleccione el tipo de bloque situándose en el icono correspondiente de la parte inferior de la hoja.

Los bloques que se tiene son los siguientes:



FIG. 3.25 Bloques de programación

- | | |
|------------------------------|--|
| 1. Entrada I Digital | 8. Comparador analógico |
| 2. Botón de la parte frontal | 9. Reloj semanal |
| 3. Relé auxiliar M | 10. Monitor de operación |
| 4. Salida Q | 11. Luz de fondo |
| 5. Temporizador | 12. Cambio de horario de verano/invierno |
| 6. Contador | |
| 7. Comparador de contador | |

Las líneas de programación desarrolladas en el software son las que se muestran a continuación.

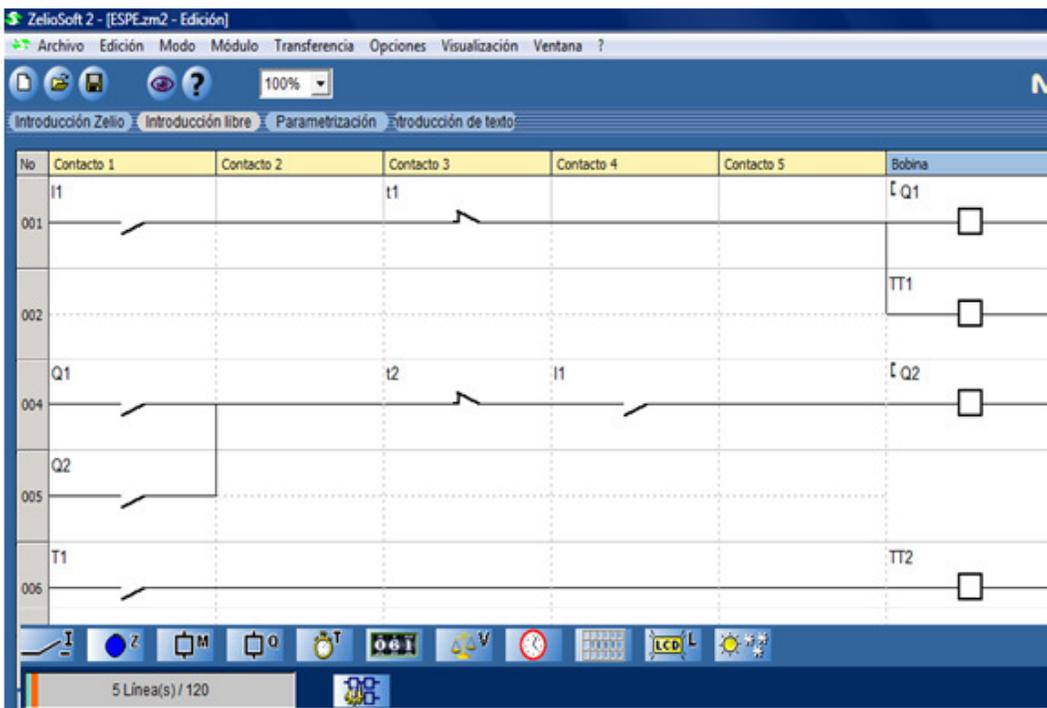


FIG. 3.26 Diagrama de Programación

Nota: El diagrama de fuerza del sistema de control se encuentra en el Anexo I

CAPÍTULO 4

CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE

4.1. DIAGRAMAS DE PROCESOS

Luego de haber finalizado el diseño de todos los elementos, se tiene que planificar la construcción de los mismos. Para este fin, se ha decidido utilizar una herramienta conocida como diagramas de procesos. Los diagramas de procesos permiten determinar la secuencia de un proceso en general de una forma sencilla con determinada simbología. A continuación se indica el significado de cada uno de los elementos que serán utilizados en los diagramas de procesos.

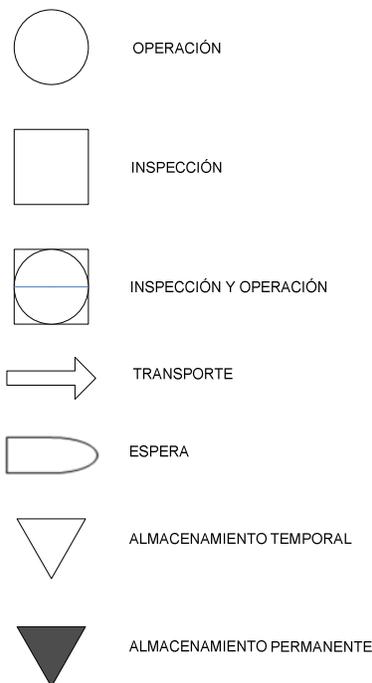


FIG. 4.1 Simbología Utilizada en los Diagramas de Procesos

Conociendo la simbología que será utilizada en los diagramas, se presentan a continuación los diagramas de proceso para la construcción de los elementos que forman parte del horno.

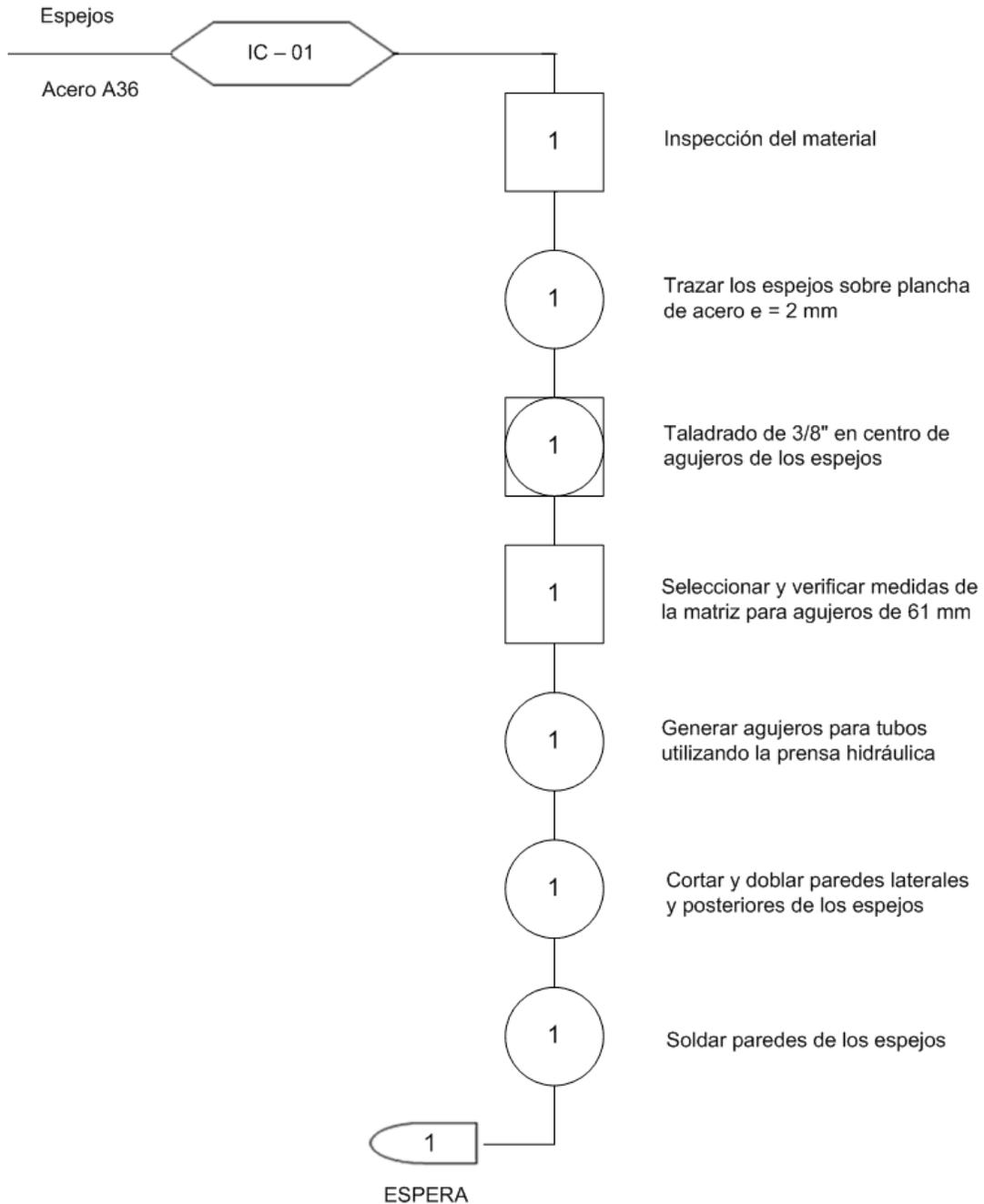


FIG. 4.2 Proceso de Construcción de los Espejos del Intercambiador

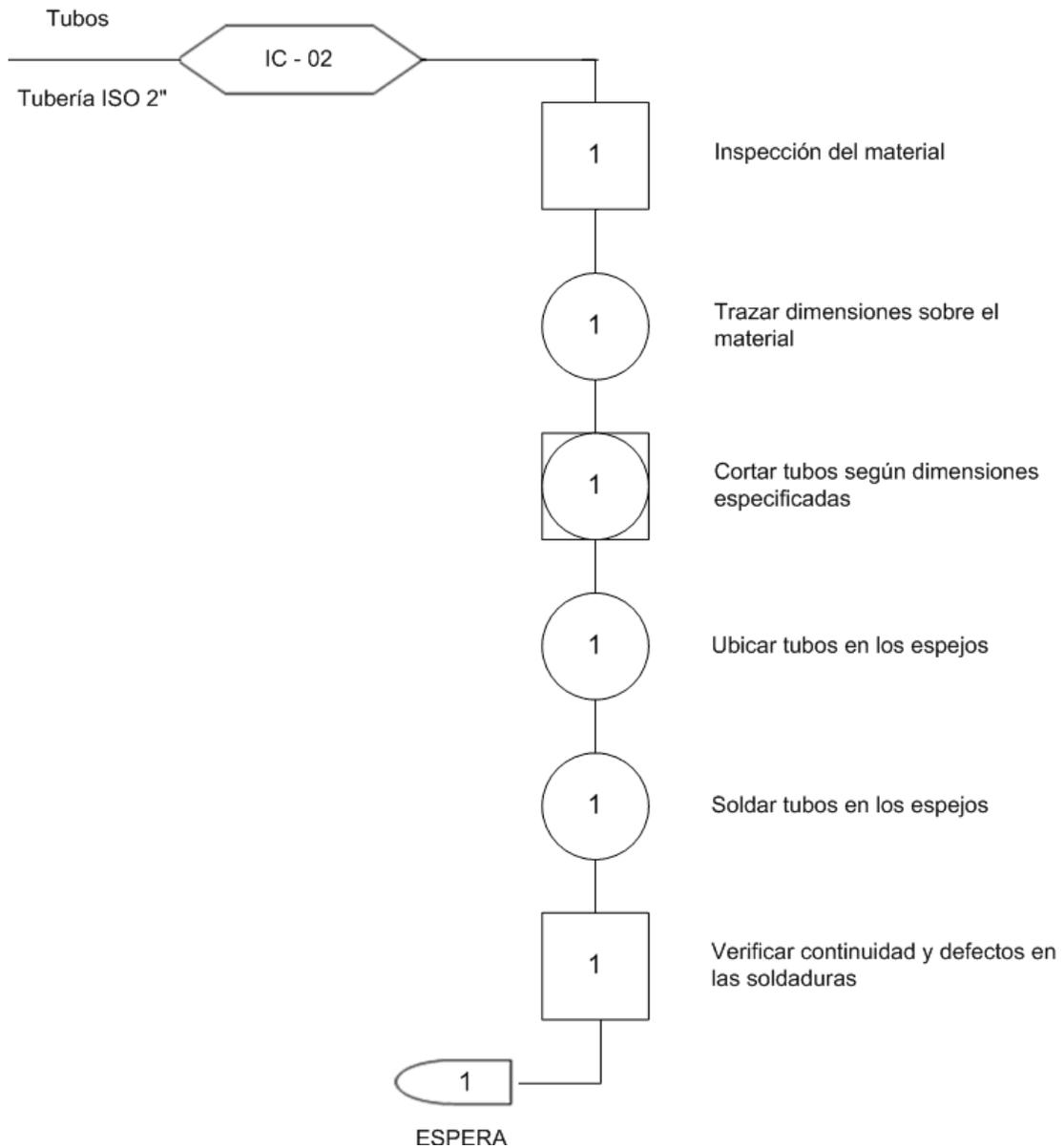


FIG. 4.3 Proceso de Montaje de los Tubos en los Espejos del Intercambiador

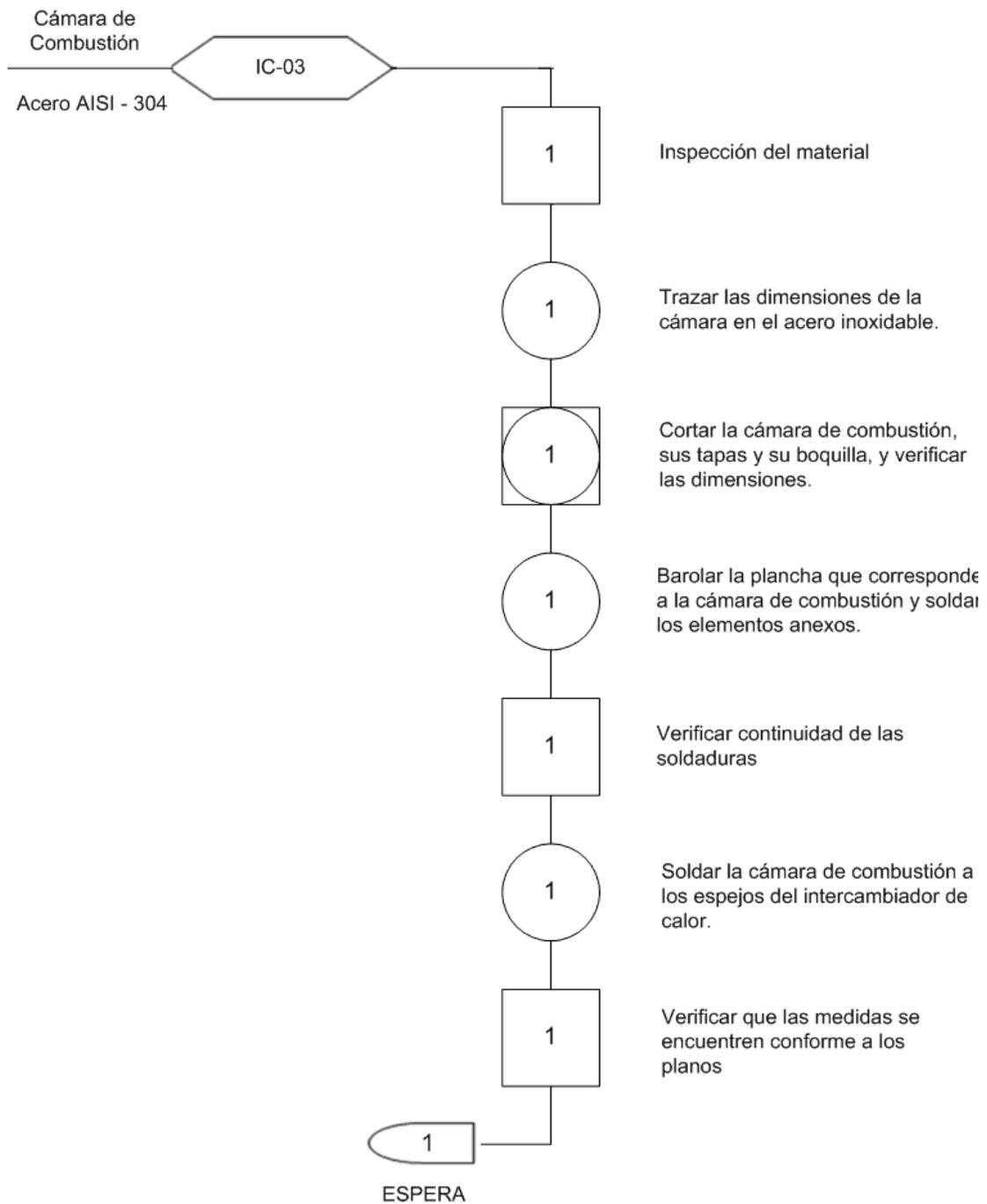


FIG. 4.4 Proceso de Construcción y Montaje de la Cámara de Combustión

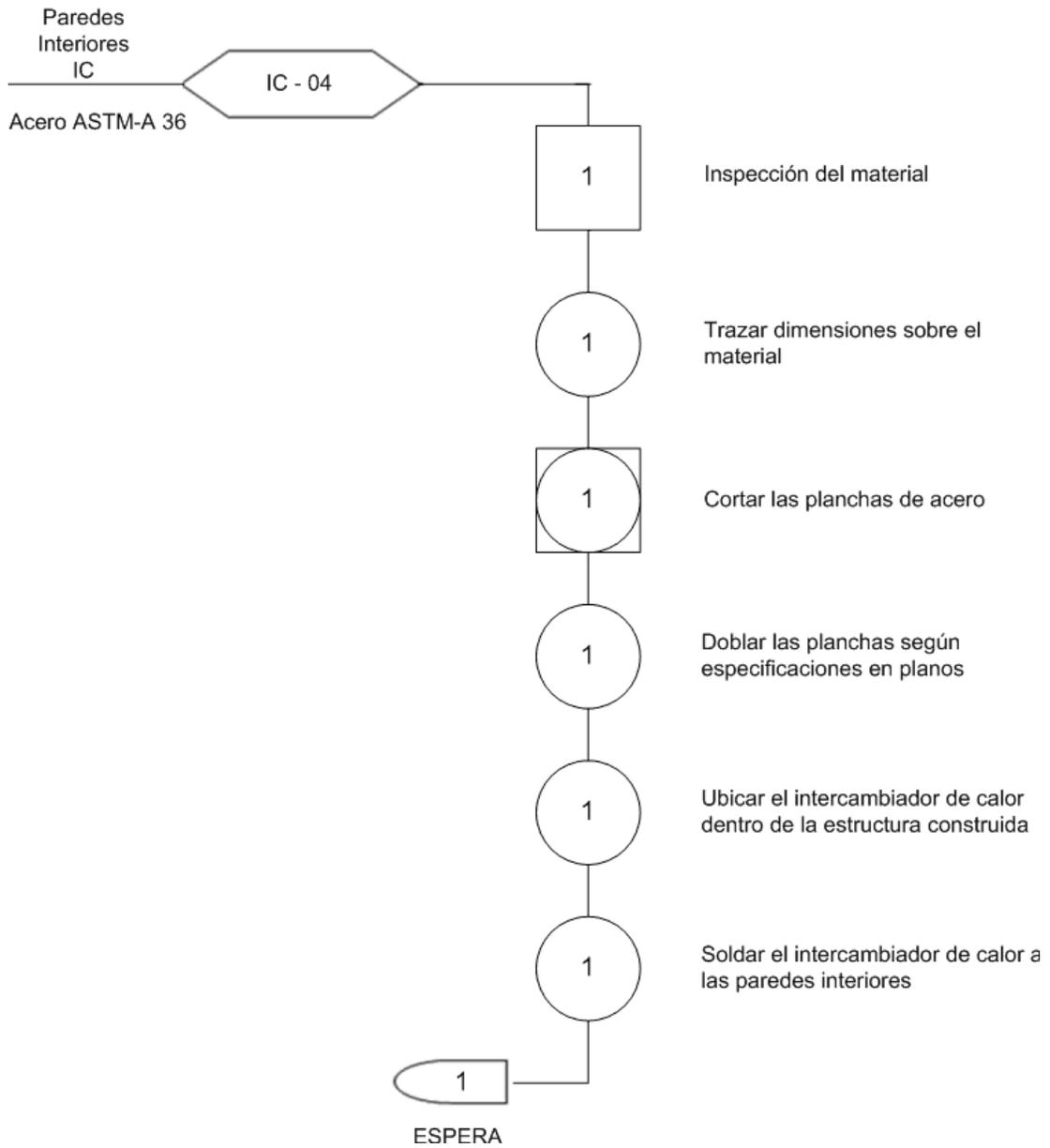


FIG. 4.5 Proceso de Construcción y Montaje de las Paredes Interiores

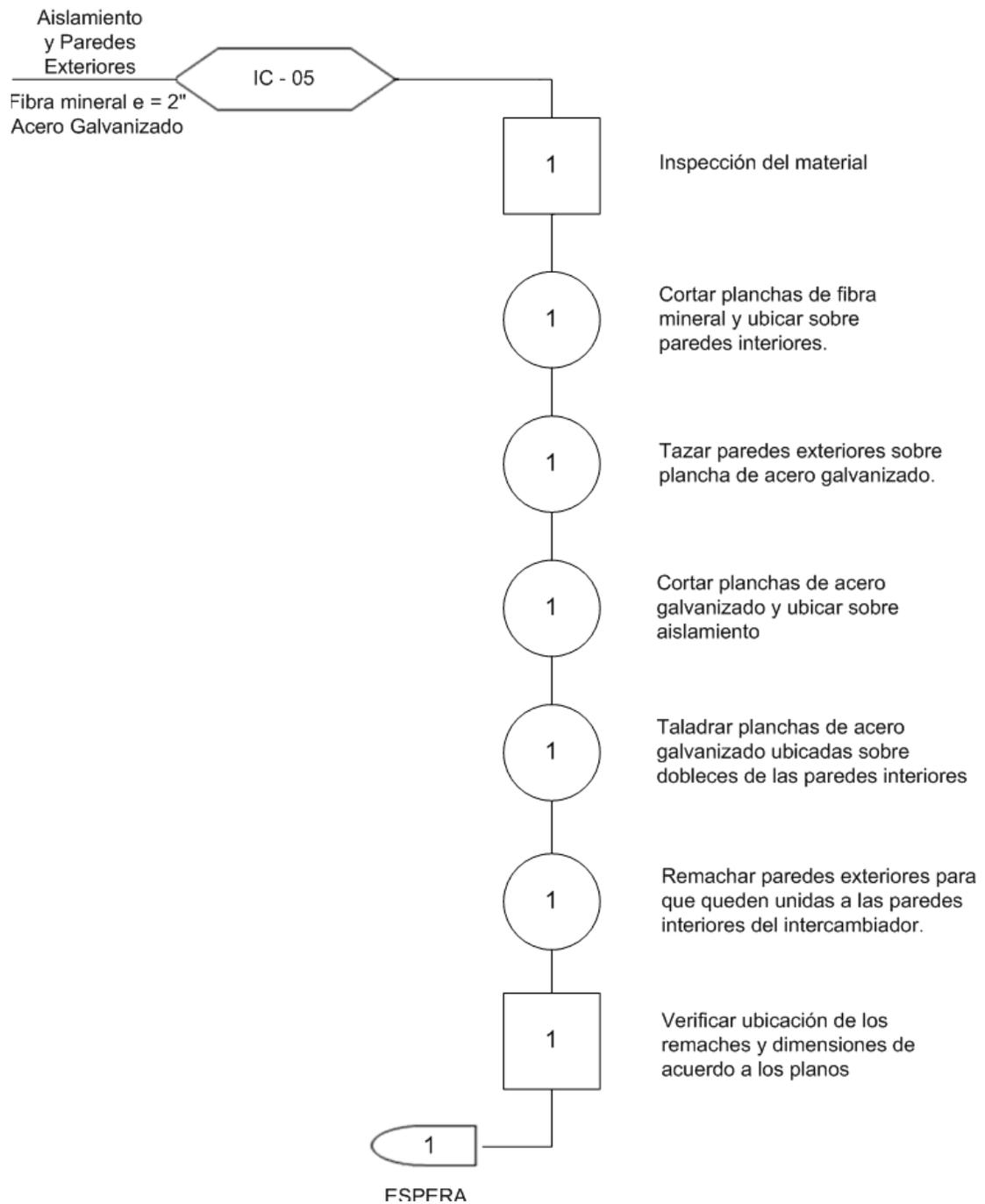


FIG. 4.6 Proceso de Construcción y Montaje de las Paredes Exteriores

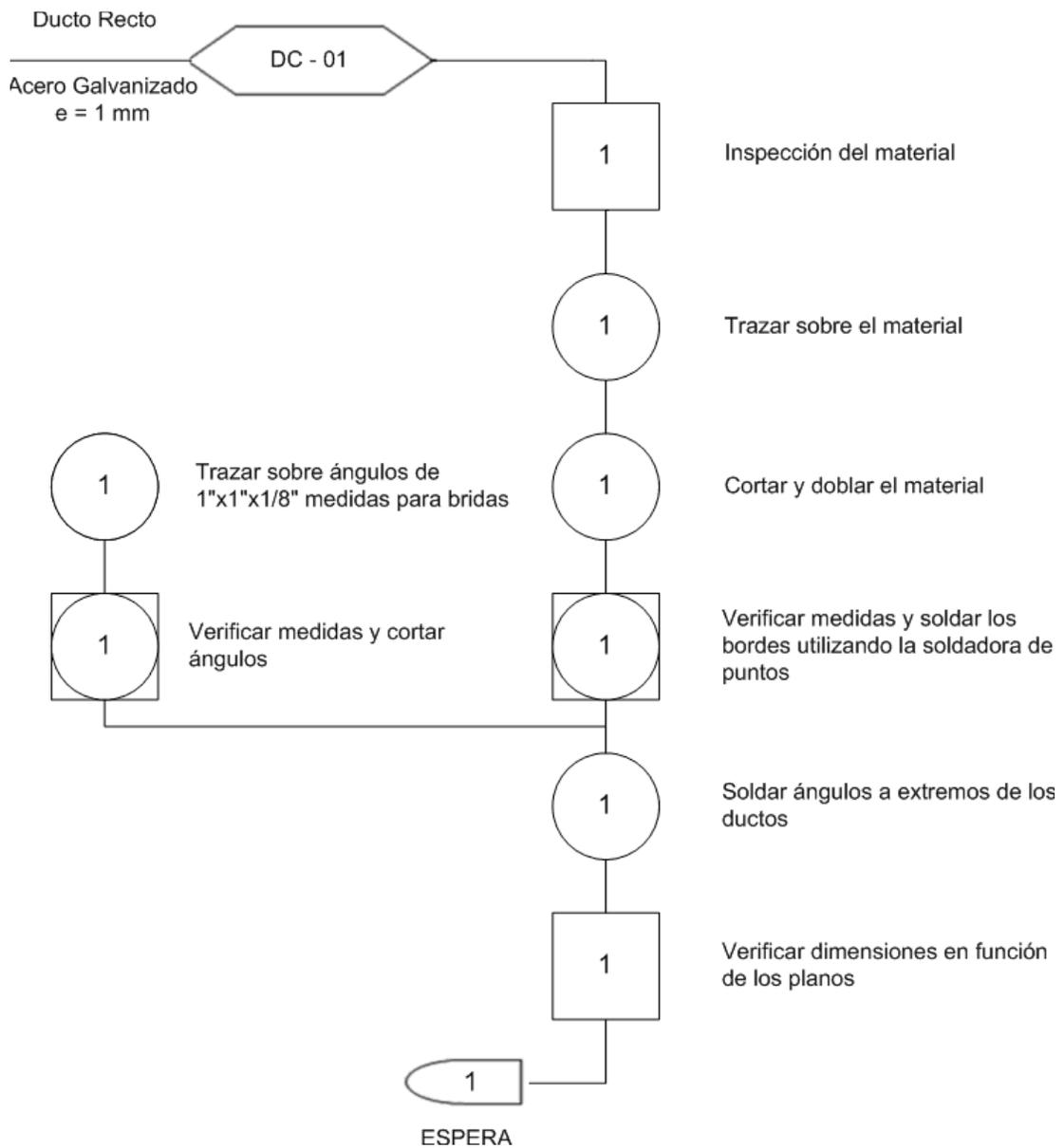


FIG. 4.7 Proceso de Construcción del Ducto Recto

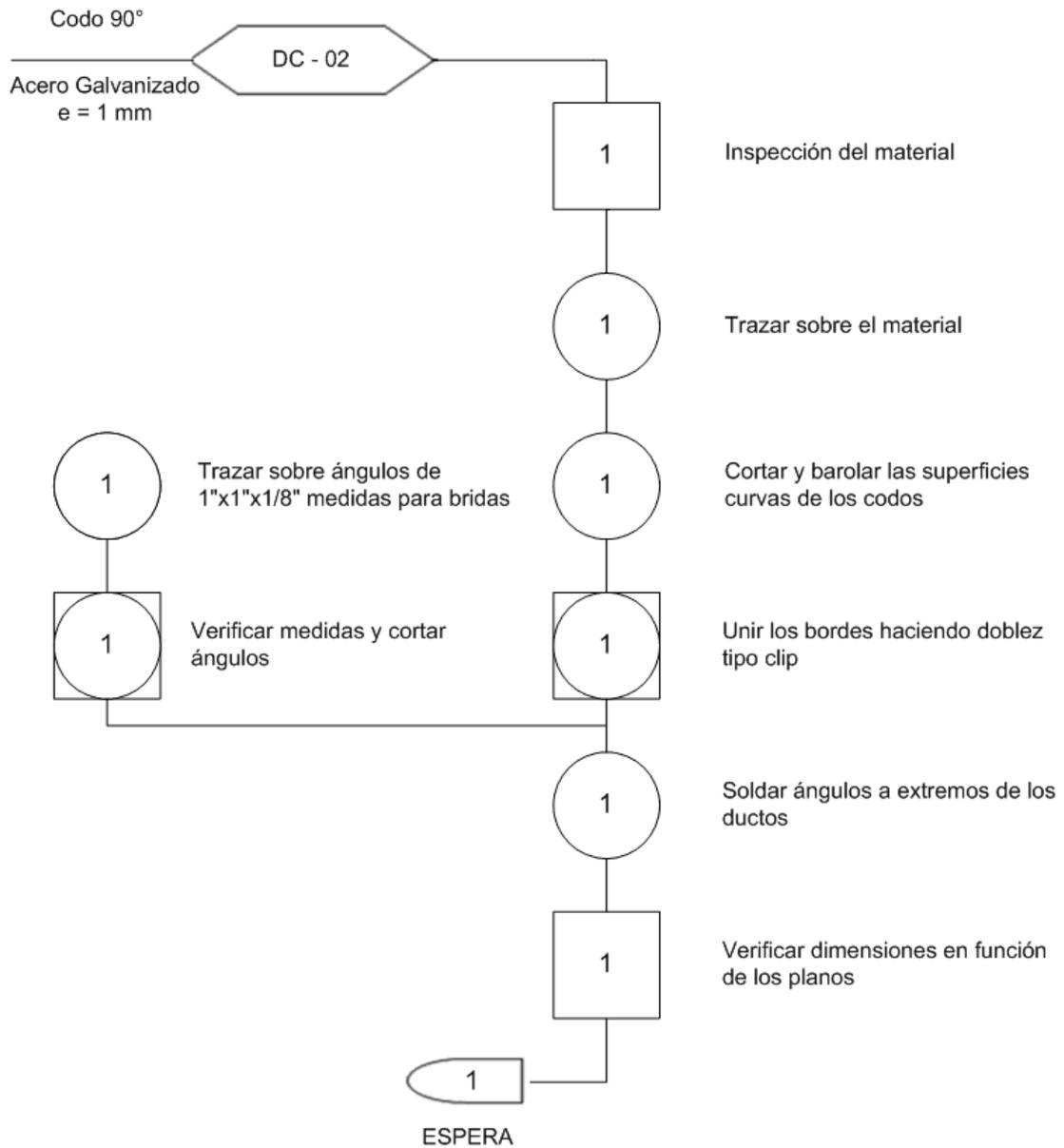


FIG. 4.8 Proceso de Construcción de un Codo de 90°

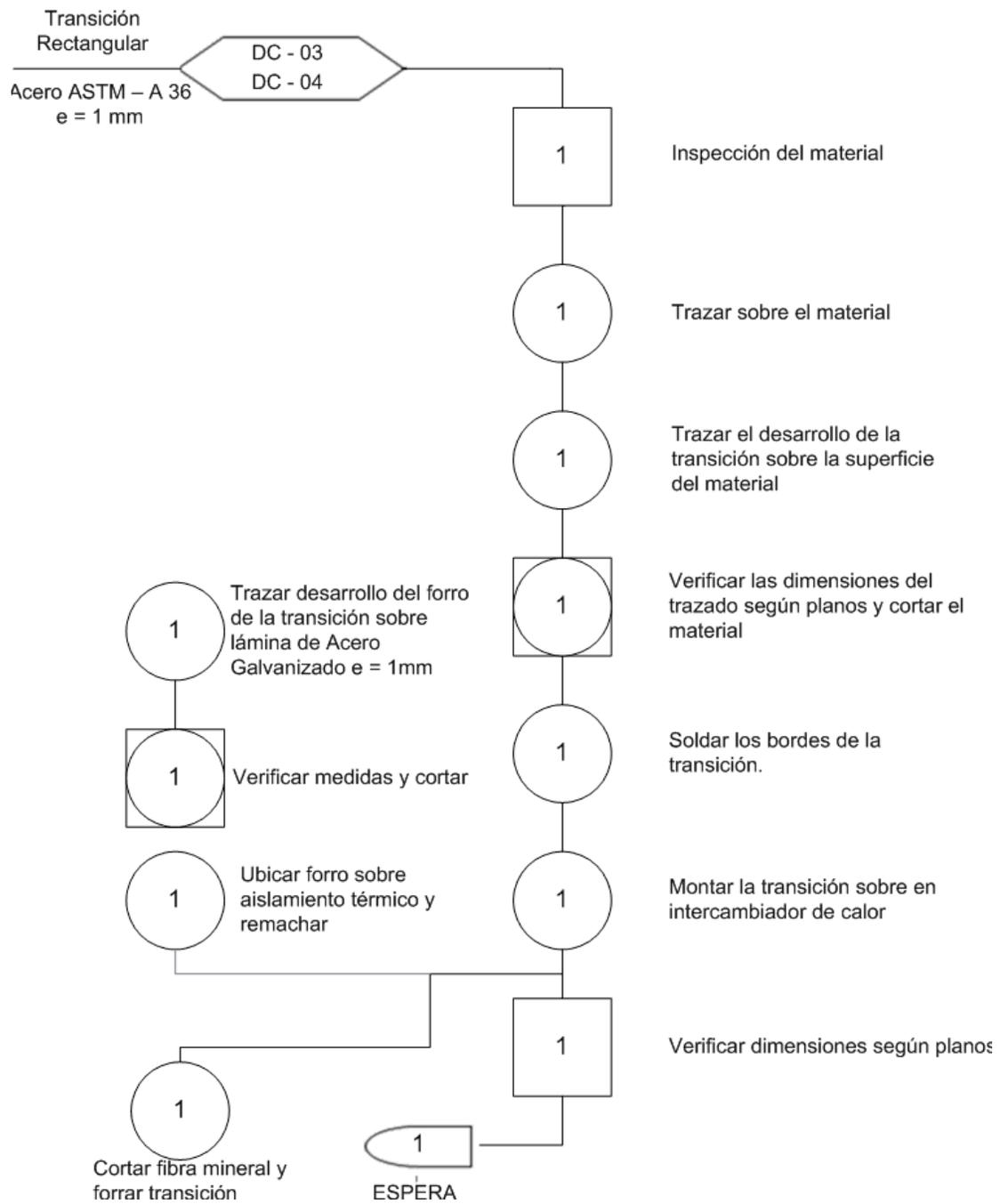


FIG. 4.9 Proceso de Construcción de Transición Rectangular

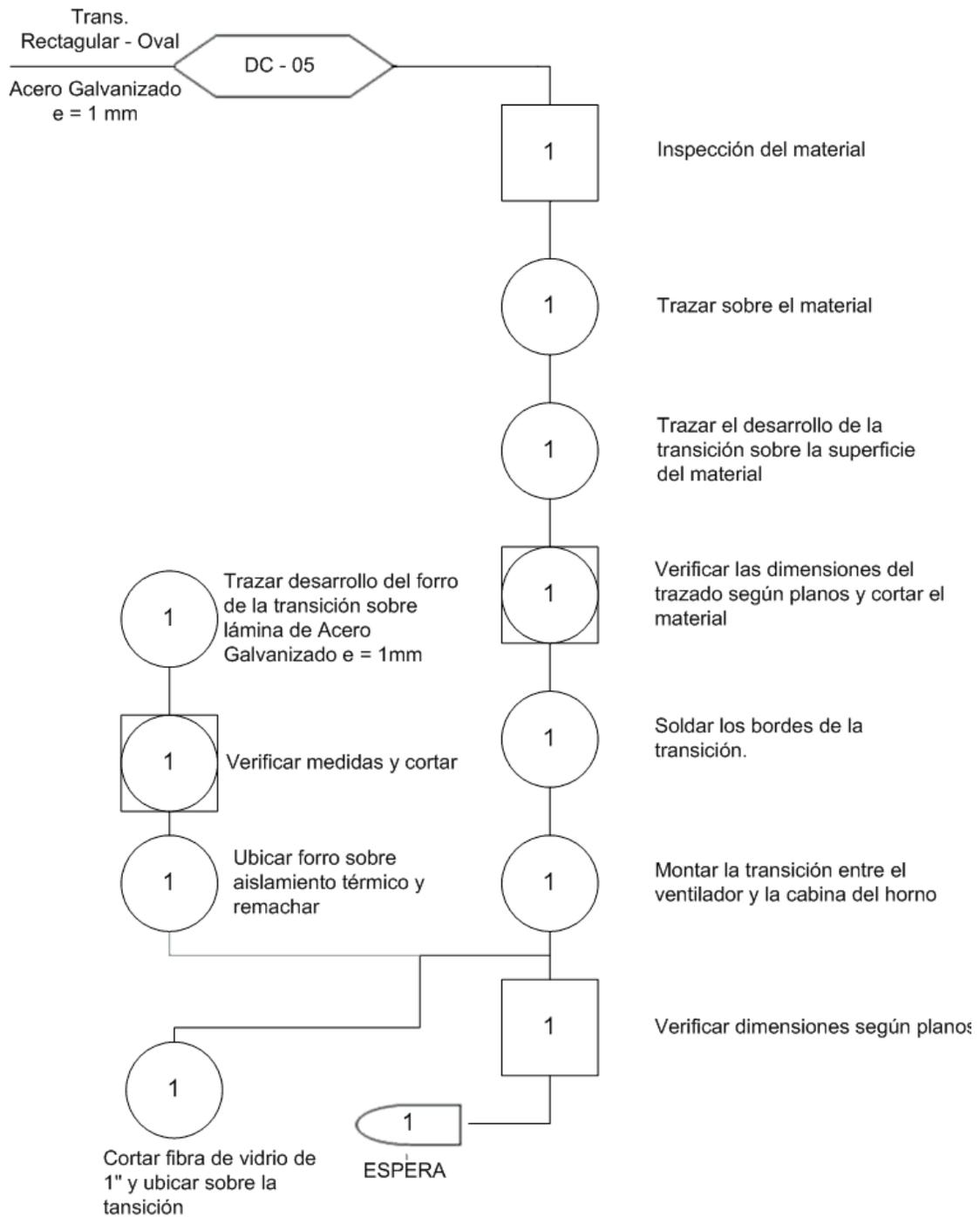


FIG. 4.10 Proceso de Construcción de una Transición Rectangular – Oval

4.2. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

El cronograma de actividades se encuentra en el *Anexo F*. En dicho cronograma se describe de manera cronológica cómo se realizó la construcción de todos los elementos que forman parte del sistema de calentamiento, suministro de combustible y control del horno del centro de producción.

4.3. RECURSOS DE FABRICACIÓN

4.3.1. MATERIALES

Previo a la manufactura de cualquier elemento, es esencial seleccionar los materiales de forma adecuada, ya que muchas veces de ellos depende el buen funcionamiento del sistema. A continuación se presentan detalladamente los materiales con los que fueron construidos cada uno de los elementos.

Espejos

Los espejos del intercambiador de calor fueron construidos de acero ASTM – A 36 de 2 mm de espesor. Para construir los espejos, es necesario cortar las planchas según las medidas de los planos. Luego se tienen que taladrar los centros de los agujeros donde serán insertados los tubos, y finalmente se hacen las perforaciones con una matriz circular y una prensa hidráulica.

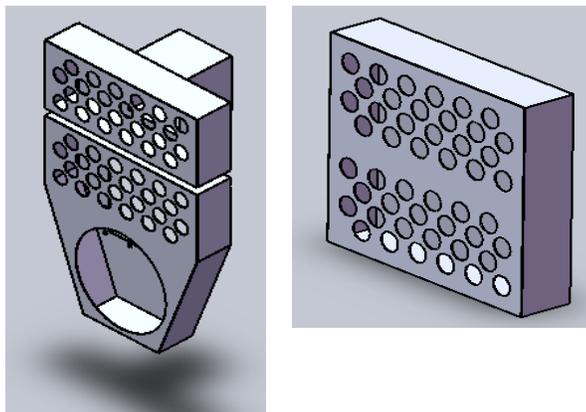


FIG. 4.11 Espejos del Intercambiador de Calor

Tubos

Los tubos del intercambiador de calor deben ser fabricados de tubos ISO de 2" de diámetro nominal. Ellos deben ser cortados de 900 milímetros de longitud y soldados a los espejos.

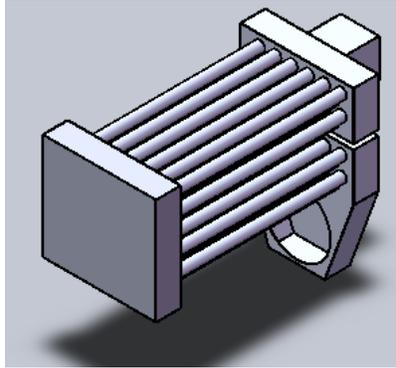


FIG. 4.12 Tubos del Intercambiador de Calor

Cámara de combustión

Debido a la elevada temperatura que tiene que soportar la cámara de combustión, se decidió fabricarla de acero inoxidable AISI – A 304 ya que este material soporta la corrosión que puede ser generada por los condensados que se generan al enfriarse los gases de combustión, y además es capaz de soportar temperaturas de hasta 700 °C sin perder sus propiedades. Esta cámara tiene que ser barolada con un diámetro de 350 mm hasta formar un cilindro.

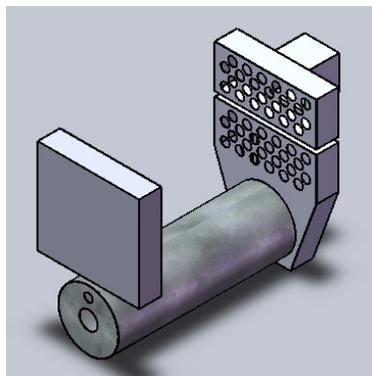


FIG. 4.13 Cámara de Combustión del Intercambiador de Calor

Paredes interiores

Las paredes interiores del intercambiador de calor también le darán rigidez a la estructura por su forma de fabricación, ya que estas estarán dobladas en sus bordes para formar una geometría similar a la de un perfil C. Es por ello que esta estructura estará también fabricada de acero ASTM – A 36.

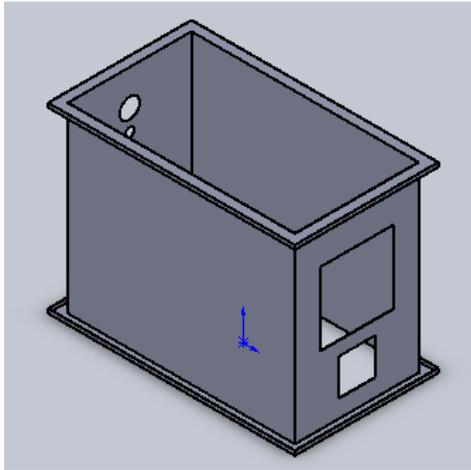


FIG. 4.14 Paredes Interiores del Intercambiador de Calor

Aislamiento térmico

El aislamiento térmico del intercambiador de calor es de fibra mineral de 2" de espesor, también conocida comúnmente como lana de piedra. Se ha seleccionado este tipo de aislamiento ya que tiene mejores propiedades que la fibra de vidrio debido a que en el intercambiador de calor se manejan temperaturas muy altas que pueden estar bordeando los 300 °C.

Por otro lado, se decidió utilizar fibra de vidrio para aislar los ductos y todo el sistema de transporte de aire ya que este sistema maneja temperaturas que bordean los 200 °C, los cuales pueden ser soportados sin problemas por la fibra de vidrio.

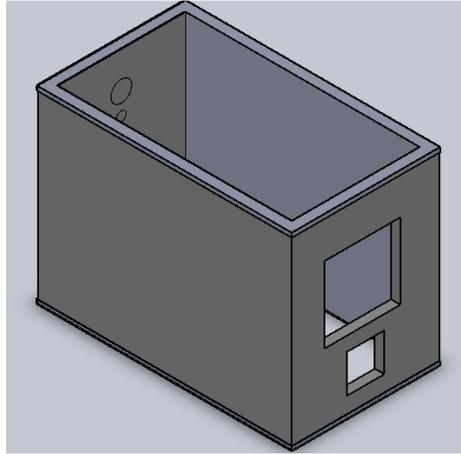


FIG. 4.15 Aislamiento Térmico del Intercambiador de Calor

Paredes exteriores

Las paredes exteriores del intercambiador de calor son de acero galvanizado de 1 mm de espesor ya que este material tiene la misión de proteger a todo lo que está por dentro de diversos factores ambientales y necesita tener una buena resistencia a la corrosión.

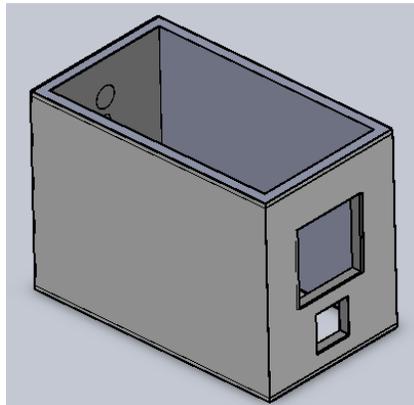


FIG. 4.16 Recubrimiento Exterior del Intercambiador de Calor

Ductos

Los ductos serán fabricados de acero galvanizado de 1" y serán acoplados con bridas, las cuales serán construidas de ángulos de 1"x1"x1/8". Se decidió unir los ductos por medio de bridas, ya que las bridas permiten montar y desmontar los ductos con mucha facilidad. Los ductos serán aislados con fibra de vidrio de 1" de espesor recubierta con un film de aluminio. El film de aluminio es de

mucha ayuda ya que este permite reflejar la radiación. Finalmente, el aislamiento térmico de los ductos será forrado por otra capa de acero galvanizado de 1 mm de espesor con el objetivo de proteger el aislamiento térmico. Este forro será atornillado en sus bordes para tener mayor facilidad de montar y desmontar.

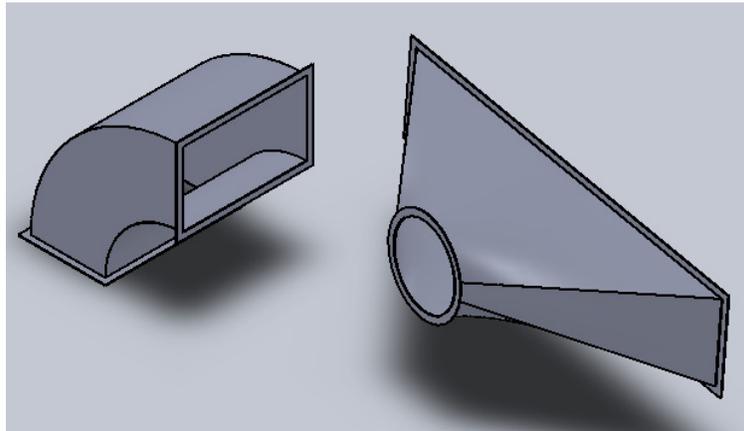


FIG. 4.17 Ductos y Transiciones Utilizadas en el Sistema

4.3.2. MANO DE OBRA

Antes de hablar de la mano de obra que estuvo involucrada en el proyecto, vale la pena mencionar los conceptos de mano de obra directa y mano de obra indirecta.

Mano de obra directa

La mano de obra directa se relaciona con las personas que aportan y dan un valor agregado al producto final de forma directa. En otras palabras, son los obreros y personal que se encuentran relacionados con el producto entregado.

Mano de obra indirecta

La mano de obra indirecta se relaciona con todo el personal administrativo que de alguna manera está relacionado con el desarrollo del producto o servicio. Este tipo de mano de obra forma parte de los costos indirectos.

Personal requerido

A continuación se enumera toda la mano de obra calificada necesaria para poder desarrollar el proyecto de forma adecuada.

Tabla 4.1. Personal Requerido

CANT.	FUNCIÓN	RESPONSABILIDADES
2	Diseñadores	Planificar, diseñar y dirigir la construcción y el desarrollo del proyecto.
2	Soldadores	Construir los distintos elementos que forman parte del sistema.
1	Electricista	Proporcionar todas las facilidades necesarias para poder energizar todos los elementos eléctricos del sistema.

4.3.3. EQUIPOS Y HERRAMIENTAS NECESARIOS

4.3.3.1. Equipos

Dobladora de tool

La dobladora de tol es un equipo que como su nombre lo indica permite doblar láminas de acero utilizando un mecanismo similar al de una palanca. Para poder doblar las planchas de acero de forma correcta, la dobladora cuenta con un sistema de muelas de diferentes tamaños, las cuales dan la facilidad para doblar piezas de distintas dimensiones.



FIG. 4.18 Dobladora de Tol

Cizalla

Este equipo permite cortar láminas de acero de espesores bajos con mucha precisión. Esta cizalla, cuenta con un mecanismo que permite sujetar la lámina de acero a su bastidor para obtener mayor precisión en el corte, y además brinda seguridad a los operadores que manejan dicho equipo.



FIG. 4.19 Cizalla

Baroladora

La baroladora es un equipo que permite generar geometrías cilíndricas principalmente en láminas de acero y en perfiles de bajos espesores como por ejemplo ángulos de 1"x1"x1/8". La baroladora cuenta normalmente con un sistema de tres rodillos, los cuales se encuentran en disposición triangular, y además son ajustables. Esta disposición de los rodillos, permite generar distintos diámetros en los cuerpos cilíndricos.

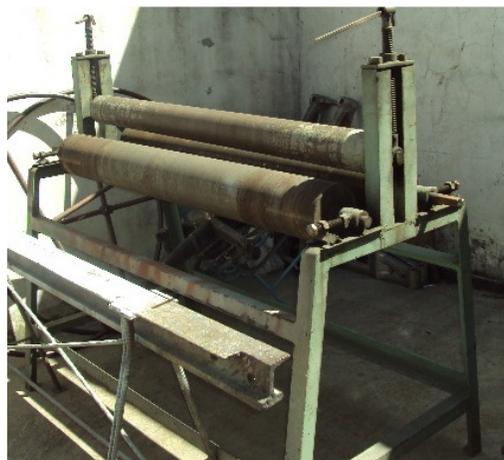


FIG. 4.20 Baroladora

Soldadora MIG

El proceso de soldadura MIG (Metal Inert Gas), es una subdivisión del proceso GMAW (Gas Metal Arc Welding). Este proceso de soldadura es semiautomático y consta de una pistola que permite alimentar automáticamente un consumible de alambre y una protección que normalmente es de gas inerte, el cual es generalmente Argón. Este proceso comúnmente funciona con voltaje constante y corriente directo.



FIG. 4.21 Soldadora MIG

Equipo de Balanceo Estático

El equipo de balanceo estático utilizado, cuenta con un funcionamiento muy simple. Son dos bastidores, los cuales tienen dos ruedas sobrepuestas, las cuales se encuentran muy bien balanceadas. Para balancear un eje o un ventilador en dicho sistema, se tiene que colocar el eje sobre el par de bastidores, hacerlo girar y buscar los puntos donde existe desbalance. Al encontrar dichos puntos, se coloca o se retira una cierta cantidad de masa y se vuelve a probar para determinar si todavía existe un desbalance.



FIG. 4.22 Equipo de Balanceo Estático

Taladro de pedestal

El taladro de pedestal es una máquina herramienta que permite generar perforaciones en distintos materiales. Para los fines de este proyecto se necesitó perforar acero. El taladro de pedestal, tiene la ventaja de poder generar agujeros sobre el acero con mayor precisión y velocidad que un taladro manual. Además, el taladro de pedestal puede controlar la altura a la que se colocan los elementos sobre la base y la profundidad de los agujeros.



FIG. 4.23 Taladro de Pedestal

Torno paralelo

El torno paralelo es una de las herramientas más utilizadas para la creación de volúmenes de revolución. El torno paralelo trabaja desbastando y removiendo material de un cuerpo determinado. Esta máquina herramienta trabaja en un solo plano (Ejes X - Z), en dichos ejes existen dos carros, los cuales ayudan en las tareas de maquinado para obtener volúmenes de revolución con distintas geometrías.

Lo característico de este tipo de torno es que se pueden realizar en el mismo todo tipo de tareas propias del torneado, como taladrado, cilindrado, mandrinado, refrentado, roscado, conos, ranurado, escariado, moleteado, etc; mediante diferentes tipos de herramientas y útiles que de forma intercambiables y con formas variadas se le pueden ir acoplando.

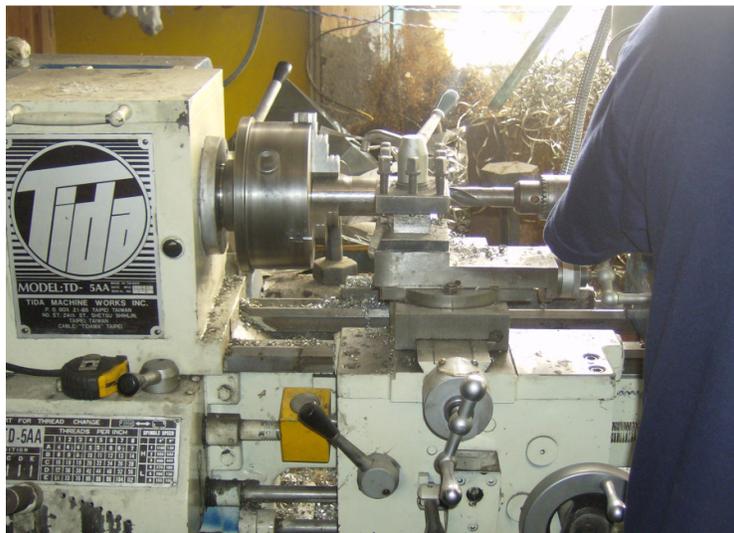


FIG. 4.24 Torno Paralelo

Amoladora

La amoladora es una máquina herramienta rotativa, que dependiendo del disco que se coloque en ella, permite utilizarla para operaciones de desbaste, corte o pulido. Este tipo de máquina herramienta es muy versátil y por ello, se la puede encontrar en la mayoría de talleres mecánicos.



FIG. 4.25 Amoladora

Prensa hidráulica

La prensa hidráulica es un sistema que se basa en teorías muy básicas de la mecánica de fluidos. Esta cuenta con vasos comunicantes impulsados por pistones de distintos diámetros, los cuales al ser aplicados fuerzas pequeñas, pueden producir fuerzas muy grandes. En este proyecto, la prensa hidráulica fue utilizada con la ayuda de una matriz para poder agujerear los espejos donde se ubicaron posteriormente los tubos del intercambiador de calor.



FIG. 4.26 Prensa Hidráulica

Máquina Pullmax

Es una máquina herramienta que cuenta con un motor eléctrico que mueve un árbol de levas, el cual mueve un mecanismo que oscila en sentido vertical. La máquina pullmax puede hacer varias funciones como las de martillado y corte. Sus funciones pueden cambiar en función de la matriz que sea colocada en el portaherramientas de la máquina.



FIG. 4.27 Máquina Pullmax

4.3.3.2. Herramientas

Para todo trabajo de construcción, es muy necesario y útil el manejo de las herramientas adecuadas. A continuación se listan todas las herramientas que fueron utilizadas en el proceso de construcción del horno y sus partes anexas.

Tabla 4.2. Herramientas Utilizadas

HERRAMIENTA	DESCRIPCIÓN
<p data-bbox="423 310 521 338">Alicate</p> 	<p data-bbox="695 363 1344 600">Es una herramienta que maneja el concepto de la palanca y de las pinzas. El alicate fue muy útil principalmente para ayudar a sujetar distintas piezas y para manipular elementos del sistema eléctrico.</p>
<p data-bbox="410 621 534 648">Cortafrío</p> 	<p data-bbox="695 720 1344 852">Es una herramienta que funciona de manera similar a la de un alicate, pero permite cortar cables de forma rápida y sencilla.</p>
<p data-bbox="354 919 594 947">Playo de Presión</p> 	<p data-bbox="695 972 1344 1161">Muy similar al alicate, pero cuenta con un mecanismo que se puede ajustar para sujetar distintos espesores sin la necesidad de que una persona tenga que manipularlo.</p>
<p data-bbox="370 1182 578 1209">Arco de Sierra</p> 	<p data-bbox="695 1266 1344 1398">Herramienta que permite cortar varios tipos de acero, sobre todo acero al carbono y otros metales como bronce y aluminio.</p>
<p data-bbox="418 1461 529 1488">Martillo</p> 	<p data-bbox="695 1518 1344 1602">Herramienta que permite golpear y es muy útil cuando se quieren hacer ajustes.</p>
<p data-bbox="423 1623 524 1650">Tarrajá</p> 	<p data-bbox="695 1686 1344 1755">La tarraja es una herramienta que permite hacer roscas sobre elementos metálicos</p>

<p>Destornilladores</p> 	<p>Permiten ajustar y desajustar tornillos con cabeza plana, de estrella o Phillips.</p>
<p>Juego de Rachas</p> 	<p>Estas herramientas son muy útiles para armar y desarmar elementos que tienen pernos con cabeza hexagonal.</p>
<p>Laves Mixtas</p> 	<p>Las llaves mixtas al igual que las rachas permiten armar y desarmar elementos con pernos de cabeza hexagonal y son muy útiles en lugares donde no hay espacio para usar una racha.</p>

4.4. MONTAJE

El horno para pintura se encuentra conformado por alrededor 6 partes y sistemas principales. Estas partes y sistemas son:

- a) Cabina del horno
- b) Intercambiador de Calor
- c) Ventilador
- d) Ductos de aire
- e) Sistema de transporte de Diesel
- f) Sistema de control

Todas estas partes y sistemas son dependientes y tienen que funcionar como un solo gran sistema. Por lo tanto, todas estas partes tienen que estar ensambladas de forma adecuada, caso contrario existirían problemas en el funcionamiento del horno.

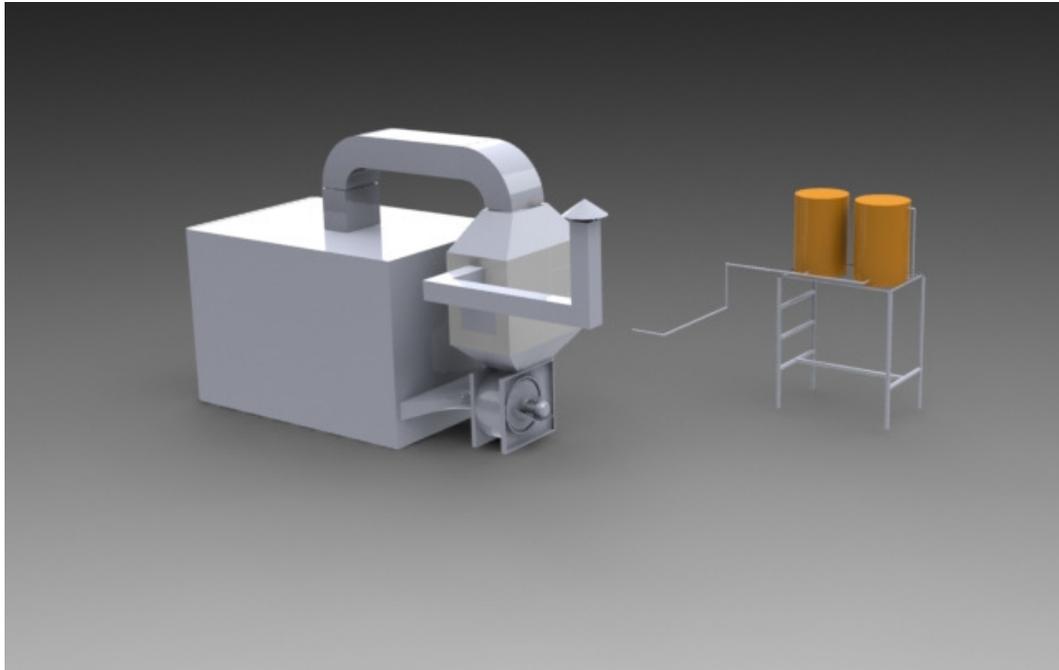


FIG. 4.28 Ensamble del sistema

4.5. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

4.5.1. SENSORES

Los sensores que se colocarán serán una termocupla tipo J, y un termómetro de vástago. La ubicación de estas se las muestra en la siguiente figura.

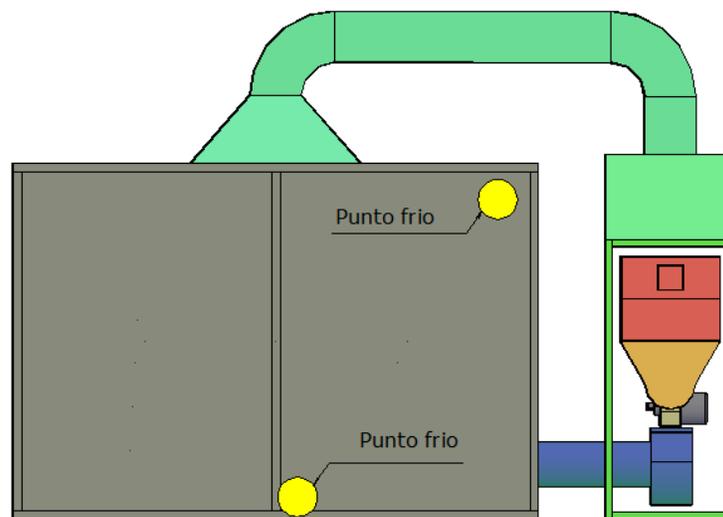


FIG. 4.29 Ubicación de las Termocuplas

Es muy importante dar una buena ubicación a la termocupla porque por medio de esta se logrará el control del quemador cuando llegue a la temperatura establecida.

4.5.2. ACTUADORES

Quemador

Para el montaje del quemador lo que se debe tomar en cuenta es la distancia entra la pared interna del hogar y la parte frontal del cañón del quemador, esta distancia está comprendida en $\frac{1}{4}$ ". Otro punto importante a tomar es colocar el empaque entre la brida del quemador y la del intercambiador para evitar la fuga de humo entre bridas.

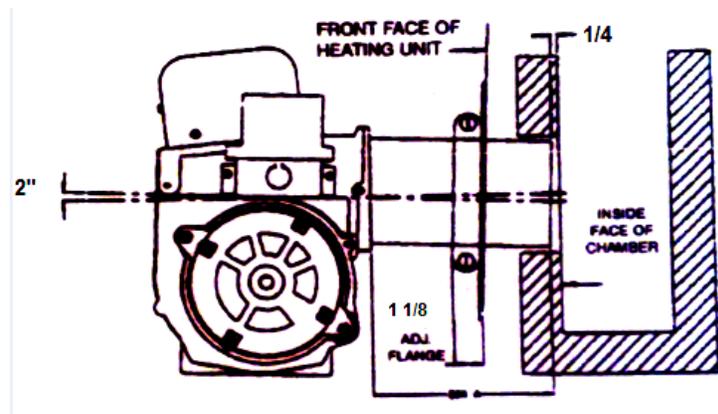


FIG. 4.30 Dimensiones para instalación de Quemador

Motor Ventilador

El montaje del motor eléctrico se debe realizar en conjunto, es decir uno el rodete del ventilador con la manzana y el eje al motor. Para el montaje del motor se deberá utilizar pernos $\frac{3}{8}$ " x 1". El ajuste de los pernos del ventilador se los hará en forma cruzada, ajustando los pernos expuestos para evitar que

se descentre el eje del ventilador y produzca vibraciones que puedan afectar al desempeño del mismo.

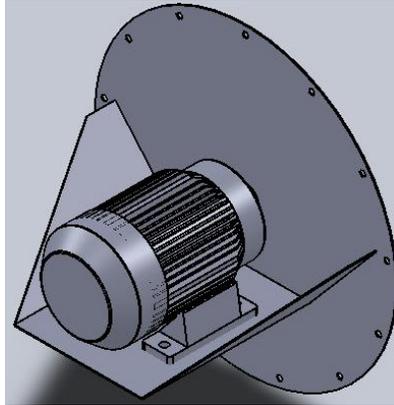


FIG. 4.31 Esquema del montaje del Ventilador

4.5.3. SISTEMA DE CONTROL

4.5.3.1. Hardware

En lo que se refiere a la instalación del sistema de control, se debe sujetar el gabinete por medio de tacos fisher y tornillos a la pared. Una vez colocado el gabinete se debe colocar el PLC, Breakers y Relés en el riel que existente en la canaleta. Una vez que los dispositivos estén sujetos al tablero se debe realizar las conexiones eléctricas tanto internas como externas. Los cables que salen del tablero de control hacia los actuadores deben ir dentro de manguera corrugada metálica para evitar daños en los mismos.

Para las conexiones del tablero de control, son necesarios ciertos accesorios eléctricos que permitan la instalación de todos los componentes que conforman el tablero de control. Todo el tablero de control estará centralizado en un solo lugar. Los accesorios que conforman el tablero de control son los siguientes:

Tabla 4.3. Partes y accesorios del tablero de control

1	GABINETE MET BEACOUF 30 X 30 X 16
1	CONTACTOR PTC LC1-D25 25A AC3 220 V 50/60HZ
1	CONTACTOR PTC LC1-D12 12A AC3 220V 50/60 HZ
1	RELAY TÉRMICO PTC 7-10A LRD-1314
1	RELE TERM 2.5 - 4A C1-D09 C1-D32 CAMSCO
2	BREAKER 1 POLO 1 AMP. CHINT
1	RIEL DIN 35mm META SIMÉTRICA 1m CAMSCO
8	CABLE CUENCA FLEXIBLE 20
50	TERMINAL PIN # 18-16 AMARILLO/CREMA
1	CONTROL TEMP. PTC DIGIT 48X48 0-400°C
1	ZELIO LG TELEM 100/240VAC 8EN 4SAL RELE C/RELOG
1	SELECTOR 2 POSICIONES LARGO CAMSCO 22mm
1	LUZ PILOTO EST. SOLIDO CORTA AMARILLA 220V PTC
12	METROS CABLE SUCRE 3X14
1	LUZ PILOTO EST. SOLIDO CORTA AZUL 220V PTC
5	CONECTOR 1/2BX
7	METROS CABLE DE TERMOCUPLA
12	METROS MANGUERA 1/2BX
20	TERMINAL PIN #14X12 AZUL CAMSCO



FIG. 4.32 Montaje del Tablero de Control

4.5.3.2. Software

Para cargar el programa al PLC, se debe tener todas las conexiones del tablero de control listas. Los pasos para cargar el programa al PLC son los siguientes.

- Conectar el computador al PLC por medio del cable SR2CBL01

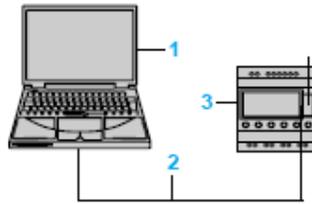


FIG. 4.33 Conexión computador - PLC

- Conectado el PLC al computador a través del cable USB, buscar en la barra de herramientas del programa ZelioSoft 2 la pestaña transferencia; dar clic en transferir programa, y luego seleccionamos PC > Módulo. De esta manera el software transferirá al programa al PLC

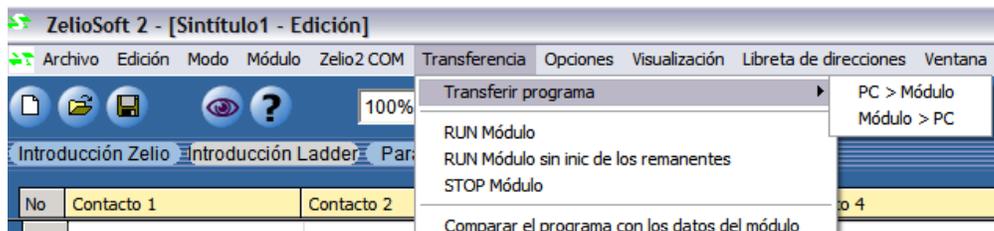


FIG. 4.34 Transferencia del Programa al PLC

- Cuando la transferencia haya concluido desconectar los el cable de conexión, si lo realizará antes deberá repetir los pasos 1 y 2.

CAPÍTULO 5

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

En el presente capítulo se describen los parámetros de funcionamiento del horno, los instrumentos de medición y el procedimiento para realizar las pruebas de funcionamiento del horno, con la finalidad de comprobar que el horno trabaje de acuerdo a los parámetros de diseño establecidos en el capítulo 4.

5.1. PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO.

Los parámetros de funcionamiento con los cuales trabaja el horno para el curado de pintura electrostática son los siguientes:

Tabla 5.1. Parámetros de Funcionamiento del Horno

Consumo de diesel por ciclo de operación	1 galón
Consumo de energía eléctrica por ciclo de operación	1.03 KW-H
Tiempo de calentamiento	26 min
Tiempo de enfriamiento	15 min
Presión de la bomba diesel	150 psi
Temperatura de operación del horno	170 °C

5.2. PROTOCOLO DE PRUEBAS PARA EL HORNO

La metodología para realizar las pruebas en el horno de curado de pintura electrostática son las siguientes:

- Verificar que el nivel de los tanques de diesel se encuentren por sobre la primera marca del medidor de nivel.
- Comprobar las temperaturas del horno de acuerdo a los tiempos establecidos. Esta temperatura se la tomará con el horno cargado en su máxima capacidad.
- Comprobar los tiempos de curado con los distintos tipos de colores de pintura electrostática.
- Realizar las siguientes pruebas de curado una vez que las piezas salgan del horno:
 - Rayado
 - Doblado
 - Frotación

5.3. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.

Los instrumentos de medición que se utilizarán para realizar las pruebas de funcionamiento del horno son las siguientes:

- **Termómetro de Vástago**

- Movimiento	:	Bimetálico
- Longitud de inmersión	:	100 mm
- Conexión	:	Rosca macho de 3/8" NPT
- Carcasa	:	2" de diámetro
- Rango de medición	:	0 – 300 °C

- **Termocupla tipo J**

- Rango de Temperatura	:	-200 a 700 °C
- Precisión	:	1%
- Composición	:	Hierro – Cobre y Níquel

- **Cronómetro Digital**

- Rango : 0 – 24h
- Apreciación : 0.1s

5.4. PROCEDIMIENTO.

Las pruebas de verificación del comportamiento del horno se las debe realizar varios días, debido a que las propiedades atmosféricas pueden variar de un día al otro.

La secuencia a seguir para realizar las pruebas son las siguientes:

- Medir el nivel de Diesel que se tiene antes de encender el horno.
- Ubicar los termómetros en las zonas en los puntos críticos de la cabina del horno.
- Medir la temperatura del aire dentro de la cabina del horno.
- Mover el selector del tablero de control a la posición de encendido.
- Medir la temperatura en los termómetros cada minuto hasta que termine el tiempo de calentamiento establecido en el diseño.
- Medir la temperatura en los termómetros cada minuto hasta que el tiempo de enfriamiento del horno.
- Una vez terminado el ciclo medir el nivel de Diesel para verificar el consumo del mismo.
- Una vez sacadas las piezas del horno realizar se deben realizar las siguientes pruebas de curado.
 - Rayado.- Esta prueba consiste en rayar la pieza curada con una punta filuda, si este se descascara es una evidencia de falta de curado.
 - Doblado.- A la pieza curada de se la debe doblar completamente y no debe descascarse la pintura.

- Frotación.- Esta prueba consiste en pasar un paño humedecido con thinner sobre la pieza curada, se debe realizar 10 frotos en la pieza curada si se mancha el paño de pintura significa que falta tiempo de curado.

5.5. LEVANTAMIENTO DE DATOS.

Para efectuar el levantamiento de datos se siguió con los procedimientos descritos en el punto 5.4. La ubicación de los termómetros fue en los puntos más desfavorables en cuando a llegada de aire caliente.

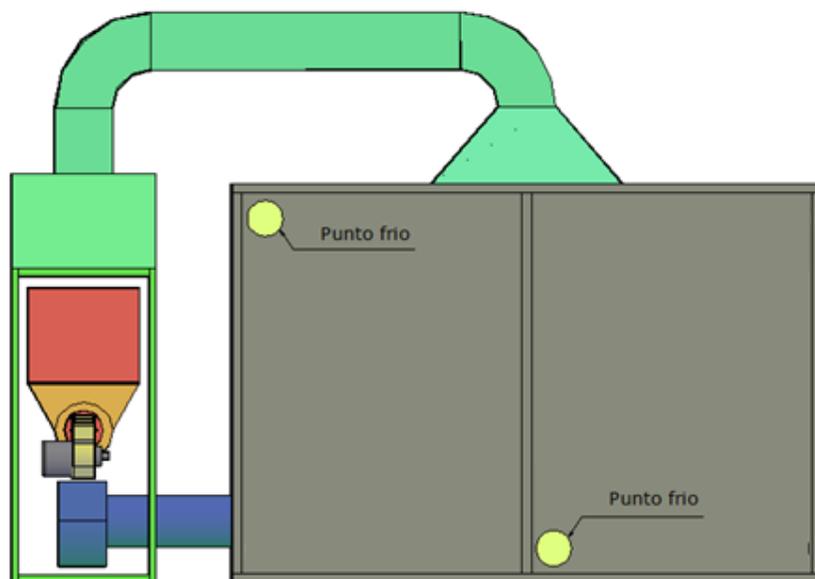


FIG. 5.1 Ubicación de sensores de temperatura

El diseño del horno, se lo hizo considerando una temperatura promedio de 180°C, pero hay que considerar que la temperatura de curado puede variar en función del tipo de pintura aplicada en las piezas. Por ejemplo para pintura de color blanco la temperatura óptima es de 160°C, a diferencia de la pintura negra que necesita una temperatura óptima de 200 °C para tener un buen curado.

Debido a ello los parámetros de funcionamiento del horno pueden variar según el tipo de pintura.

El horno se cargó completamente con espaldares de camas fabricadas en tubos ISO de 2" de diámetro. En total entraron 50 espaldares de cama pintados con pintura electrostática negra.

Siguiendo con la secuencia del procedimiento se tomaron las temperaturas antes de encender el horno y posterior al encendido, se tomaron datos cada minuto durante el tiempo de calentamiento y de enfriamiento.

Los parámetros de funcionamiento fueron fijados de la siguiente forma:

- Temperatura de Curado = 200°C
- Tiempo de calentamiento = 26 min
- Tiempo de enfriamiento = 20 min

Los datos obtenidos luego de la prueba de funcionamiento se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.2. Medición de temperaturas con el horno lleno de camas

TIEMPOS	TEMPERATURA 1	TEMPERATURA 2
	TERMOCUPLA	TERM. VÁSTAGO
minutos	°C	°C
0	16	15
1	17	17
2	20	22
3	24	25
4	29	30
5	33	35
6	38	45
7	49	55
8	58	65
9	66	70
10	73	80
11	80	86
12	87	93
13	94	100
14	101	107
15	108	115
16	114	121

17	122	127
18	130	132
19	137	137
20	144	144
21	150	150
22	155	156
23	161	161
24	167	167
25	174	173
26	179	177
27	184	181
28	189	185
29	195	191
30	200	195
31	203	198
32	206	200
33	207	200
34	210	200
35	210	200
36	211	199
37	211	192
38	211	190
39	210	188
40	210	186
41	209	185
42	208	180
43	186	125
44	175	120
45	162	100
46	154	90

5.6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Se pudo observar que la temperatura tanto en la parte superior como en la inferior era similar, lo que nos indica que hubo uniformidad en la distribución de temperaturas al interior de la cabina del horno, de esta manera se cumplió con el objetivo de este proyecto.

Tabla 5.3. Medición de Temperaturas con el horno lleno de camas

TIEMPOS	TEMPERATURA 1	TEMPERATURA 2	TEMPERATURA
	TERMOCUPLA	TERM. VÁSTAGO	PROMEDIO
minutos	°C	°C	°C
0	16	15	16
1	17	17	17
2	20	22	21
3	24	25	25
4	29	30	30
5	33	35	34
6	38	45	42
7	49	55	52
8	58	65	62
9	66	70	68
10	73	80	77
11	80	86	83
12	87	93	90
13	94	100	97
14	101	107	104
15	108	115	112
16	114	121	118
17	122	127	125
18	130	132	131
19	137	137	137
20	144	144	144
21	150	150	150
22	155	156	156
23	161	161	161
24	167	167	167
25	174	173	174
26	179	177	178
27	184	181	183
28	189	185	187
29	195	191	193
30	200	195	198
31	203	198	201
32	206	200	203
33	207	200	204
34	210	200	205
35	210	200	205
36	211	199	205

37	211	192	202
38	211	190	201
39	210	188	199
40	210	186	198
41	209	185	197
42	208	180	194
43	186	125	156
44	175	120	148
45	162	100	131
46	154	90	122

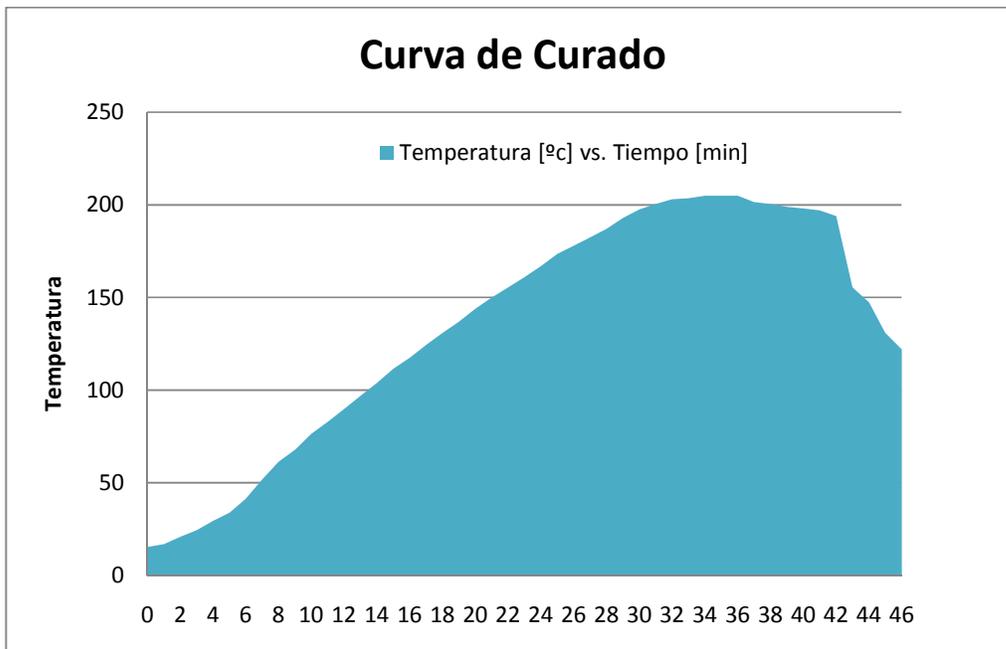


FIG. 5.2 Curva de Curado

Luego de sacar las piezas del horno se realizaron las siguientes pruebas:

- Rayado.- Se tomó dos muestras de camas para efectuar esta prueba, de la parte superior y de la parte inferior. Con la ayuda de un cuchillo se rayó las superficies de las camas y no se evidenció una pérdida total de la capa de pintura.

- Doblado.- Para realizar esta prueba se colocó dentro del lote una placa de muestra. Se procedió a doblar la placa pintada y se pudo observar que no se descascaró la pintura.
- Frotación.- Para esta prueba se mojó un paño con thinner y se frotó sobre la pintura. El paño quedó sin manchas de pintura lo cual nos demuestra que está bien curado.

5.7. CRITERIOS DE SEGURIDAD INDUSTRIAL.

La protección a la salud y seguridad de los trabajadores es un tema de gran preocupación en las últimas décadas, buscar los mecanismos para disminuir las lesiones, las enfermedades y las muertes laborales. Establecer un ambiente laboral seguro y sano requiere que cada empresa y sus empleados enfoquen la seguridad y la salud como el componente de mayor prioridad.

Las empresas ahorran dinero y agregan valor a sus organizaciones, cuando sus trabajadores están ilesos y sanos, las empresas incurren en menos gastos y en beneficios indirectos tales como aumento en la productividad, disminución en los costos, al no tener que capacitar a los empleados de reemplazo y al no requerir horas extraordinarias.

Los principales riesgos a los que pueden estar expuestos los operarios del horno de curado de pintura electrostática son los riesgos Físico Mecánicos.

El personal de la empresa está constantemente expuesto a diferentes riesgos físicos, los principales riesgos son debidos al levantamiento de cargas, exposición a zonas calientes en la cercanía del intercambiador y exposición a corrientes eléctricas. Para evitar todos estos riesgos, los empleados deben utilizar la siguiente vestimenta de seguridad:

1. Gafas de seguridad
2. Botas de caucho
3. Delantal
4. Guantes
5. Orejeras
6. Mascarilla



FIG. 5.3 Equipo de seguridad industrial

5.8. MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO.

A continuación se indican todos los parámetros que se tienen que tomar en cuenta antes y durante la operación del horno de pintura.

5.8.1. OPERACIÓN DEL HORNO

Para que el horno funcione de manera adecuada, se tienen que seguir las siguientes instrucciones en el orden indicado a continuación.

1. Cargar el horno tomando la precaución de no tapar las rejillas de descarga y succión de aire que se encuentran al interior de éste. Además, las piezas que se encuentren dentro del horno deben tener una separación de al menos 5 cm con el fin de permitir la circulación de aire entre ellas.
2. Cerrar las puertas del horno y asegurarlas adecuadamente.
3. Verificar que el nivel de los tanques de Diesel se encuentre por sobre la primera marca del medidor de nivel el cual se encuentra en la parte derecha de los tanques de combustible.
4. Verificar que todas las válvulas de paso de combustible se encuentren completamente abiertas.

5. Verificar que la posición del Dámper de Aire ubicado en el ventilador se encuentre completamente abierto.
6. Revisar la temperatura de trabajo, la cual tiene que ser fijada en el pirómetro a 180 °C.
7. Revisar los tiempos de calentamiento y enfriamiento en el PLC. (Remitirse al literal 5.8.2) operación del PLC.
8. Arrancar el horno moviendo el selector de color negro que se encuentra en el tablero de control.
9. Observar que se prendan las luces testigo de color azul y amarillo al encender el horno.
10. Verificar que se encienda el motor eléctrico que mueve al ventilador.
11. Verificar que a los 15 segundos después de arrancar el horno se encienda el quemador. Si existen problemas con el quemador remitirse al literal 5.8.3 (Operación del Quemador).
12. Esperar a que termine el ciclo de curado de la carga.
13. Abrir las puertas del horno y revisar la calidad de la pintura de la carga.

5.8.2. OPERACIÓN DEL PLC

El PLC está programado para controlar principalmente los tiempos de calentamiento y enfriamiento del ciclo de curado. Adelante se muestra cómo se tienen que programar dichos tiempos en el PLC. Para que se pueda entender de una mejor manera la programación del PLC, se indica una figura con las teclas y la configuración del PLC Zelio Telemecanique.

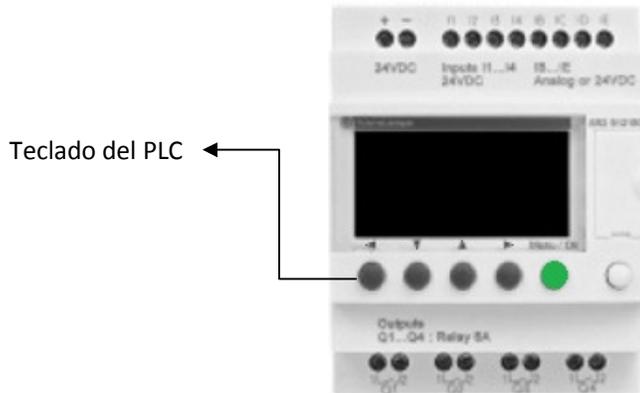


FIG. 5.4 PLC Zelio Telemecanique

Para poder manipular los parámetros de programación del PLC hay que familiarizarse con el teclado del PLC. Dichos botones se encuentran en la figura del PLC. Los botones grises que tienen flechas permiten moverse en la pantalla del PLC y el botón de color verde (OK) permite seleccionar las diferentes opciones de la programación. A continuación se indica cómo cambiar los parámetros en la programación del PLC.

1. Presione el botón (OK) de color verde para ingresar al menú de programación.
2. Con las flechas ubicarse la opción PARAMETERS y presionar OK.
3. Presionar el botón ▲ para cambiar las variables de la programación hasta que se ubique en la variable T1, la cual controla el tiempo de calentamiento del horno.
4. Luego presionar el botón ◀ para variar el tiempo de calentamiento que se encuentra en minutos y segundos.
5. Cambiar el tiempo al deseado con las flechas ▼ y ▲ para disminuir o aumentar el tiempo respectivamente.
6. Si el tiempo de curado se encuentra fijado, presione OK dos veces y verifique que el PLC se encuentre en su pantalla inicial.

7. Si se desea fijar el tiempo de enfriamiento T2, repita los pasos 1 al 6 para modificar el tiempo T2.

5.8.3. OPERACIÓN DEL QUEMADOR

En el caso de producirse errores en el quemador se tienen que revisar los parámetros citados más adelante. Es importante recalcar que este documento no pretende indicar los parámetros de calibración ni de ensamblaje del quemador y sus partes, ya que dichas actividades tienen que ser realizadas por un profesional con amplia experiencia en quemadores y sistemas de combustión.



FIG. 5.5 Quemador

En el caso de producirse errores en el quemador verificar lo siguiente:

Si el quemador produce contra explosiones:

1. Revise que el nivel en los tanques de Diesel se encuentre en un valor óptimo.
2. Verifique que no existan obstrucciones en la chimenea.
3. Revise que la presión en el manómetro del quemador esté marcando 150 psi en operación.

4. Observe la chimenea y verifique que el humo que sale por dicho lugar no tenga una coloración negra. De hecho, cuando el quemador está bien calibrado, los gases de combustión deben ser imperceptibles a la vista. Si el humo es de color negro avise a un experto en quemadores para revisar la calibración del quemador.

Si el quemador no se enciende:

1. Revise los breakers del tablero de control y verifique que no haya saltado el relé térmico del quemador.
2. Observe la luz de error del quemador que se encuentra en la parte posterior. Si la luz se enciende de forma intermitente continúe con los siguientes pasos.
3. Apague el sistema.
4. Aplaste el botón de RESET del quemador que se encuentra en la parte posterior del mismo y vuelva a energizar el sistema.
5. Mantenga aplastado el botón de RESET por aproximadamente 1 minuto o hasta que la luz de error se vuelva a encender pero sin titilar.
6. Suelte el botón y espere a que se encienda el quemador.
7. Si el motor del quemador se enciende, pero este no genera llama y se vuelve a prender la luz de error, entonces revise el siguiente paso, caso contrario el quemador debe funcionar correctamente.
8. Vuelva a RESETEAR el quemador remitiéndose a los pasos 5 y 6. Al momento de prenderse el motor del quemador abra la válvula de sangrado de la bomba y drene por 15 segundos hasta que la bomba se encuentre sin rastros de aire en su interior.

9. Cierre la válvula de sangrado.
10. Apague el sistema y vuelva a encender verificando que se encienda el quemador de forma apropiada. Caso contrario puede existir un daño en el sistema de encendido del quemador, problema que tiene que ser solucionado por un experto.

5.8.4. MANTENIMIENTO DEL HORNO

Vale la pena recalcar que el mantenimiento de cualquier equipo incluye normalmente limpieza, lubricación, ajuste, reparación y seguridad. También hay que recordar que el mantenimiento se encuentra estrechamente relacionado con la constante vigilancia de los equipos, la calidad del producto, la productividad y el control de la contaminación.

Con el fin de mantener el funcionamiento del horno de forma óptima se ha desarrollado un plan de mantenimiento del horno. A continuación se indican los planes de mantenimiento preventivo y correctivo del horno.

Mantenimiento Preventivo

El mantenimiento preventivo tiene que ser realizado por los operadores del horno. Este tipo de mantenimiento consta básicamente de limpieza, lubricación y revisión de los diferentes sistemas y partes que se encuentran relacionados con el horno. En el caso de existir cualquier anomalía, el operario debe comunicar al técnico de planta, el mismo que puede realizar un mantenimiento de II y III escalón; y este a su vez al jefe de mantenimiento, para que decida de mejor manera la acción correctiva.

Tabla 5.4 Mantenimiento preventivo del intercambiador de calor

INTERCAMBIADOR DE CALOR		
Elemento	Acciones	Periodicidad
Cámara de Combustión	<ul style="list-style-type: none"> • Revisar el estado del material de la cámara de combustión, sobre todo en las soldaduras. • Limpiar el hollín que se genera como producto de la combustión. 	Anual
Tubos	<ul style="list-style-type: none"> • Revisar el estado de los tubos, verificar fisuras y corrosión. • Limpiar el hollín y las impurezas que puedan quedarse impregnadas en los tubos, ya que estos disminuye la transferencia de calor. 	Anual
Mirilla	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar que la mirilla no se encuentre opacada por el hollín. Si es así, limpiar la mirilla y volverla a colocar con silicona para altas temperaturas. 	Cada vez que sea necesario
Chimenea	<ul style="list-style-type: none"> • Revisar que no existan obstrucciones en el ducto de la chimenea. • Limpiar el ducto. 	Anual

Tabla 5.5 Mantenimiento preventivo del ventilador

VENTILADOR		
Elemento	Acciones	Periodicidad
Impulsor	<ul style="list-style-type: none"> • Limpiar los álabes impulsores 	Anual
	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar que no se produzcan ruidos ni vibraciones excesivas. 	Diaria
Motor	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar que no se produzcan ruidos ni vibraciones excesivas. 	Diaria

Tabla 5.6 Mantenimiento preventivo del quemador

QUEMADOR		
Elemento	Acciones	Periodicidad
Bomba	<ul style="list-style-type: none"> • Revisar que la presión de la bomba se encuentre a 150 psi en funcionamiento. 	Diaria
Electrodos	<ul style="list-style-type: none"> • Limpiar los electrodos 	Anual
Todo el sistema	<ul style="list-style-type: none"> • Revisar la calidad de los gases de combustión. 	Diaria

Tabla 5.7 Mantenimiento preventivo del sistema de suministro de combustible

SUMINISTRO DE COMBUSTIBLE		
Elemento	Acciones	Periodicidad
Tanques de Combustible	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar que no existan fugas. 	Mensual
Tubería	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar la existencia de fugas en las uniones de la tubería y en sus accesorios. 	Mensual
Filtro de Combustible	<ul style="list-style-type: none"> • Limpiar el filtro de combustible. Si el filtro se encuentra muy saturado cambiarlo. 	Anual

Tabla 5.8 Mantenimiento preventivo de la cabina del horno

CABINA DEL HORNO	
Acciones	Periodicidad
<ul style="list-style-type: none"> • Barrer el piso de la cabina. 	Diaria
<ul style="list-style-type: none"> • Remover todos los elementos o partículas que puedan ingresar por la rejilla de succión, ya que estas pueden afectar el funcionamiento del ventilador. 	Antes de cada ciclo del horno
<ul style="list-style-type: none"> • Verificar el estado de las paredes, techo y piso del horno. • Revisar el estado de las soldaduras y la corrosión de las láminas de acero. 	Anual

Mantenimiento Correctivo

El mantenimiento correctivo normalmente es aplicado cuando un elemento de máquina tiene que ser reparado de forma planificada o de forma imprevista. El mantenimiento correctivo tiene que ser ejecutado por un técnico o especialista de la planta que esté capacitado para ejecutar esta acción. A continuación se presenta una matriz de mantenimiento correctivo donde se indican las posibles causas y las acciones a tomar para dichos casos.

Tabla 5.9 Matriz de mantenimiento correctivo

ELEMENTO	CAUSA	ACCIÓN
Quemador	Mala calidad de la combustión o contra explosiones	Calibración del quemador, revisión de la boquilla y de ser necesario cambio de boquilla.
Sistema de Suministro de Combustible	Exceso de impurezas en el combustible	Limpieza de los tanques.
	Fugas en tuberías	Si las fugas son en las uniones, se tiene que reemplazar el teflón de las uniones. Si la fuga es en una tubería, se tiene que cambiar el tramo de tubería.
	Fugas en los tanques	Reemplazar el tanque dañado.
Ventilador	Ruido excesivo en el ventilador.	Balanceo del ventilador.
Motor Eléctrico	Recalentamiento	Cambiar los rodamientos.

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO

En este capítulo se realizará un análisis del presupuesto requerido para la construcción del horno, y del costo – beneficio que se puede obtener con la modificación del mismo.

6.1. INVERSIÓN EN EQUIPOS Y MATERIALES

El costo de los materiales y equipos necesarios para la ejecución del proyecto se detallan a continuación.

Tabla 6.1 Costo del sistema de automatización

AUTOMATIZACIÓN			
CANTIDAD	DETALLE	P. UNITARIO	TOTAL
1	GABINETE MET BEACOUPE 30 X 30 X 16	24,00	24,00
1	CONTACTOR PTC LC1-D25 25A AC3 220 V 50/60HZ	11,37	11,37
1	CONTACTOR PTC LC1-D12 12A AC3 220V 50/60 HZ	7,06	7,06
1	RELAY TÉRMICO PTC 7-10A LRD-1314	6,49	6,49
1	RELE TERM 2.5 - 4A C1-D09 C1-D32 CAMSCO	8,53	8,53
2	BREAKER 1 POLO 1 AMP. CHINT	3,20	6,40
1	RIEL DIN 35mm META SIMÉTRICA 1m CAMSCO	3,00	3,00
8	CABLE CUENCA FLEXIBLE 20	0,14	1,12
50	TERMINAL PIN # 18-16 AMARILLO/CREMA	0,03	1,50
1	CONTROL TEMP. PTC DIGIT 48X48 0-400°C	60,90	60,90
1	ZELIO LG TELEM 100/240VAC 8EN 4SAL RELE	150,44	150,44
1	SELECTOR 2 POSICIONES LARGO CAMSCO 22mm	2,19	2,19
1	LUZ PILOTO EST. SOLIDO CORTA AMARILLA 220V	1,16	1,16

12	METROS CABLE SUCRE 3X14	1,57	18,84
1	LUZ PILOTO EST. SOLIDO CORTA AZUL 220V PTC	1,16	1,16
5	CONECTOR 1/2BX	0,63	3,15
7	METROS CABLE DE TERMOCUPLA	2,37	16,59
12	METROS MANGUERA 1/2BX	1,52	18,24
20	TERMINAL PIN #14X12 AZUL CAMSCO	0,04	0,80
		SUBTOTAL	342,94
		IVA (12%)	41,15
		TOTAL	384,09

Tabla 6.2 Costo de la Acometida de Diesel

ACOMETIDA DE DIESEL			
CANTIDAD	DETALLE	P. UNITARIO	TOTAL
1	B103 1/4"	1,56	1,56
1	B120 1/4" X 1/8"	1,34	1,34
1	B122 1/4"	1,56	1,56
2	B122 3/8" X 3/8"	1,34	2,68
3	B3 1/4" X 5/16"	0,94	2,81
1	B3 5/16" X 1/4"	0,89	0,89
1	BOQUILLA PARA QUEMADOR 3.00 - 45A	6,50	6,50
1	BOQUILLA PARA QUEMADOR 3.25 - 70A	6,50	6,50
1	BOQUILLA PARA QUEMADOR 2.00 - 70A	6,50	6,50
1	BOQUILLA PARA QUEMADOR 2.50 - 70A	6,50	6,50
2	BUSHING 1/2" X 3/8"	0,27	0,54
2	BUSHING 3/4" X 1/2"	0,27	0,54
3	BUSHING 3/4" X 1/2" HIERRO	1,96	5,89
16	CODO DE 1/2"	0,30	4,82
1	EMPAQUE DE FILTRO F10-48	4,00	4,00
1	FILTRO CASTIRON TOP PURE OIL ELEMENT	35,00	35,00
4	LLAVE DE PASO 1/2" FV	3,48	13,93
1	MANÓMETRO 0 - 240 PSI, VERTICAL	10,69	10,69
1	MANÓMETRO 0-200 PARA QUEMADOR DIESEL GLISERINA	17,00	17,00
1	METRO DE MANGUERA 5/16"	0,94	0,94
8	NEPLO 1/2" X 2" HG	0,40	3,21
5	NEPLO CORRIDO DE 1/2"	0,38	1,92
1	PERMATEX	1,21	1,21

1	REDUCCIÓN 1" X 1/2"	0,89	0,89
2	REDUCCION 1/2" X 3/8"	1,12	2,23
6	ROLLO TEFLÓN	0,28	1,69
2	TANQUES DE 55 GALONES	15,00	30,00
2	TAPONES DE 1/2" MACHO	0,18	0,36
3	TE DE 1/2"	0,36	1,07
2	TUBOS HG 1/2" X 6MTS	13,52	27,04
4	UNIVERSAL DE 1/2"	0,63	2,50
1	ÁNGULO DE 1" X 1" X 1/8"	14,00	14,00
1	PLANCHA DE ETERNIT	20,00	20,00
2	TUBOS NEGROS 2"	15,22	30,44
		SUBTOTAL	266,75
		IVA (12%)	32,01
		TOTAL	298,76

Tabla 6.3 Costo de la Ductería

DUCTERÍA			
CANTIDAD	DETALLE	P. UNITARIO	TOTAL
2	CODOS DE 300X500mm GALVANIZADOS	58,04	116,07
1	TRANSICIÓN REDONDO CUADRADO PARA SUCCIÓN VENTILADOR	142,85	142,85
14	LANA CON ALUMINIO 1.2 FIBERGLASS	3,42	47,92
1	SILICON 1200 GRIS	2,32	2,32
6	PLANCHAS DE TOL GALVANIZADO	30,00	180,00
1	ANGULO DE 1" X 1" X 1/8"	14,00	14,00
		SUBTOTAL	503,16
		IVA (12%)	60,38
		TOTAL	563,54

Tabla 6.4 Costo de los Equipos

EQUIPOS			
CANTIDAD	DETALLE	P. UNITARIO	TOTAL
1	QUEMADOR A DIESEL MARCA WAYNE DE 2-6 GPH	780,00	780,00
1	CONSTRUCCIÓN DE UN VENTILADOR CENTRÍFUGO TIPO D18 EN ACERO A36, BALANCEADO EN LOS 2 PLANOS, ESTÁTICO Y DINÁMICO. INTERCAMBIADOR DE CALOR CON TRES PASOS, CONSTRUCCIÓN DE UN HOGAR EN ACERO INOXIDABLE 304 CON ESPEJOS EN ACERO A36, TUBOS ISO 2 DE 2" DE DIÁMETRO Y CHIMENEA DE DESCARGA PARA GASES DE COMBUSTIÓN. CÁMARA DE TRANSPORTACIÓN DE AIRE EN ACERO A36 DE 2MM Y ESTRUCTURADA CON BASE PARA FORRADO EXTERIOR EN HG DE 0.70 Y AISLAMIENTO TÉRMICO DE FIBRA DE PIEDRA CON ESPESOR DE 2". REJILLA DIFUSOR EN ACERO A36	3100,00	3100,00
1	MOTOR ELÉCTRICO SIEMENS DE 3HP 1660 RPM	250,00	250,00
		SUBTOTAL	4130,00
		L	0
		IVA (12%)	495,60
		TOTAL	4625,60

Tabla 6.5 Costo de los Materiales Complementarios

MATERIALES COMPLEMENTARIOS			
CANTIDAD	DETALLE	P. UNITARIO	TOTAL
1	MIRILLA DE VIDRIO DE 3"	10	10,00
8	PERNO EXPANSIÓN 3/8" X 2"	0,35	2,80
4	PERNO EXPANSIÓN 5/16" X 2"	0,30	1,20
20	PERNO HEXAGONALES 1/4 X 1"	0,05	1,04
16	PERNOS INOX 1/2" X 1 1/4"	1,00	15,98
		SUBTOTAL	31,03
		IVA (12%)	3,72
		TOTAL	34,75

6.2. INVERSIÓN TOTAL

Para obtener los costos totales necesarios para ejecutar el proyecto, no solo hay que tomar en cuenta la inversión en materiales y equipos sino también la mano de obra necesaria para el diseño y la ejecución del proyecto. A continuación se detallan todos los costos necesarios que incluyen el diseño y la construcción del horno de pintura.

Tabla 6.6 Costos Especializados

COSTOS ESPECIALIZADOS	
	COSTO UNITARIO
Director	\$ 600,00
Codirector	\$ 300,00
Sr. Gustavo Carrillo	\$ 200,00
Sr. Byron Guerrero	\$ 200,00
TOTAL	1300,00

Tabla 6.7 Inversión Total

TIPO DE INVERSION	MONTO
AUTOMATIZACION	\$ 384,09
ACOMETIDA DE DIESEL	\$ 298,76
DUCTERIA	\$ 563,54
MATERIALES COMPLEMENTARIOS	\$ 34,75
EQUIPOS	\$ 4.625,60
MANO DE OBRA	\$ 1.300,00
TOTAL	\$ 7.206,74

6.3. DEPRECIACIÓN Y RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN

Depreciación de los equipos

A continuación se depreciarán los equipos anexos al horno para un período de 10 años, ya que por concepto de la Ingeniería Económica, los equipos y maquinaria se deprecian en un período de 10 años.

Tabla 6.8 Depreciación de Equipos del Horno

RUBROS DEPRECIADOS	% DEPREC	AÑOS											
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
QUEMADOR	10%	0	87,36	87,36	87,36	87,36	87,36	87,36	87,36	87,36	87,36	87,36	87,36
VENTILADOR	10%	0	112,00	112,00	112,00	112,00	112,00	112,00	112,00	112,00	112,00	112,00	112,00
INTERCAMBIADOR DE CALOR	10%	0	235,20	235,20	235,20	235,20	235,20	235,20	235,20	235,20	235,20	235,20	235,20
TABLERO DE CONTROL	10%	0	43,02	43,02	43,02	43,02	43,02	43,02	43,02	43,02	43,02	43,02	43,02
MOTOR ELECTRICO	10%	0	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
TOTAL DE DEPRECIACION ANUAL			502,58	502,58	502,58	502,58	502,58	502,58	502,58	502,58	502,58	502,58	502,58

Para poder determinar de forma adecuada la depreciación se tienen que calcular las rentas que se obtienen con el horno nuevo. Al basarse en datos y en la experiencia del personal del centro de producción se ha logrado determinar que al usar el horno nuevo se logra obtener un ahorro. A continuación se indica el ahorro obtenido con el nuevo horno.

Tabla 6.9 Costos de Producción Diarios del Horno Nuevo

HORNO NUEVO				
COSTOS MENSUALES DE PRODUCCIÓN	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNIT	SUBTOTAL
COMBUSTIBLE	36	GAL DE DIESEL	\$ 1,04	\$ 37,44
ENERGÍA ELÉCTRICA	62	kW-Hr	\$ 0,08	\$ 4,96
MANO DE OBRA	2	Operadores	\$ 850,00	\$ 1.700,00
TOTAL				\$ 1.742,40
TOTAL x DÍA				\$ 75,76

Tabla 6.10 Costos de Producción Diarios del Horno Antiguo

HORNO ANTIGUO				
COSTOS MENSUALES DE PRODUCCIÓN	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNIT	SUBTOTAL
COMBUSTIBLE	140	Kg GLP	\$ 0,55	\$ 77,00
ENERGÍA ELÉCTRICA	22	kW-Hr	\$ 0,08	\$ 1,76
MANO DE OBRA	2	Operadores	\$ 850,00	\$ 1.700,00
TOTAL				\$ 1.778,76
TOTAL X DÍA				\$ 77,34

Con los costos diarios y mensuales de producción del horno se pueden determinar los costos unitarios de producción del horno antiguo y del horno nuevo. Para ello se compararon los costos y la producción de distintos tipos de muebles.

Tabla 6.11 Determinación de los Ahorros Obtenidos con el Horno Nuevo

PRODUCTO	PRODUCCION MENSUAL		COSTO DE PROD UNITARIO		COSTO DE PROD MENSUAL		AHORRO MENSUAL	%AHORRO
	HORNO 2	HORNO 1	HORNO 2	HORNO 1	HORNO 2	HORNO 1		
CAMAS	200	120	\$ 1,52	\$ 2,58	\$ 303,03	\$ 515,58	\$ 212,56	41,23%
SILLAS	600	240	\$ 0,51	\$ 1,29	\$ 303,03	\$ 773,37	\$ 470,35	60,82%
ARCHIVADORES	48	24	\$ 3,16	\$ 6,44	\$ 151,51	\$ 309,35	\$ 157,84	51,02%
ANAQUELES	32	20	\$ 4,73	\$ 7,73	\$ 151,51	\$ 247,48	\$ 95,97	38,78%
ARMARIOS	16	8	\$ 9,47	\$ 19,33	\$ 151,51	\$ 309,35	\$ 157,84	51,02%
ESCRITORIOS	24	12	\$ 6,31	\$ 12,89	\$ 151,51	\$ 309,35	\$ 157,84	51,02%
MESAS	48	32	\$ 6,31	\$ 9,67	\$ 303,03	\$ 464,02	\$ 161,00	34,70%
TOTAL							\$ 1.413,38	

Tabla 6.12 Incremento mensual de la producción

PRODUCTO	PRODUCCION MENSUAL		INCREMENTO DE LA PRODUCCIÓN
	HORNO 2	HORNO 1	
CAMAS	200	120	66.67%
SILLAS	600	240	150.00%
ARCHIVADORES	48	24	100.00%
ANAQUELES	32	20	60.00%
ARMARIOS	16	8	100.00%
ESCRITORIOS	24	12	100.00%
MESAS	48	32	50.00%
TOTAL			89.52%

Tiempo de recuperación de la inversión (TR)

El tiempo de recuperación de la inversión se determina con la siguiente ecuación:

$$TR = \frac{\textit{Inversion Total}}{\textit{Ahorro Mensual}}$$

Ec. (6.1) Tiempo de recuperación de la inversión

Reemplazando los datos obtenidos en la ecuación se obtiene lo siguiente

$$TR = \frac{\$ 7.206,74}{\$ 1.413,38} = 5.1$$

Este resultado nos indica que el capital invertido en el horno se recupera en un tiempo de 5 meses y dos días, lo que indica que es muy rentable la inversión en el horno nuevo.

6.4. CÁLCULO DE LA TIR, VAN Y ANÁLISIS COSTO – BENEFICIO

Según datos del Banco Central del Ecuador, se ha determinado que la tasa de interés activa promedio se encuentra en un 17%. Este valor será la tasa de descuento a ser tomada en cuenta para calcular la TIR y el VAN.

Cálculo del VAN

Una forma de evaluar los proyectos se basa en tomar en cuenta el valor del dinero a través del tiempo. Para poder aplicar este método, se debe pasar el valor del dinero en un momento determinado a valor presente. Si el valor presente neto es positivo, el proyecto puede ser aceptado, caso contrario el proyecto no es rentable.

El VAN se calcula con la siguiente ecuación:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{FNC}{(1+k)^t} - I_0$$

Ec. (6.2) Valor Actual Neto

Donde:

FNC = Flujo neto de caja

K = Tasa de interés

I_0 = Inversión inicial

t = Periodo en años

Como se puede observar, para este caso es necesario obtener el valor del flujo neto de caja. Este será calculado de la siguiente forma:

El flujo neto de caja estará principalmente basado en el ahorro que se genera con el nuevo horno en un período de un año.

$$FNC = \frac{Ahorro}{(1 + k)^t}$$

Ec. (6.3) Flujo neto de caja

$$FNC = \frac{1413.38 * 12}{(1 + 0.17)^1} = 14496.20$$

Ahora, este valor será reemplazado en la ecuación del VAN para un período de un año.

$$VAN = \frac{14496.20}{(1 + 0.17)^1} - 7.206,74 = 5183.17$$

Como $VAN > 0$ el proyecto es rentable y debe ser aceptado. Además hay que tomar en cuenta que el período de recuperación del capital es relativamente corto.

Cálculo de la TIR

La TIR o Tasa Interna de Retorno por sus siglas, puede ser definida como la tasa de interés que iguala el valor presente de los flujos de efectivo esperados a futuro, o de los ingresos. Para este caso está directamente relacionada con el ahorro que genera el horno en el centro de producción y con la inversión inicial del proyecto.

La TIR se puede calcular de la siguiente forma:

$$\sum_{t=1}^n \frac{FNC_t}{(1 + TIR)^t} - I_0 = 0$$

Como estos cálculos se están realizando apenas para el primer año de funcionamiento del horno, la ecuación queda de la siguiente forma.

$$TIR = \frac{FNC}{I_0} - 1$$

Reemplazando los datos en la ecuación anterior se obtiene lo siguiente:

$$TIR = \left(\frac{14496.20}{7.206,74} - 1 \right) * 100$$

$$TIR = 101\%$$

Como la TIR es mucho mayor que la Tasa de Interés Activa, el proyecto es muy rentable.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- La investigación que se realizó fue muy determinante para la selección de tipo de horno para el curado de pintura electrostática, es por ello que se diseñó un horno de convección con sistema de calentamiento de aire a través de un intercambiador de calor.
- Se obtuvo una distribución uniforme de temperaturas en todo el interior del horno permitiendo utilizar todo su volumen; a diferencia del antiguo horno que se aprovechaba la mitad de su capacidad ya que el aire caliente se acumulaba únicamente en la parte superior y de mitad hacia abajo su temperatura no superaba los 30°C. La eficiencia térmica obtenida del horno es del 14%, la cual es aceptable para un sistema térmico ya que los valores en cuanto a pérdidas de calor son altos en comparación con el calor requerido por la carga.
- Los elementos del sistema de calentamiento fueron diseñados y construidos de forma que exista la menor cantidad de pérdidas. Fruto de ello se diseñó un intercambiador de calor con la menor cantidad posible de tubos. Los ductos de aire fueron diseñados de tal forma que sus pérdidas de presión fueron mínimas. Se tomaron en cuenta todas las caídas de presión que se perdían en ductos, accesorios, intercambiador de calor, rejilla de difusión y la presión a vencer debido al efecto chimenea, lo que permitió seleccionar adecuadamente el ventilador necesario para el sistema.
- El sistema de control cuenta con un controlador lógico programado de acuerdo a los parámetros de funcionamiento del horno como tiempos y

temperatura, estas variables pueden ser modificadas de acuerdo al tipo o color de pintura a ser utilizada, logrando con esto una mayor funcionalidad del horno.

- Las pruebas de funcionamiento fueron muy determinantes para establecer los tiempos de curado en función del color de pintura; es necesario señalar que se aumento en 1 minuto el tiempo de curado establecido en el diseño; estas desviaciones se dan ya que las ecuaciones de convección utilizadas son empíricas y generan errores de cálculo.
- El horno fue construido por un monto de \$7206.74 dólares que representa un ahorro considerable con respecto a los hornos que se pueden encontrar en el mercado que oscilan entre \$20000 dólares. Adicionalmente a la economía lograda en la construcción, con los mismos \$1700 dólares en cuanto a costos de producción se incrementa en un 90% la cantidad de piezas quemadas mensualmente, proporcionándonos un ahorro de \$1413.38 al mes; es decir que la inversión inicial se recupera en cinco meses.

RECOMENDACIONES

- Antes de utilizar el horno es necesario revisar a profundidad el manual de operación del horno, el cual se encuentra en el Capítulo 5 de este documento.
- Ningún operador del horno está facultado para cambiar los parámetros de funcionamiento del quemador, adicionalmente, para realizar el mantenimiento del mismo será necesario buscar un técnico especializado en la calibración de quemadores, ya que el quemador cuenta con sistemas complejos y sensibles en su interior.
- Es necesario elaborar un cuadro de curado en función del tipo y del color de la pintura, ya que los parámetros de funcionamiento del horno pueden variar dependiendo del tipo y la procedencia de la misma.
- Se recomienda mejorar los procesos de producción en lo que respecta a la operación del horno ya que muchas veces se evidenció una mala utilización del mismo, al no ser aprovechado en su máxima capacidad. Es necesario utilizar al horno en su máxima capacidad ya que de esta manera se evitan pérdidas innecesarias de energía y por ende pérdidas económicas.

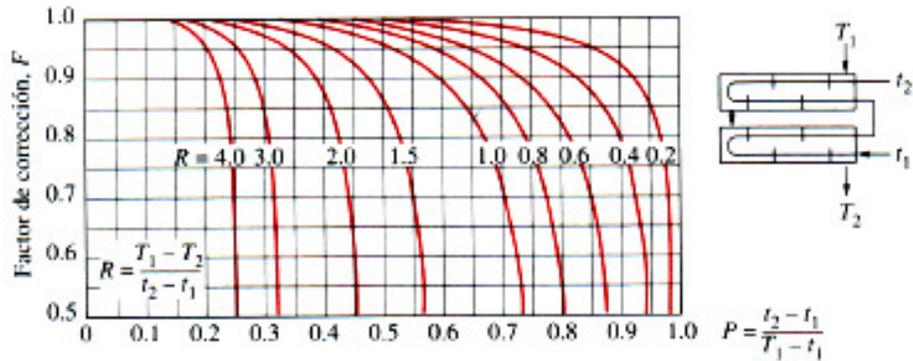
BIBLIOGRAFÍA

- **CENGEL – BOLES**; Transferencia de Calor y Masa; Quinta Edición; México 2002.
- **KERN**, Donald; Procesos de Transferencia de Calor; Trigésima primera edición; México 1999
- **INCROPERA – BOLES**; Transferencia de Calor y Masa; Quinta Edición; México 2000
- **BRASSO**, Jorge ; Lussol Pinturas, Boletín N° 1- 2006
- **Hojas Técnicas**, Pinturas en polvo, WESCO S.A
- **REED**, Richard; North American Combustion Handbook; Volume I; Third Edition; United States 1995.
- **REED**, Richard; North American Combustion Handbook; Volume II; Third Edition; United States 1995.
- **TRINKS, W**; Industrial Furnaces; Sexta edición; United States 2003.
- **MOTT**, Robert; Mecánica de Fluidos aplicada; Cuarta edición; México 1996.

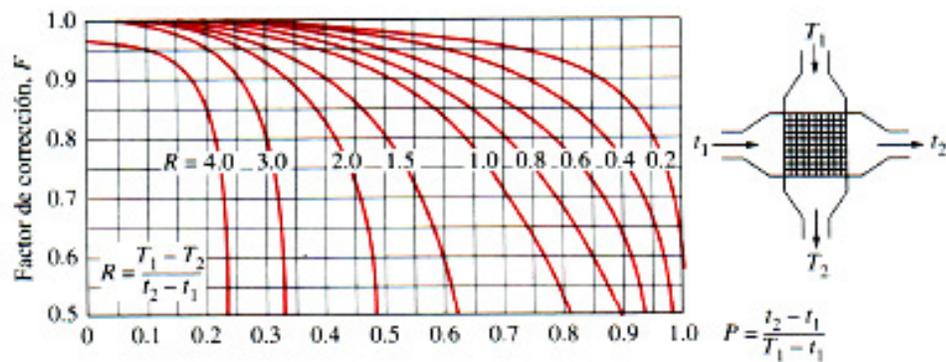
ANEXOS

ANEXO A

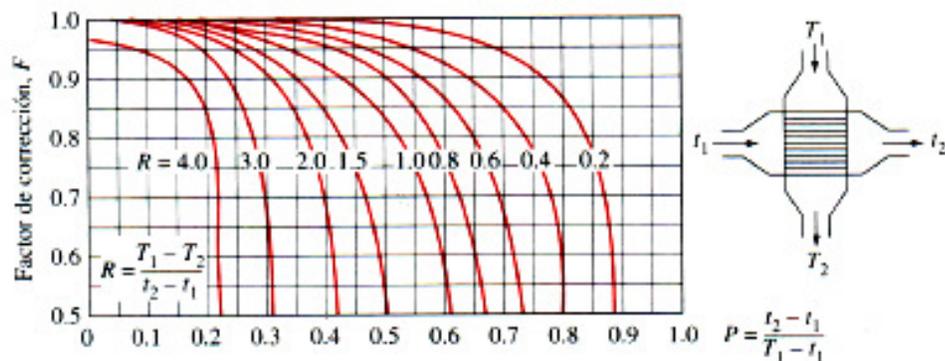
Factor de corrección para un intercambiador en flujo cruzado



b) Dos pasos por la coraza y 4, 8, 12, etc. (cualquier múltiplo de 4) pasos por los tubos



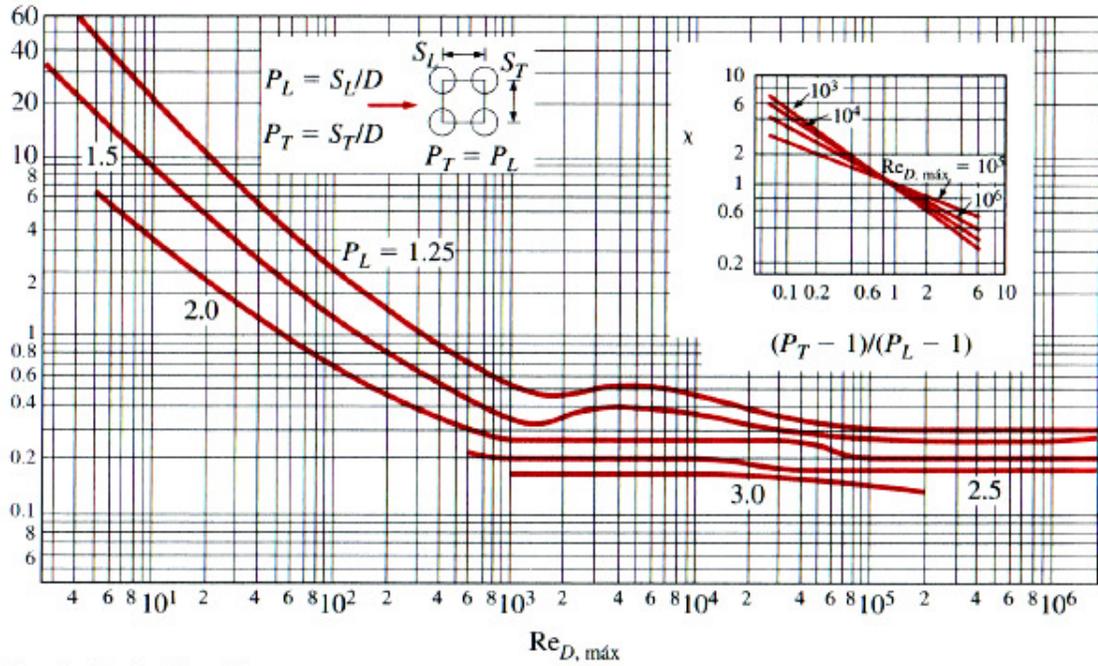
c) Flujo cruzado de un solo paso con los dos fluidos de flujo no *mezclado*



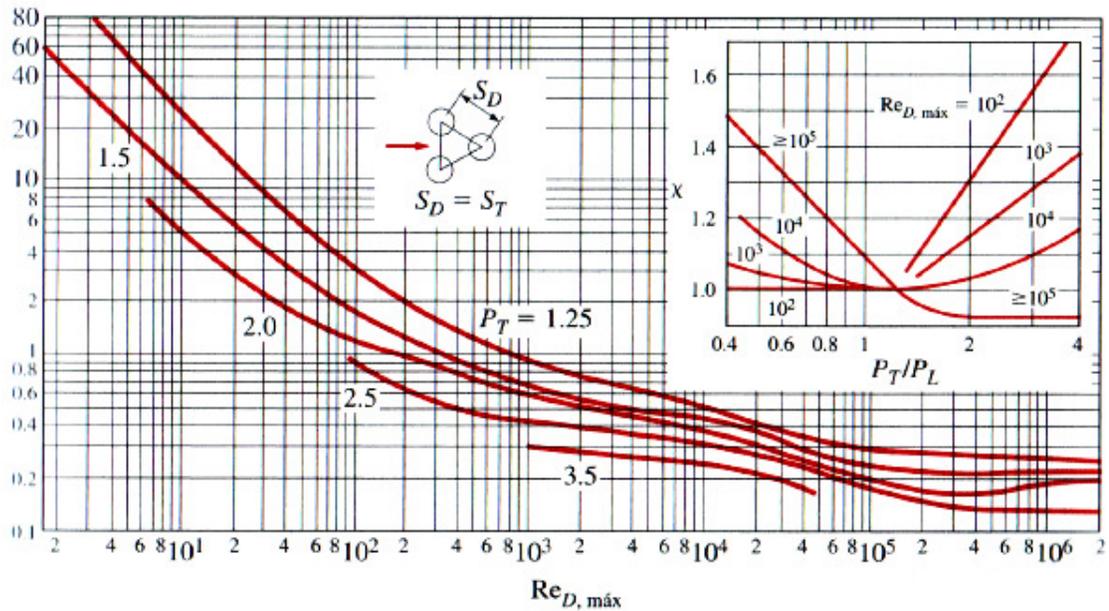
d) Flujo cruzado de un solo paso con uno de los fluidos de flujo *mezclado* y el otro no *mezclado*

ANEXO B

Factores de fricción para pérdidas de presión en intercambiadores de calor



Disposición de alineados

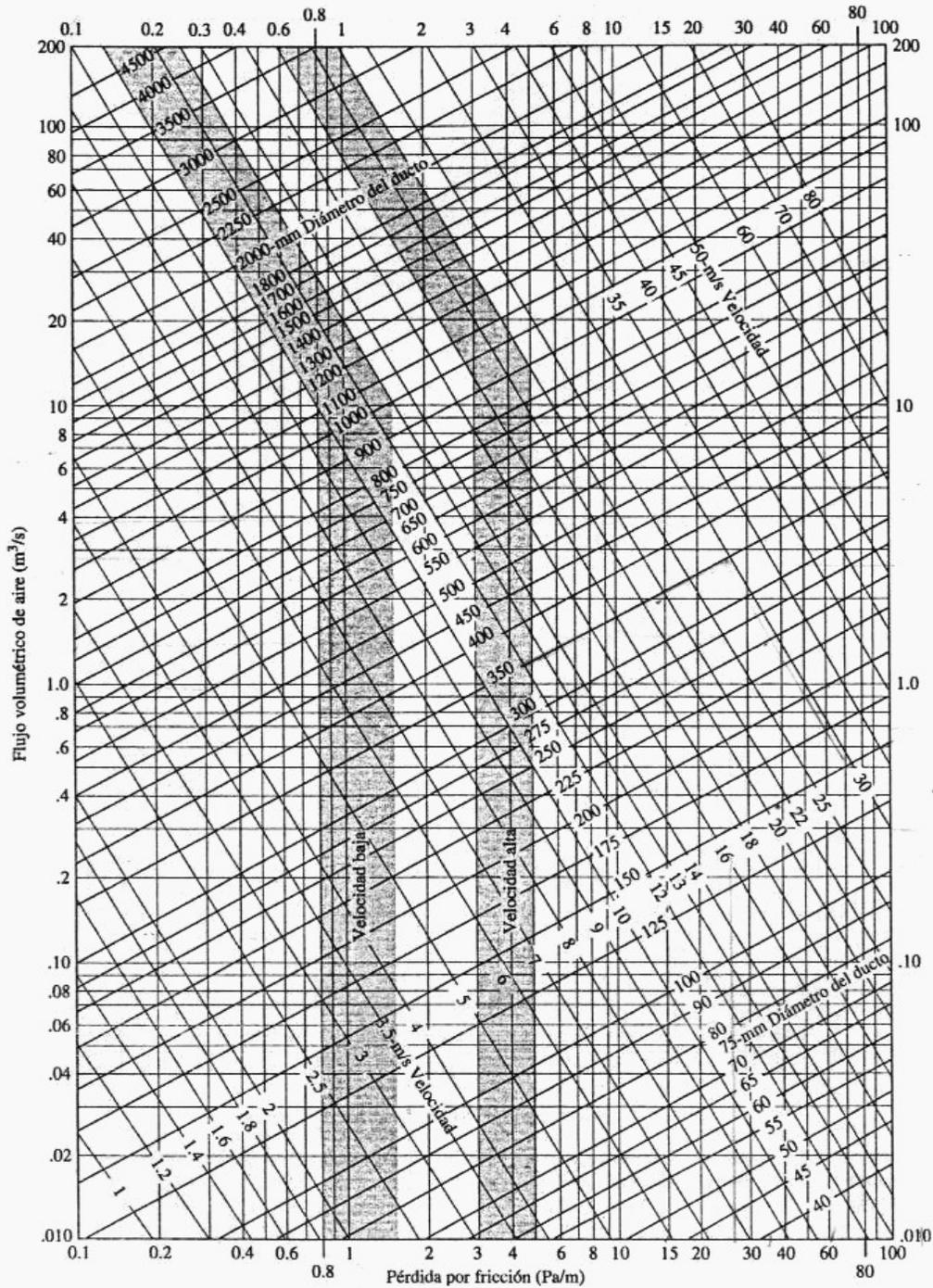


Disposición escalonada

ANEXO C

Pérdidas por fricción en ductos

Capítulo 19 Flujo de aire en ductos



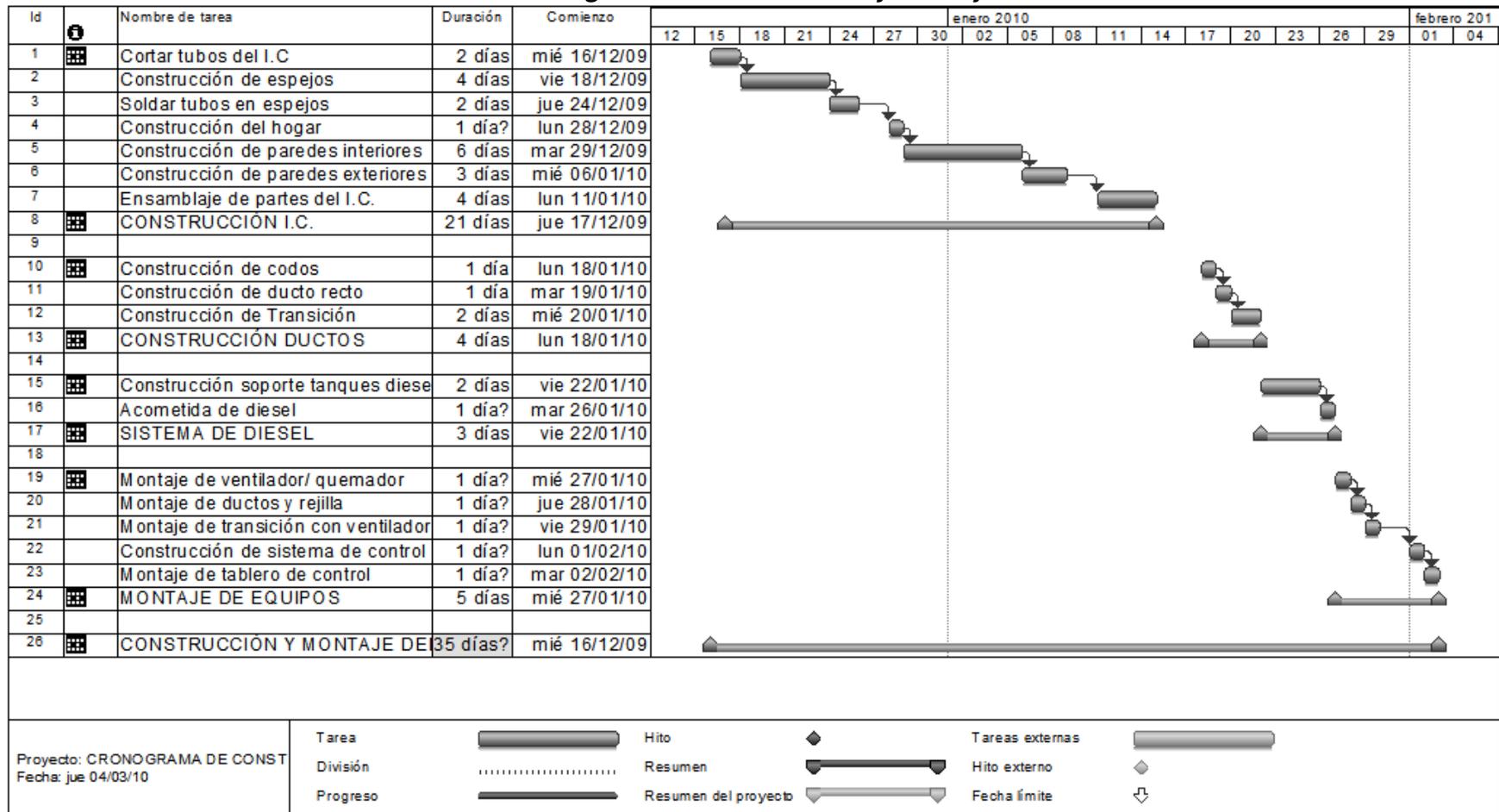
ANEXO D

Coefficiente de pérdidas dinámicas en accesorios

Coeficiente de pérdida dinámica, C						
Codos a 90°						
	Liso, redondo					0.22
	5 piezas, redondo					0.33
	4 piezas, redondo					0.37
	3 piezas, redondo					0.42
	Puntiagudo, redondo					1.20
	Liso, rectangular					0.18
	T, rama					1.00
	T, flujo a través de la tubería principal					0.10
	Y simétrica					0.30
Amortiguador:						
Posición	0°	10°	20°	30°	40°	50°
	(completamente abierto)					
C	0.20	0.52	1.50	4.5	11.0	29

ANEXO F

Cronograma de construcción y montaje



ANEXO G



Intercambiador de calor ensamblado



Hogar del intercambiador de calor



Intercambiador con aislamiento



Construcción del ventilador



Ventilador ensamblado



Ventilador e intercambiador ensamblados



Rejilla de difusión de cuatro vías



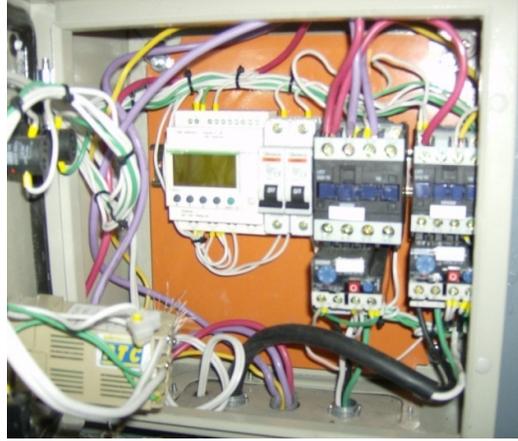
Tanques de almacenamiento de diesel



Motor del Ventilador



Quemador a diesel

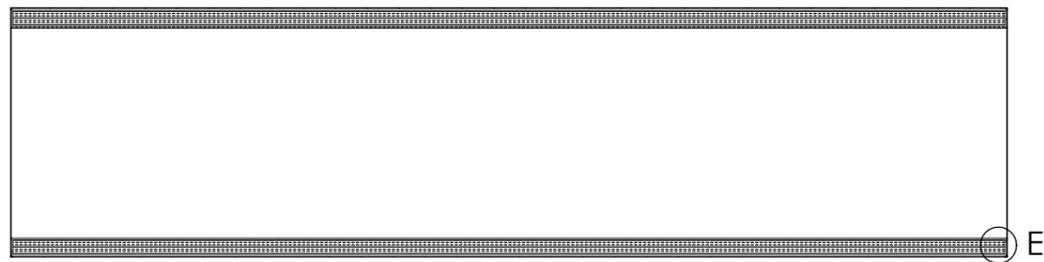


Tablero de control

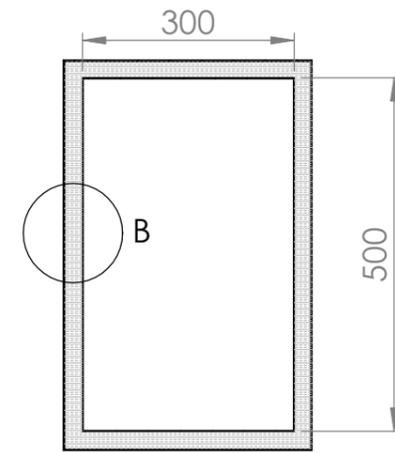
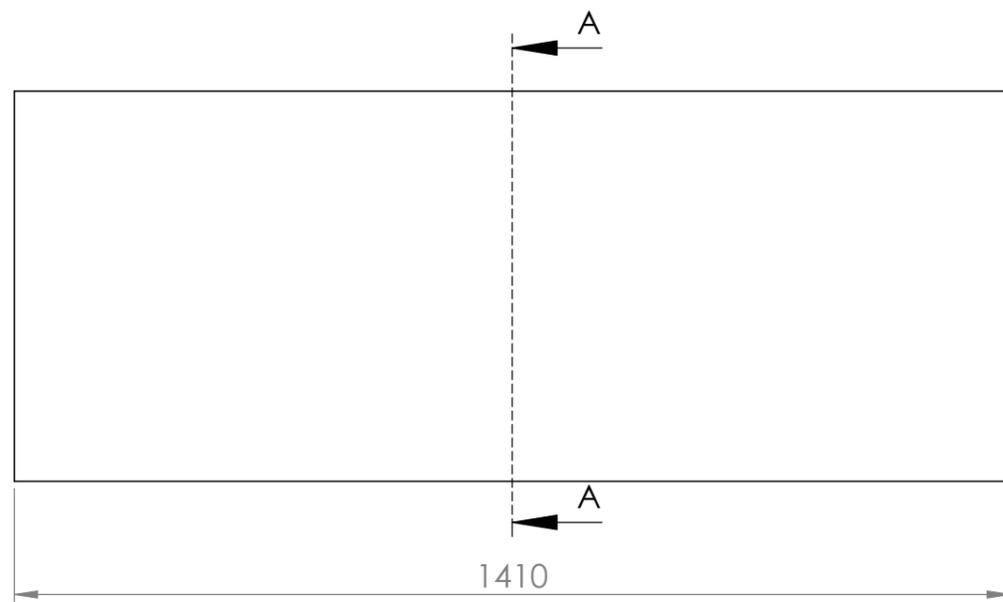
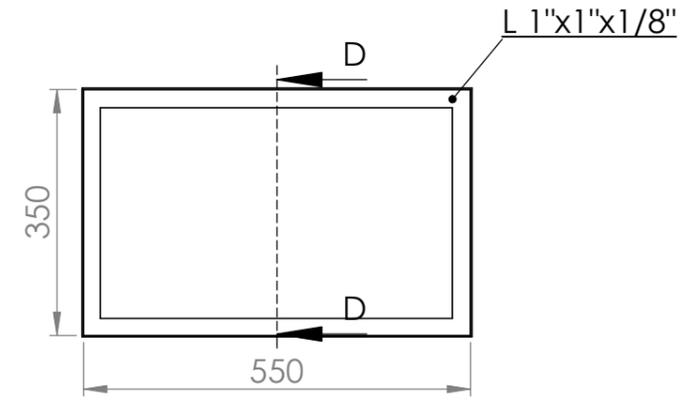


Horno para el curado de pintura electrostática

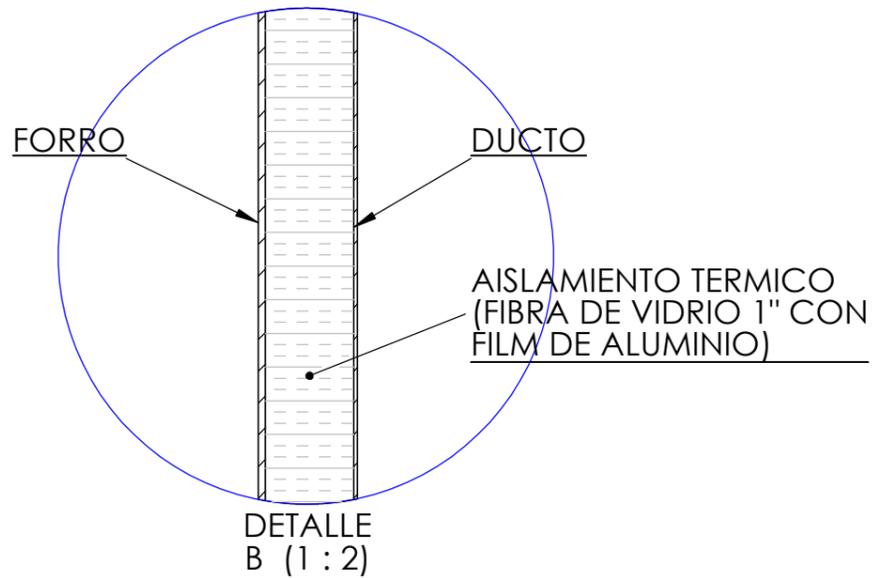
ANEXO H



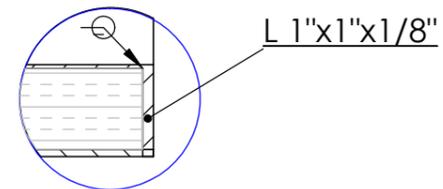
D-D (1 : 10)



A-A (1 : 10)

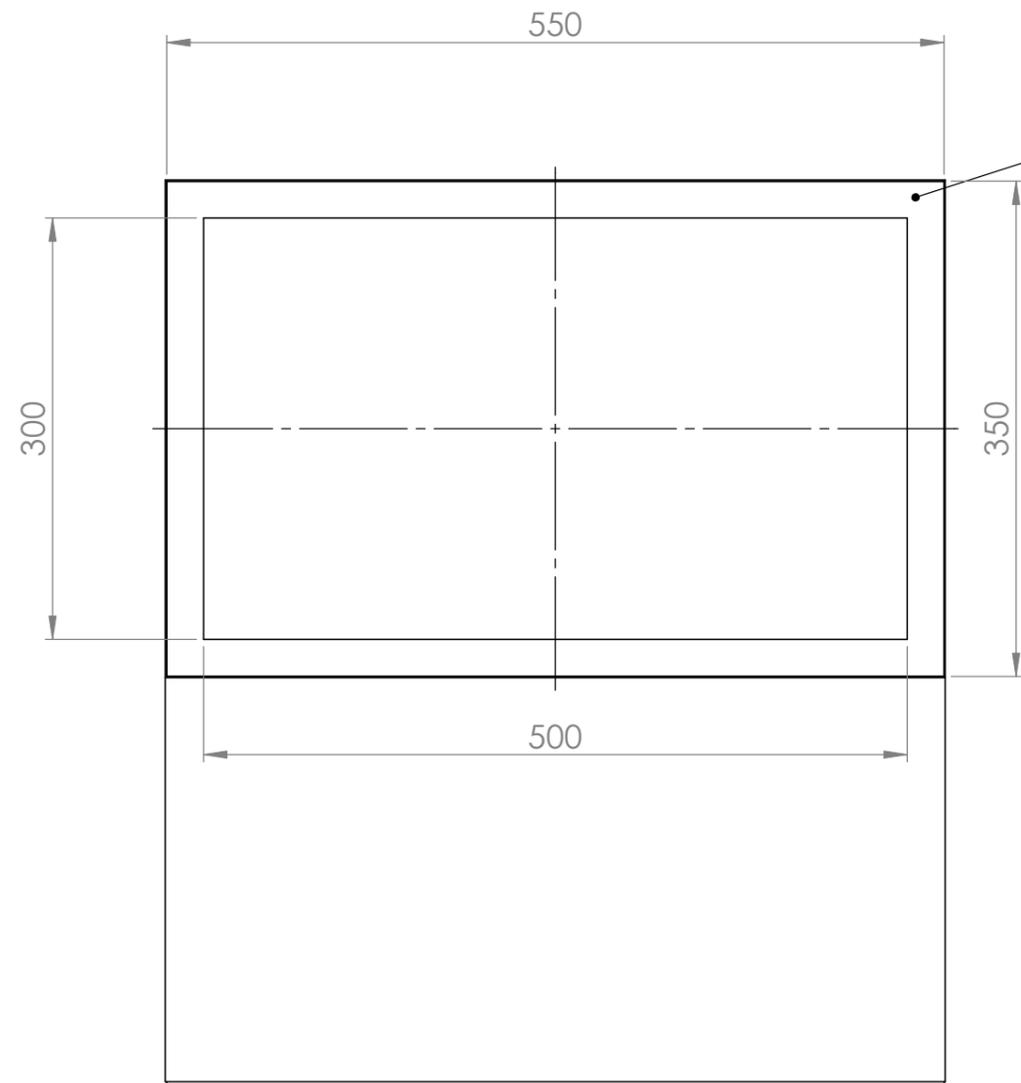


DETALLE B (1 : 2)

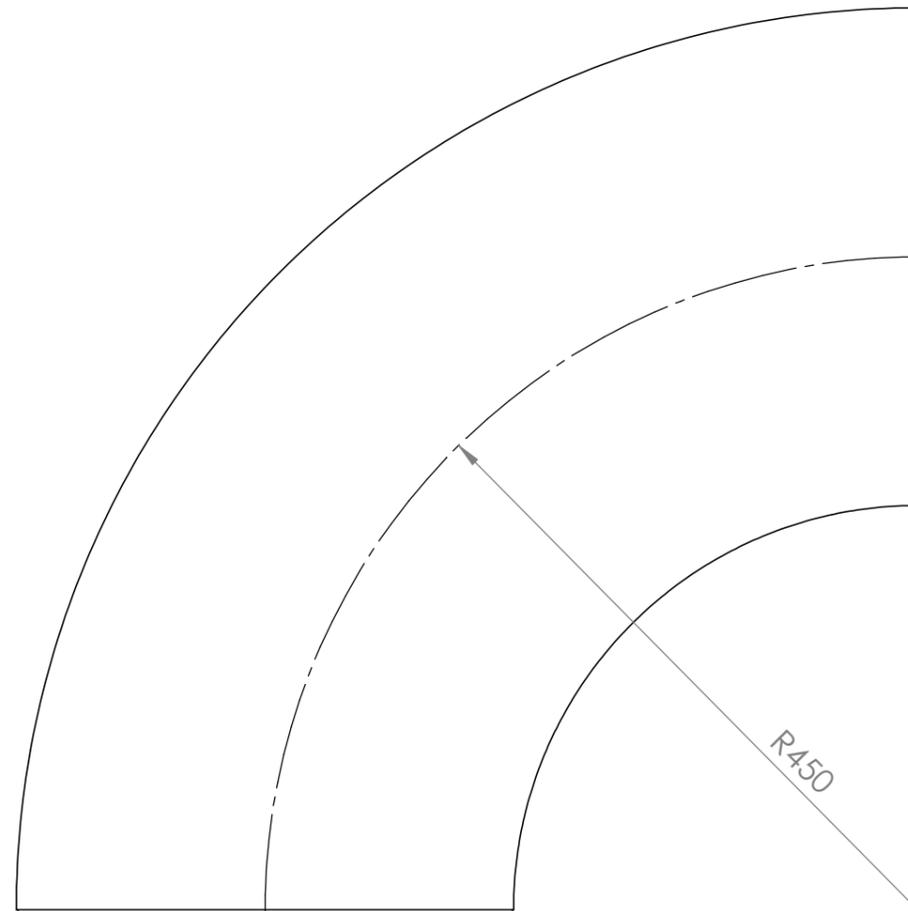


DETALLE E (1 : 2)

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	03/03/10	Byron Guerrero		ACERO GALVANIZADO 1 mm	1
DIBUJADO	03/03/10	Gustavo Carrillo		CONTIENE:	ESCALA:
REVISADO	10/03/10	Ing. L. Echeverría		DUCTO RECTO	1 : 10
APROBADO	10/03/10	Ing. F. Montenegro		CODIGO:	
ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO CARRERA DE INGENIERIA MECANICA				DC - 01	
				SUSTITUYE A:	HOJA: 1/1



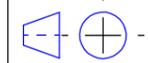
L 1"x1"x1/8"

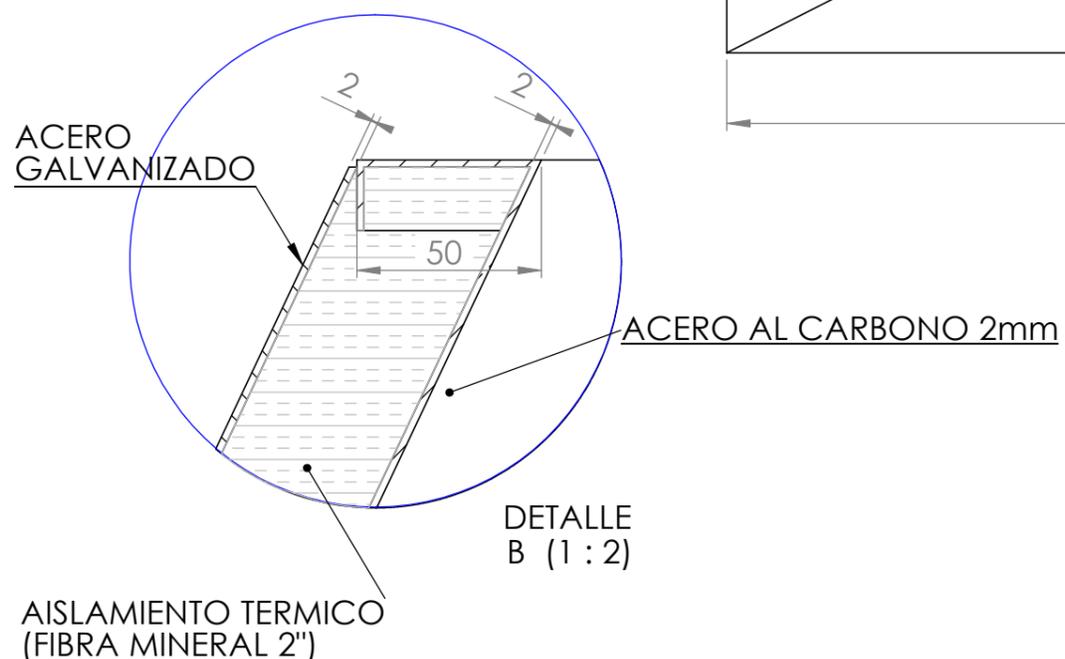
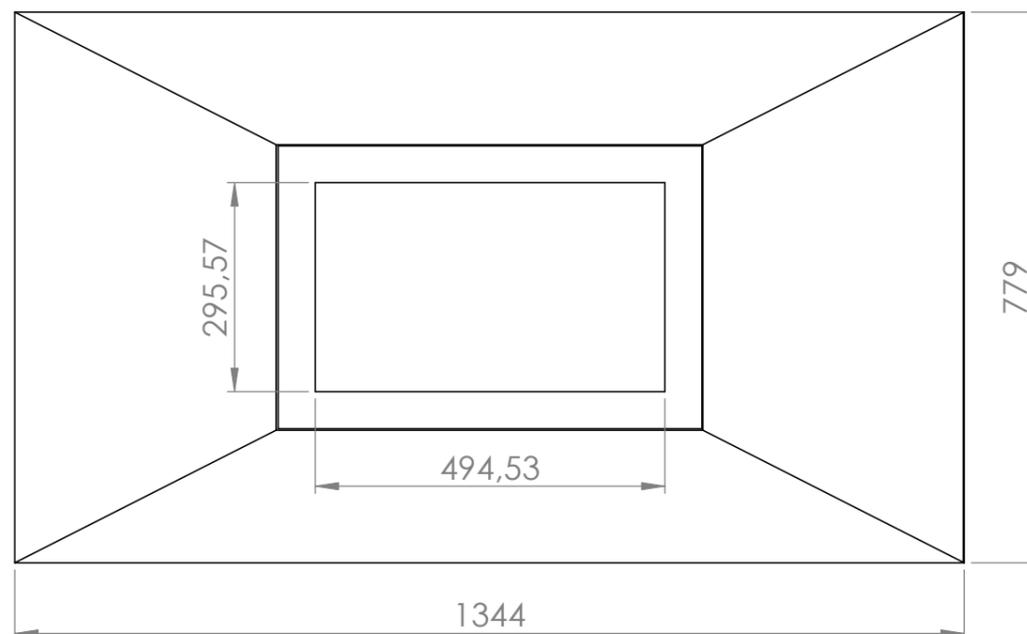
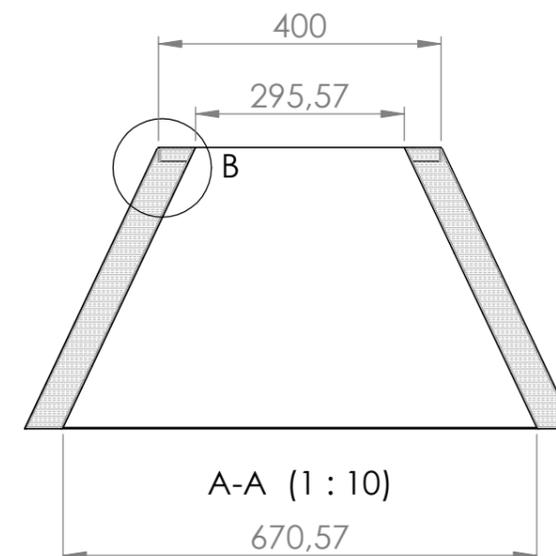
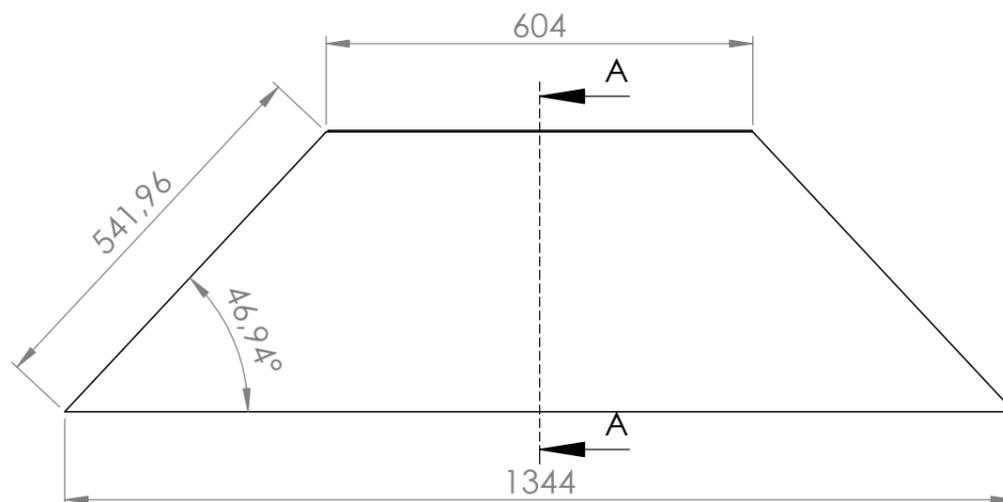
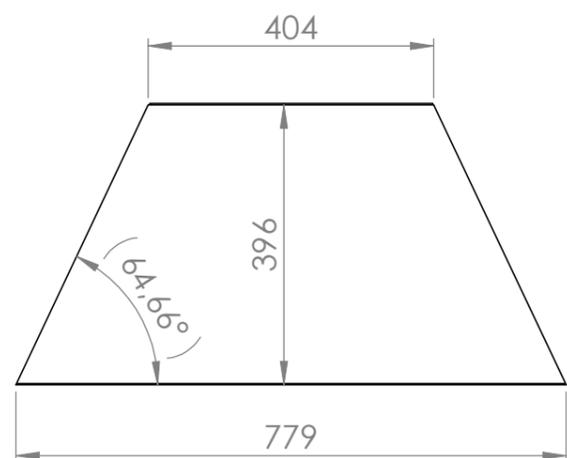


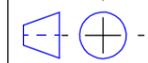
R450

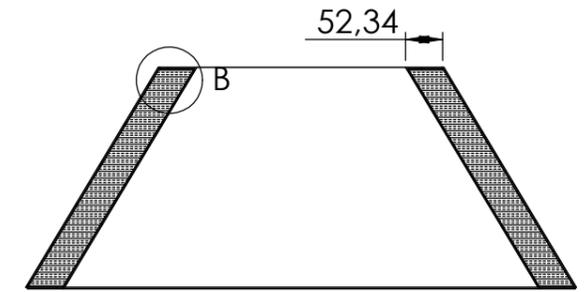
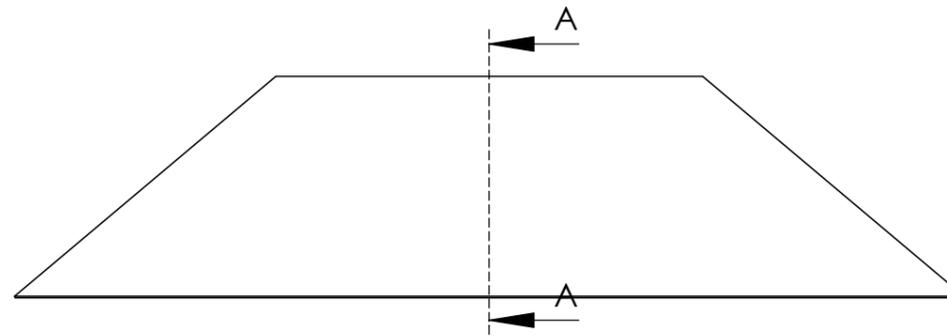
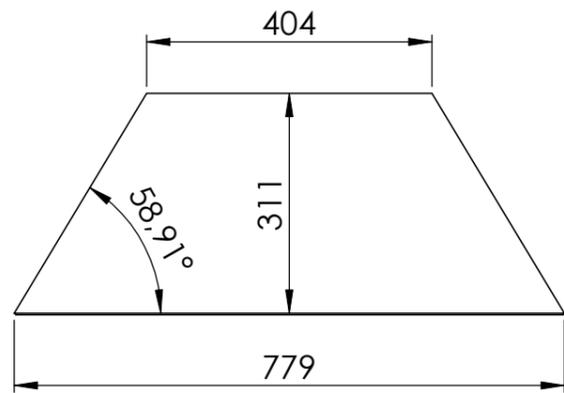
NOTA:

La forma de ensamblar el codo y sus detalles son iguales a los indicados en el plano DC-01

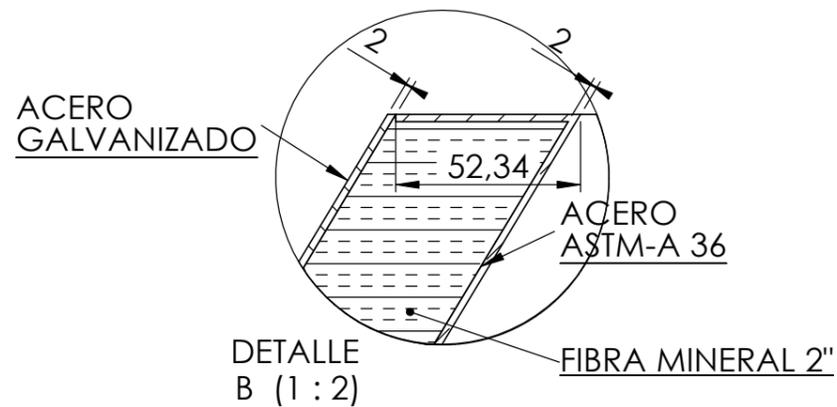
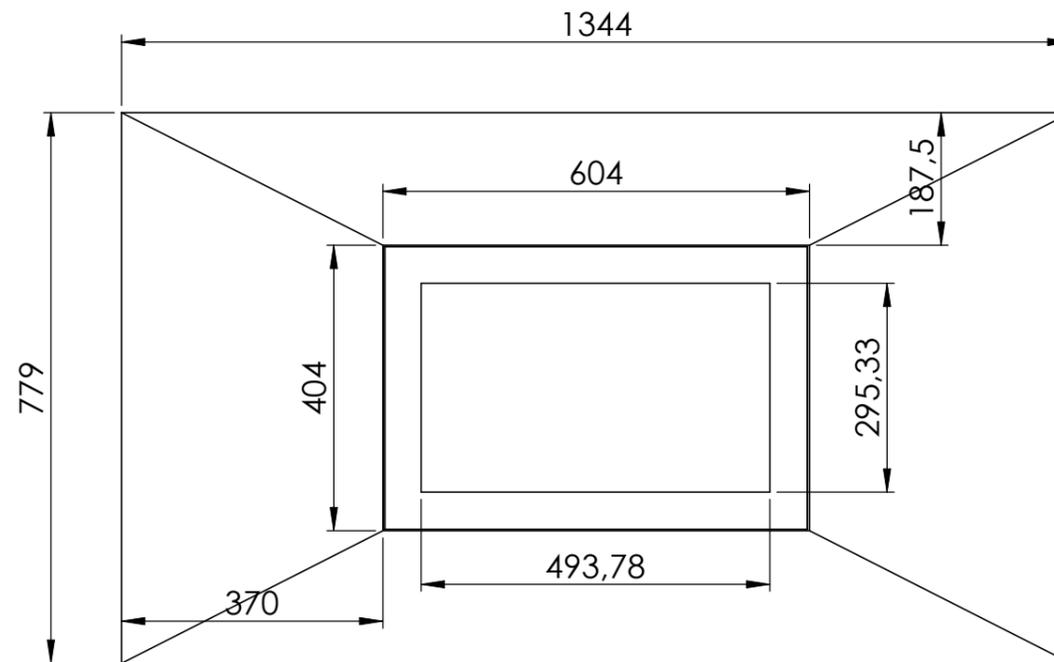
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	03/03/10	Byron Guerrero		ACERO GALVANIZADO 1 mm	1
DIBUJADO	03/03/10	Gustavo Carrillo		CONTIENE:	ESCALA:
REVISADO	10/03/10	Ing. L. Echeverría		CODO 90°	1 : 5
APROBADO	10/03/10	Ing. F. Montenegro			
ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO CARRERA DE INGENIERIA MECANICA				CODIGO: DC-02	
				SUSTITUYE A:	HOJA: 1/1



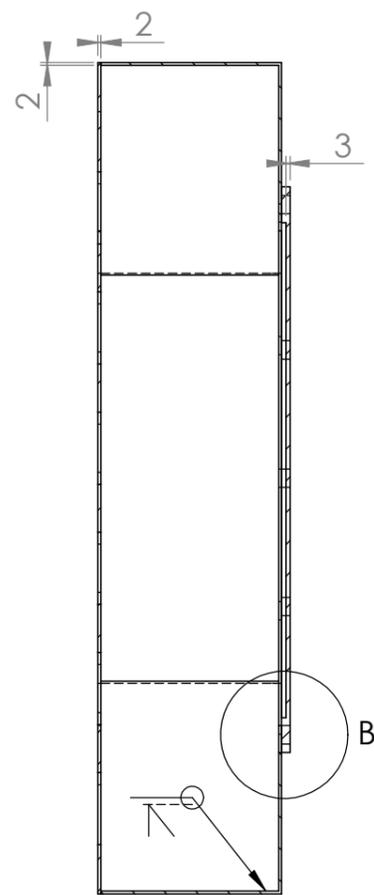
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	03/03/10	Byron Guerrero			1
DIBUJADO	03/03/10	Gustavo Carrillo		CONTIENE:	ESCALA:
REVISADO	10/03/10	Ing. L. Echeverría		TRANSICION SUPERIOR DEL INTERCAMBIADOR	1:10
APROBADO	10/03/10	Ing. F. Montenegro			
ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO CARRERA DE INGENIERIA MECANICA				CODIGO: DC-03	
				SUSTITUYE A:	HOJA: 1/1



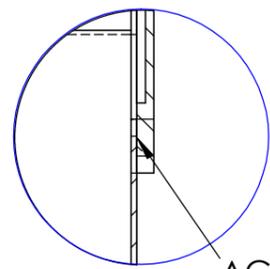
A-A (1 : 10)



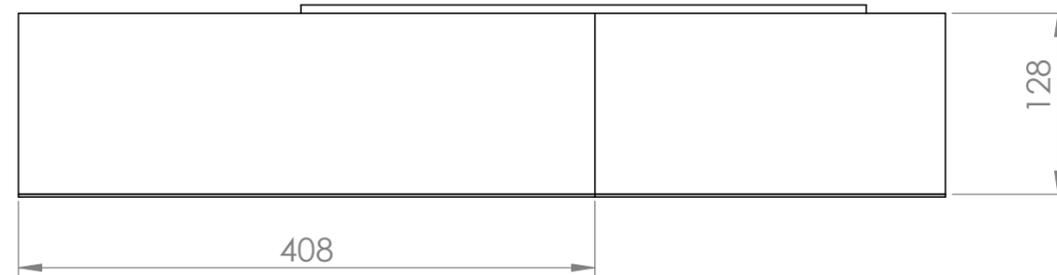
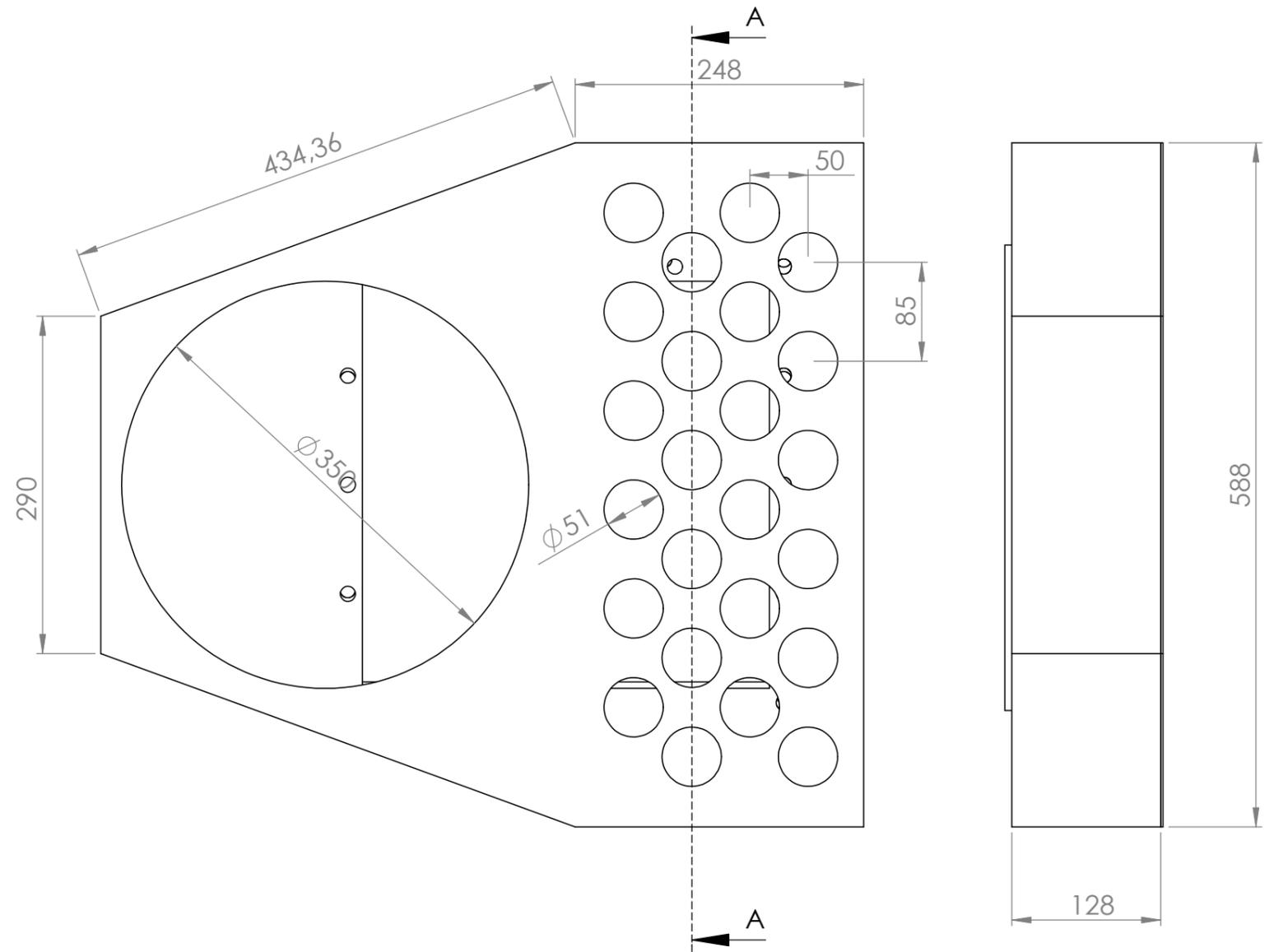
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	03/03/10	Byron Guerrero			1
DIBUJADO	03/03/10	Gustavo Carrillo		CONTIENE:	ESCALA:
REVISADO	10/03/10	Ing. L. Echeverría		TRANSICION INFERIOR DEL INTERCAMBIADOR	1 : 10
APROBADO	10/03/10	Ing. F. Montenegro			
ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO CARRERA DE INGENIERIA MECANICA				CODIGO: DC-04	 HOJA: 1/1
				SUSTITUYE A:	



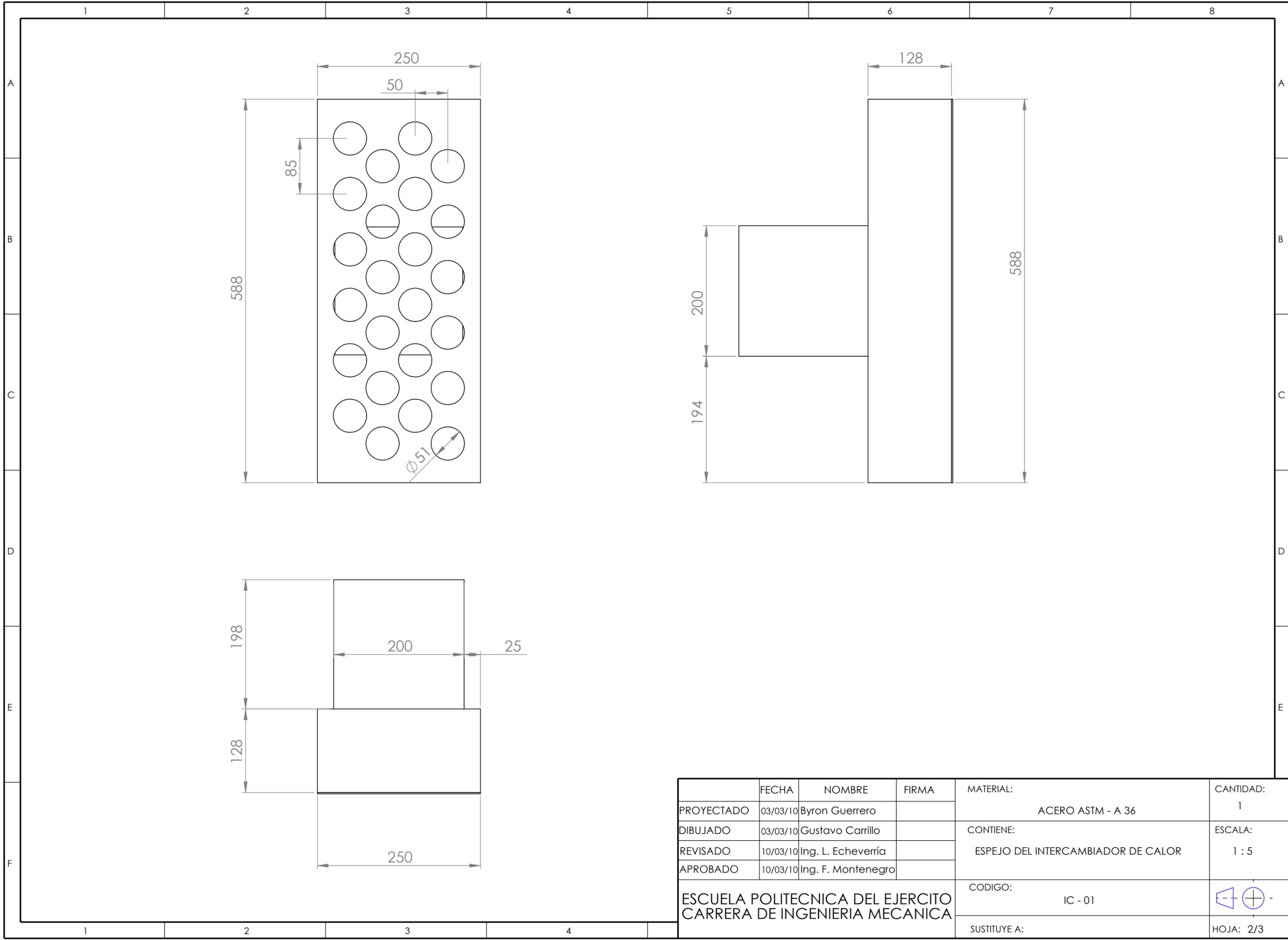
A-A (1 : 5)



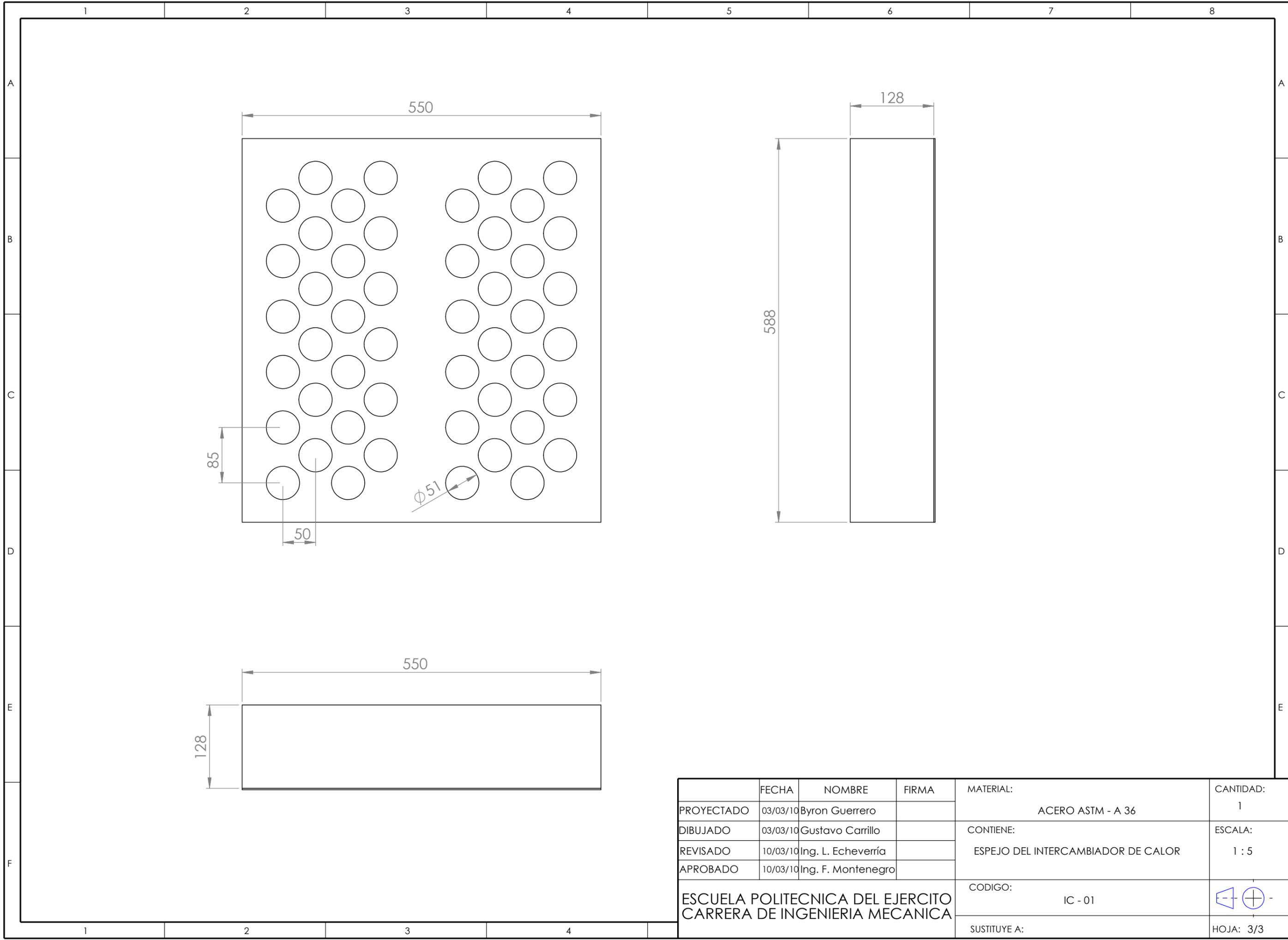
DETALLE B (2 : 5)
AGUJERO PASANTE DE 14 mm



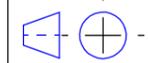
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	03/03/10	Byron Guerrero		ACERO ASTM - A 36	1
DIBUJADO	03/03/10	Gustavo Carrillo			CONTIENE:
REVISADO	10/03/10	Ing. L. Echeverría		ESPEJO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR	1 : 5
APROBADO	10/03/10	Ing. F. Montenegro			
ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO CARRERA DE INGENIERIA MECANICA				CODIGO:	
				IC - 01	
				SUSTITUYE A:	HOJA: 1/3

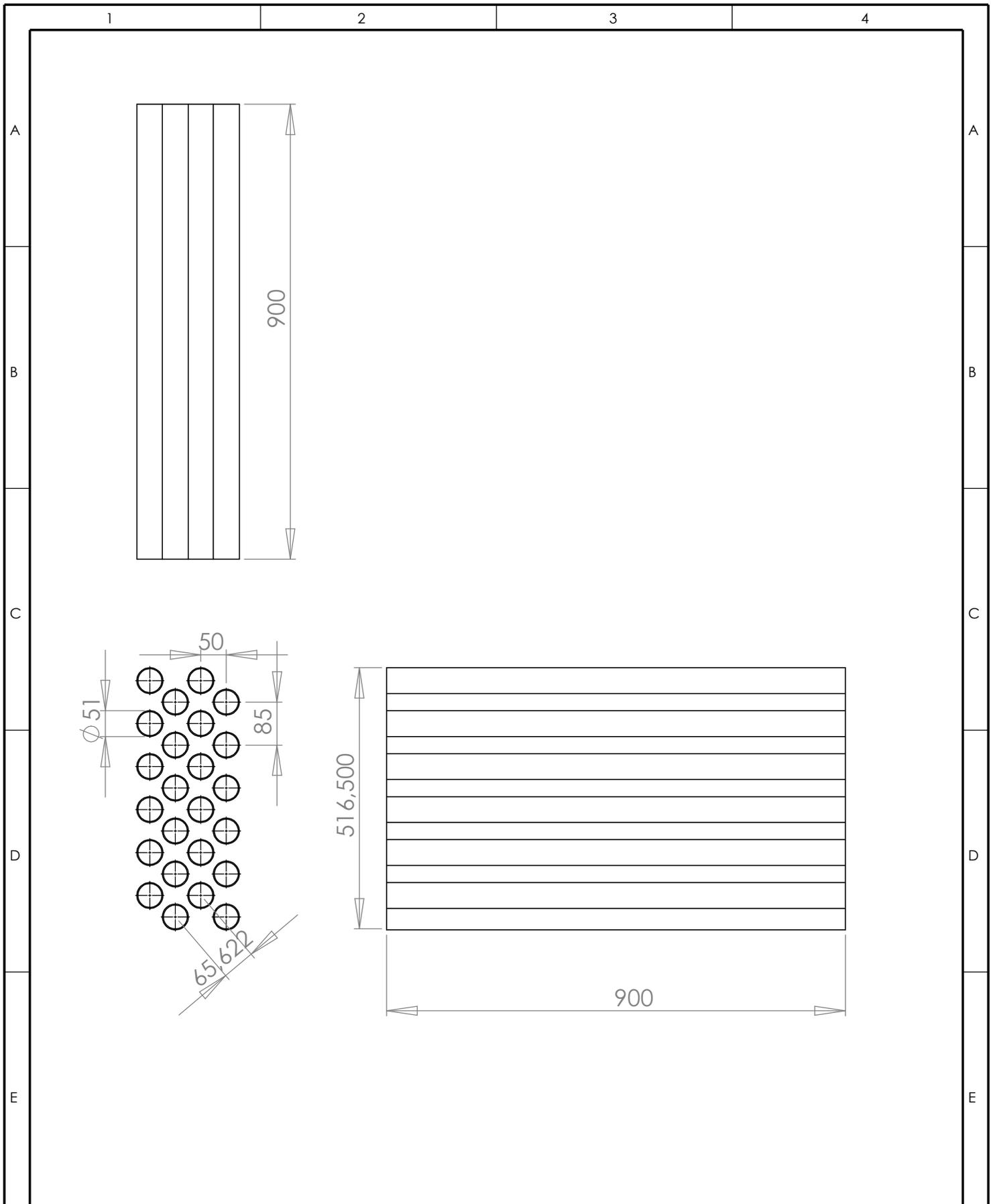


	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	03/03/10	Byron Guerrero		ACERO ASTM - A 36	1
DIBUJADO	03/03/10	Gustavo Carrillo			CONTIENE:
REVISADO	10/03/10	Ing. L. Echeverría		ESPEJO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR	1 : 5
APROBADO	10/03/10	Ing. F. Montenegro			
ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO CARRERA DE INGENIERIA MECANICA				CODIGO:	
				SUSTITUYE A:	
					HOJA: 2/3

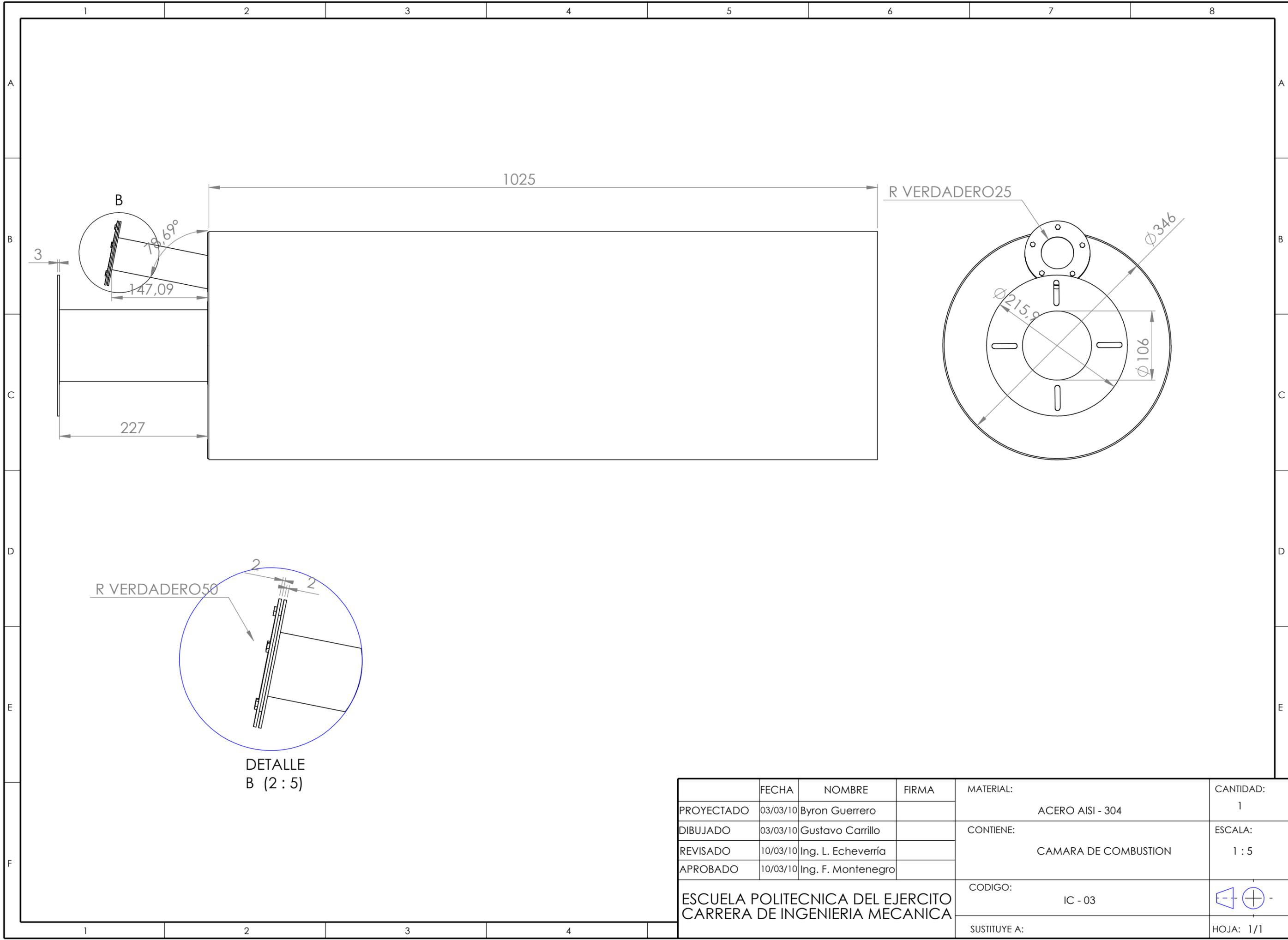


	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	03/03/10	Byron Guerrero		ACERO ASTM - A 36	1
DIBUJADO	03/03/10	Gustavo Carrillo			CONTIENE:
REVISADO	10/03/10	Ing. L. Echeverría		ESPEJO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR	1 : 5
APROBADO	10/03/10	Ing. F. Montenegro			
ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO CARRERA DE INGENIERIA MECANICA				CODIGO:	
				SUSTITUYE A:	HOJA: 3/3





	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	03/03/10	Byron Guerrero		TUBERIA ISO 2"	1
DIBUJADO	03/03/10	Gustavo Carrillo		CONTIENE:	ESCALA:
REVISADO	10/03/10	Ing. L. Echeverría		ARREGLO DE TUBOS DEL INTERCAMBIADOR	1 : 10
APROBADO	10/03/10	Ing. F. Montenegro			
ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO CARRERA DE INGENIERIA MECANICA				CODIGO:	
				SUSTITUYE A:	

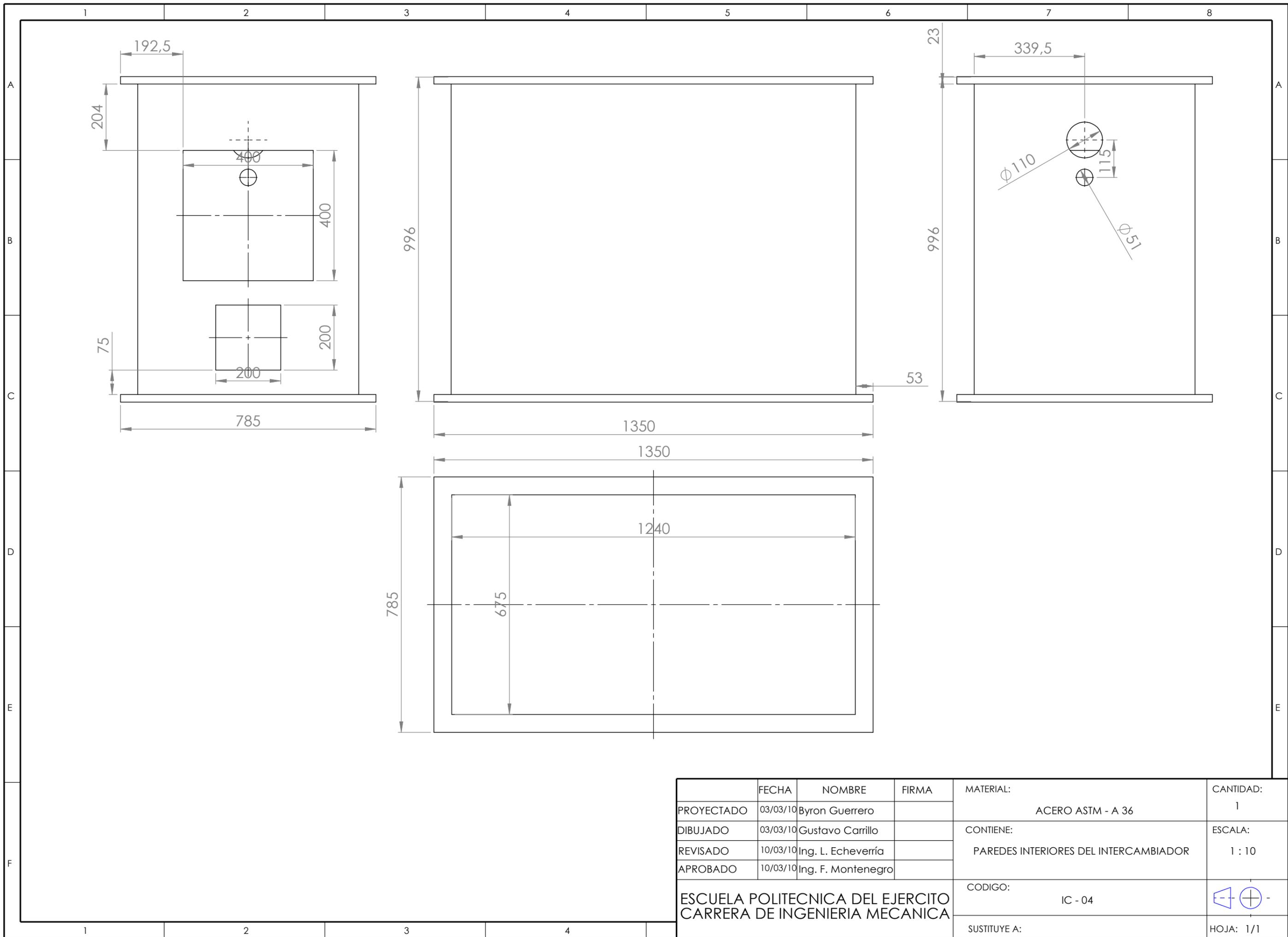


R VERDADERO 50

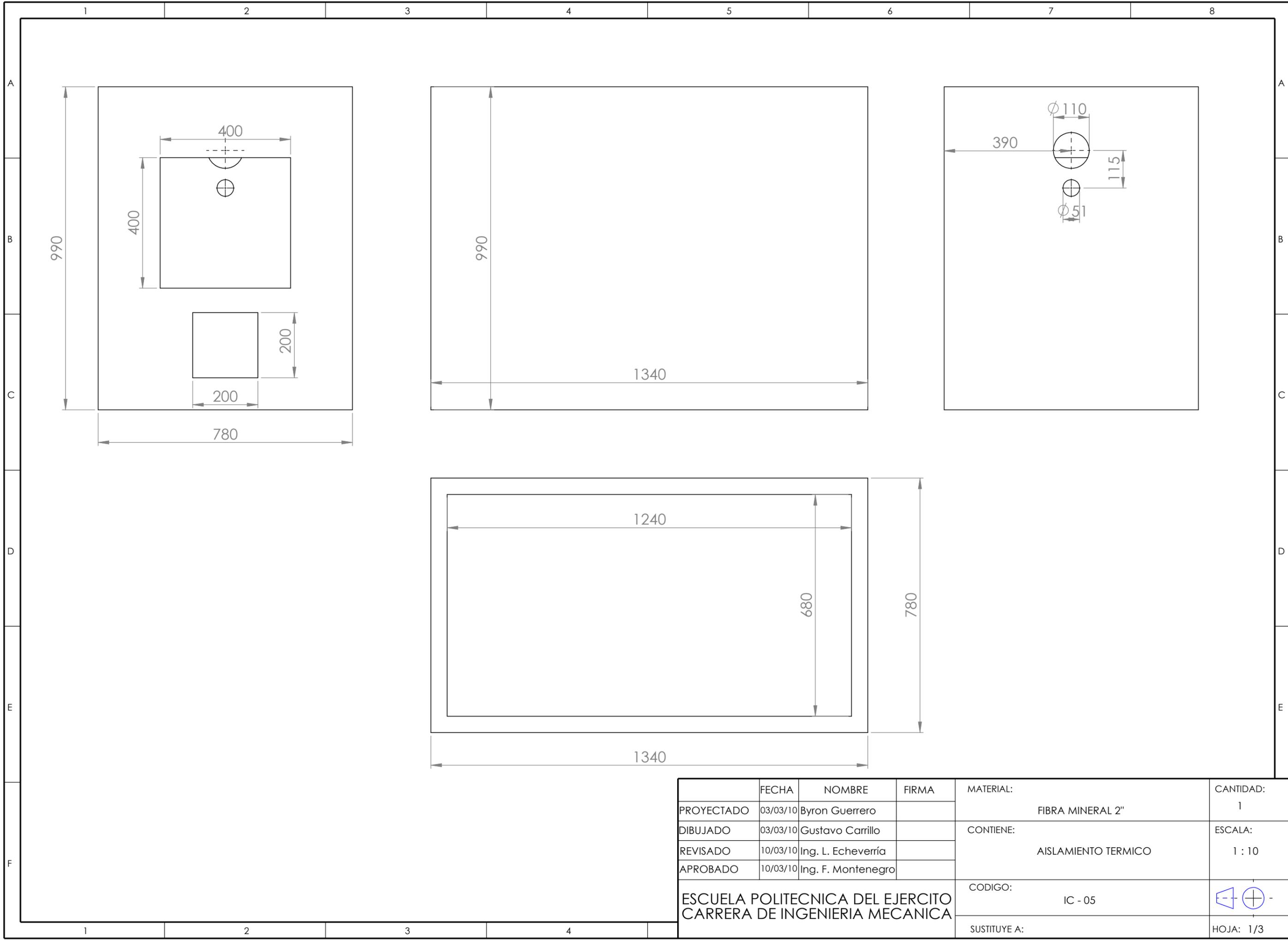
DETALLE
B (2 : 5)

R VERDADERO 25

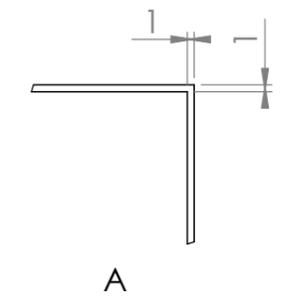
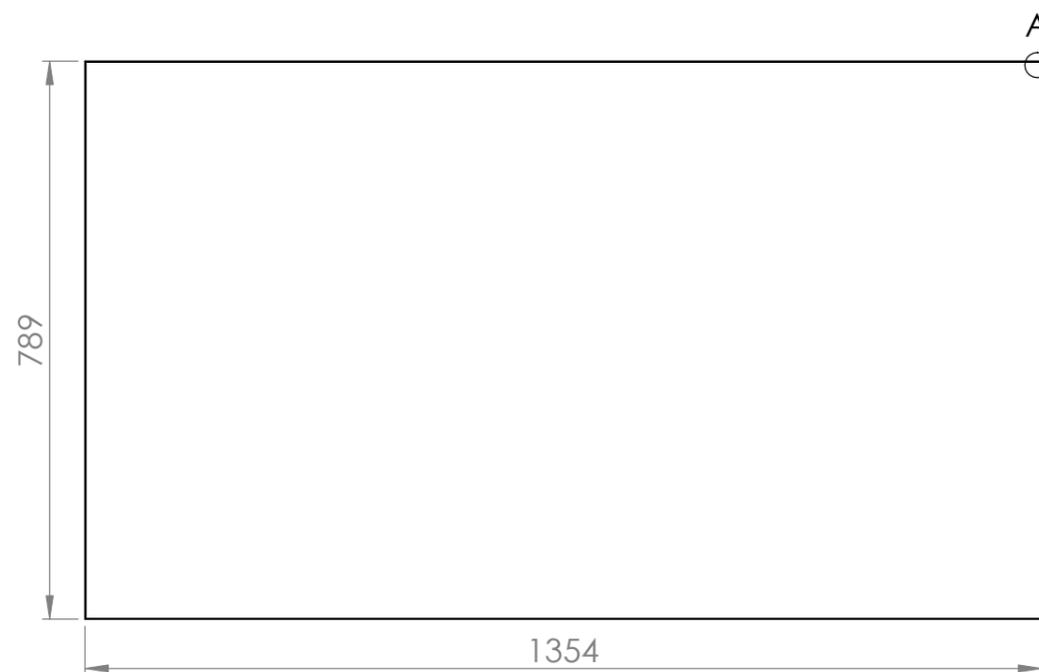
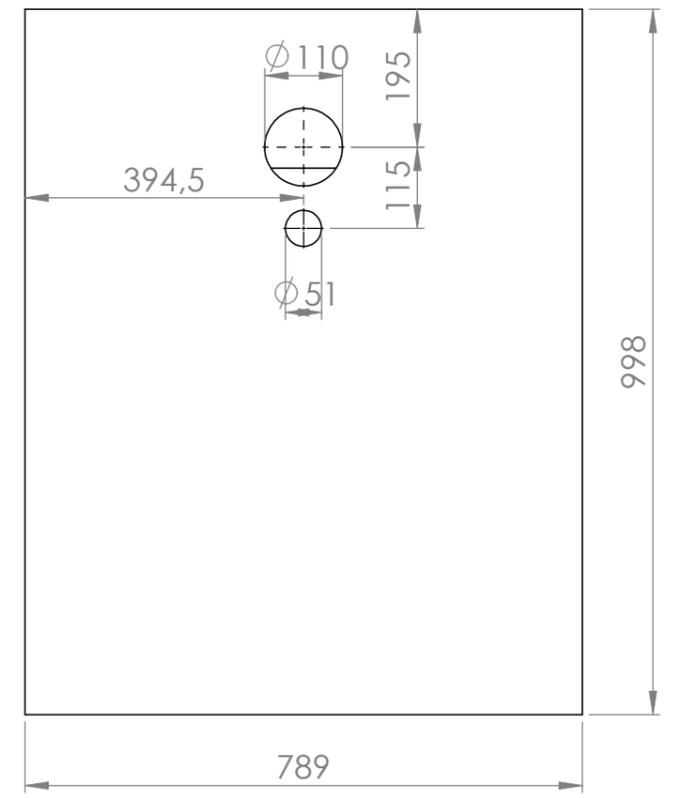
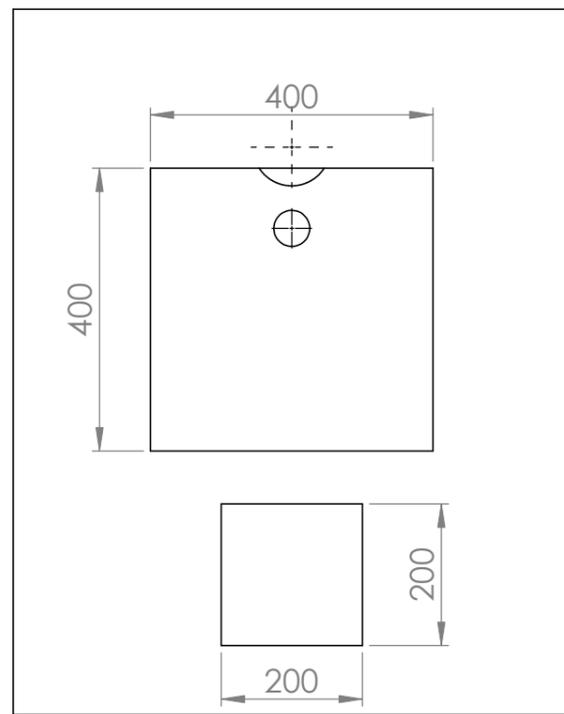
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	03/03/10	Byron Guerrero		ACERO AISI - 304	1
DIBUJADO	03/03/10	Gustavo Carrillo		CONTIENE:	ESCALA:
REVISADO	10/03/10	Ing. L. Echeverría		CAMARA DE COMBUSTION	1 : 5
APROBADO	10/03/10	Ing. F. Montenegro			
ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO CARRERA DE INGENIERIA MECANICA				CODIGO:	
				SUSTITUYE A:	



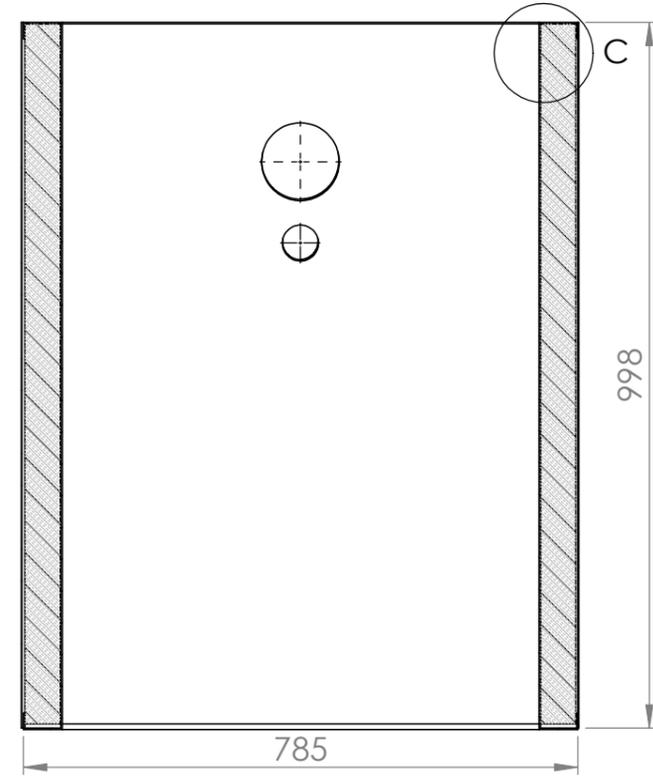
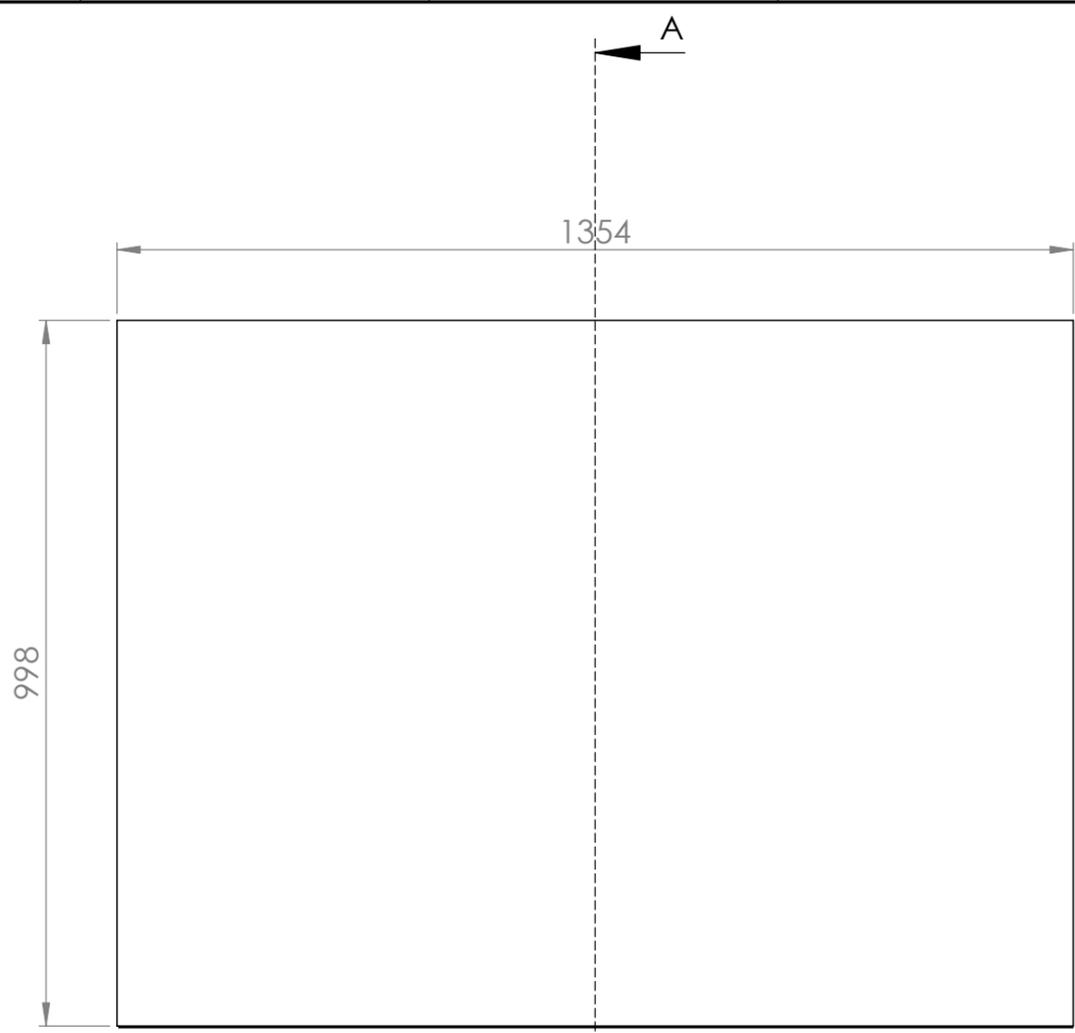
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	03/03/10	Byron Guerrero		ACERO ASTM - A 36	1
DIBUJADO	03/03/10	Gustavo Carrillo			CONTIENE:
REVISADO	10/03/10	Ing. L. Echeverría		PAREDES INTERIORES DEL INTERCAMBIADOR	1 : 10
APROBADO	10/03/10	Ing. F. Montenegro			
ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO CARRERA DE INGENIERIA MECANICA				CODIGO:	
				SUSTITUYE A:	HOJA: 1/1



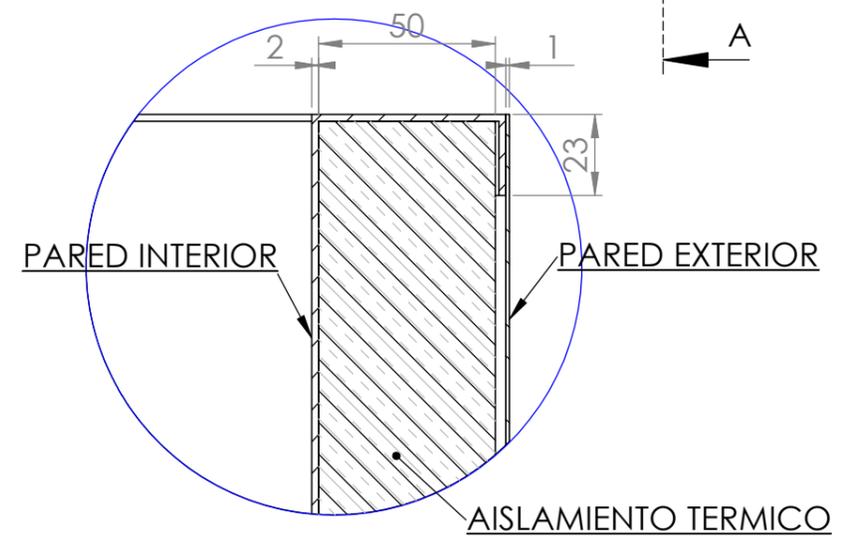
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	03/03/10	Byron Guerrero		FIBRA MINERAL 2"	1
DIBUJADO	03/03/10	Gustavo Carrillo		CONTIENE:	ESCALA:
REVISADO	10/03/10	Ing. L. Echeverría		AISLAMIENTO TERMICO	1 : 10
APROBADO	10/03/10	Ing. F. Montenegro			
ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO CARRERA DE INGENIERIA MECANICA				CODIGO:	
				SUSTITUYE A:	HOJA: 1/3



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	03/03/10	Byron Guerrero		ACERO ASTM - A 36	1
DIBUJADO	03/03/10	Gustavo Carrillo			CONTIENE:
REVISADO	10/03/10	Ing. L. Echeverría		PAREDES EXTERIORES DEL INTERCAMBIADOR	1 : 10
APROBADO	10/03/10	Ing. F. Montenegro			CODIGO:
ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO CARRERA DE INGENIERIA MECANICA				IC - 05	HOJA: 2/3
				SUSTITUYE A:	

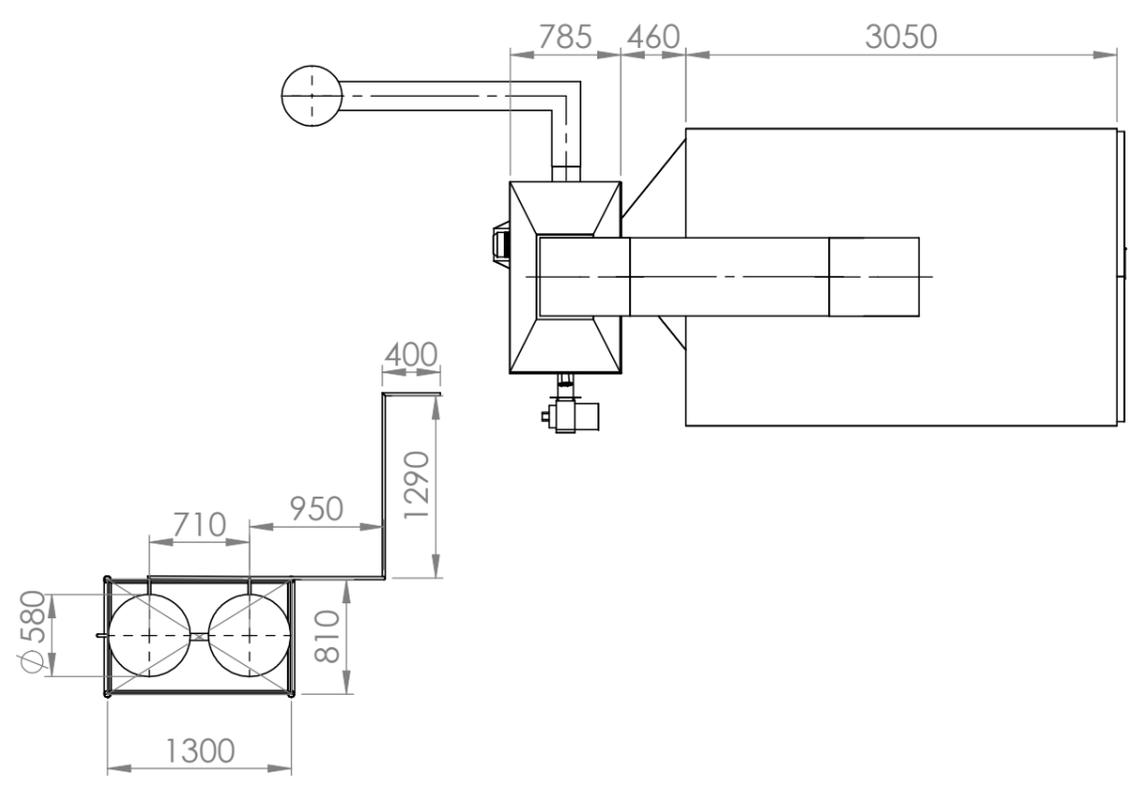
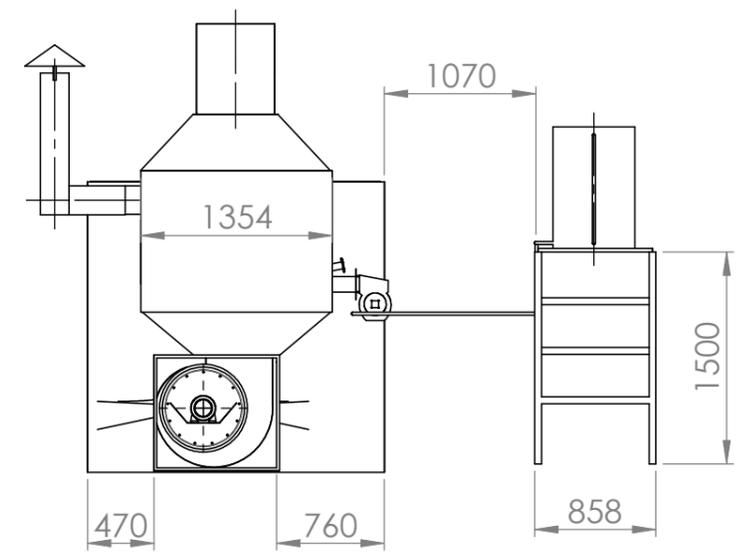
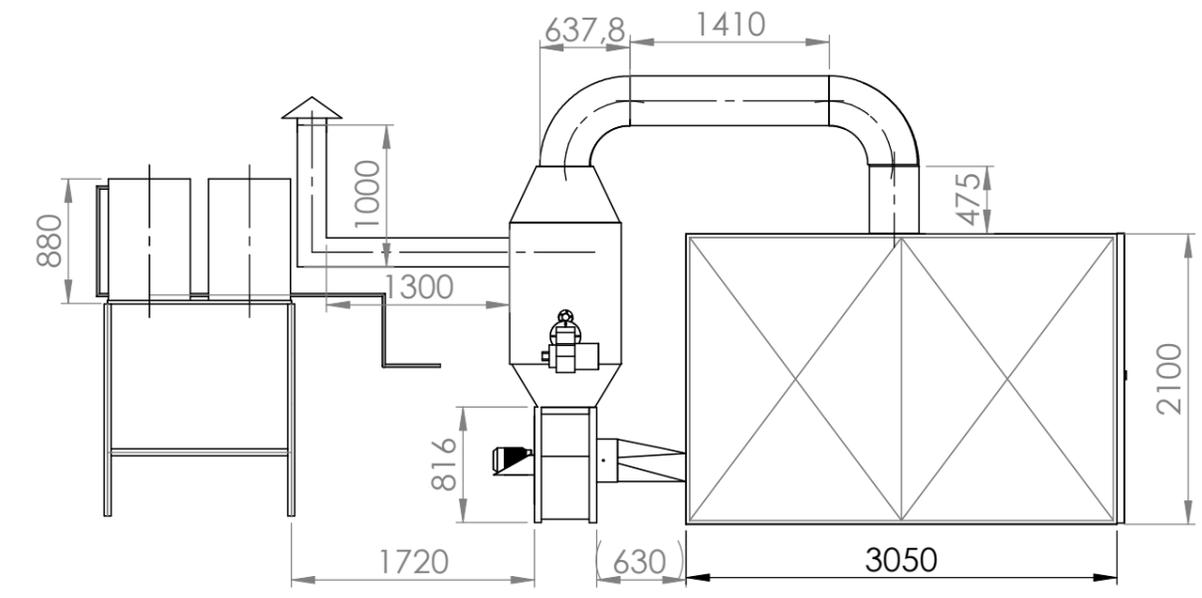


A-A (1 : 10)

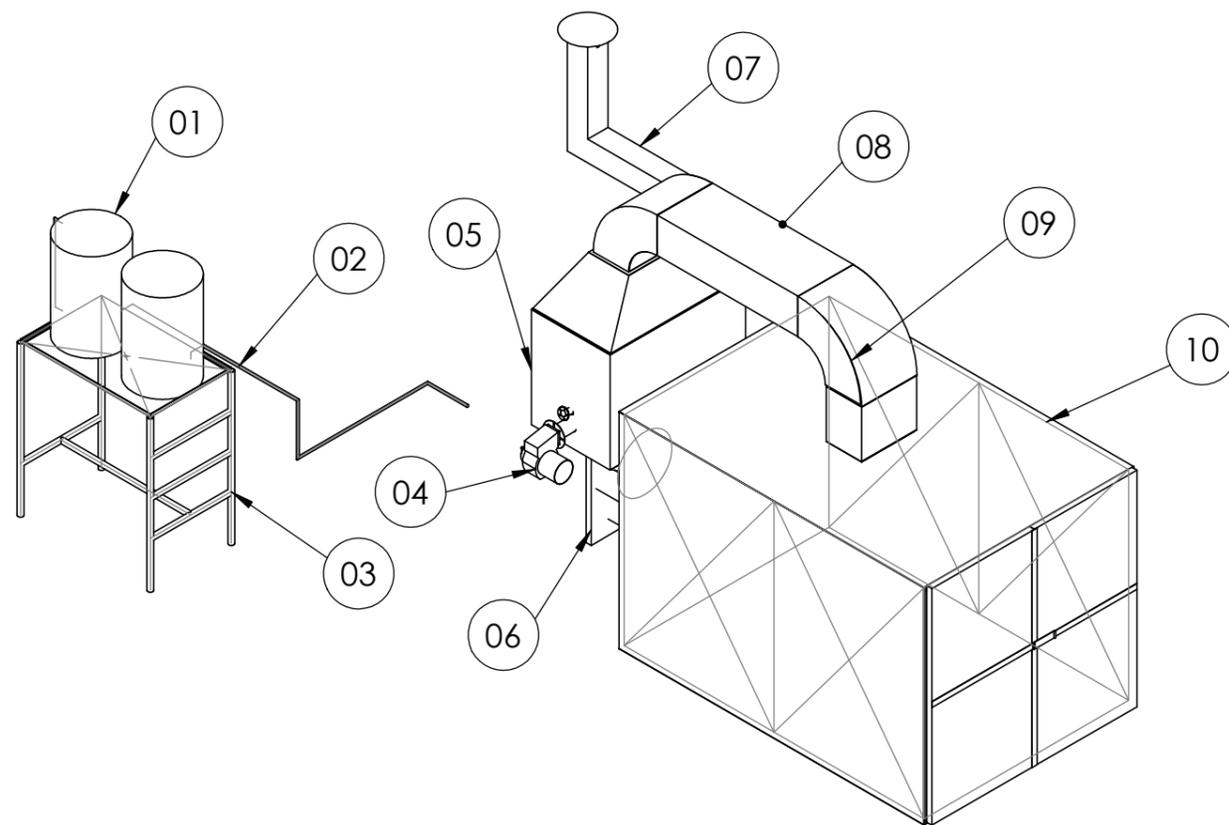


DETALLE C (1 : 2)

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	03/03/10	Byron Guerrero			1
DIBUJADO	03/03/10	Gustavo Carrillo		CONTIENE:	ESCALA:
REVISADO	10/03/10	Ing. L. Echeverría		ENSAMBLE DE LAS PAREDES DEL INTERCAMBIADOR	1 : 10
APROBADO	10/03/10	Ing. F. Montenegro			
ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO CARRERA DE INGENIERIA MECANICA				CODIGO: IC - 05	
				SUSTITUYE A:	HOJA: 3/3

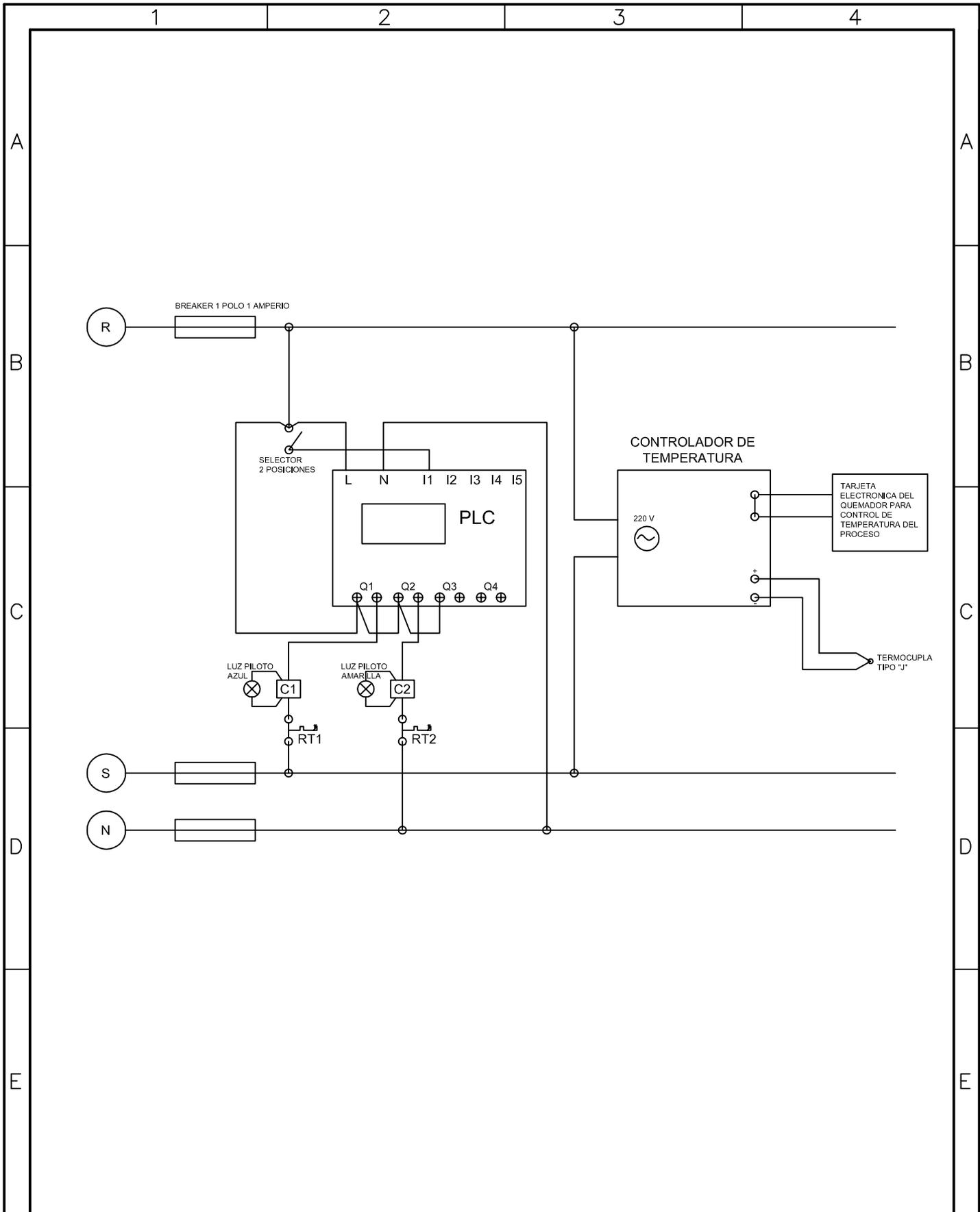


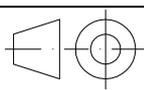
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	03/03/10	Byron Guerrero			1
DIBUJADO	03/03/10	Gustavo Carrillo		CONTIENE:	ESCALA:
REVISADO	10/03/10	Ing. L. Echeverría		IMPLANTACIÓN DEL SISTEMA	1:50
APROBADO	10/03/10	Ing. F. Montenegro			
ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO CARRERA DE INGENIERIA MECANICA				CODIGO:	
				IM-01	
				SUSTITUYE A:	HOJA: 1/1

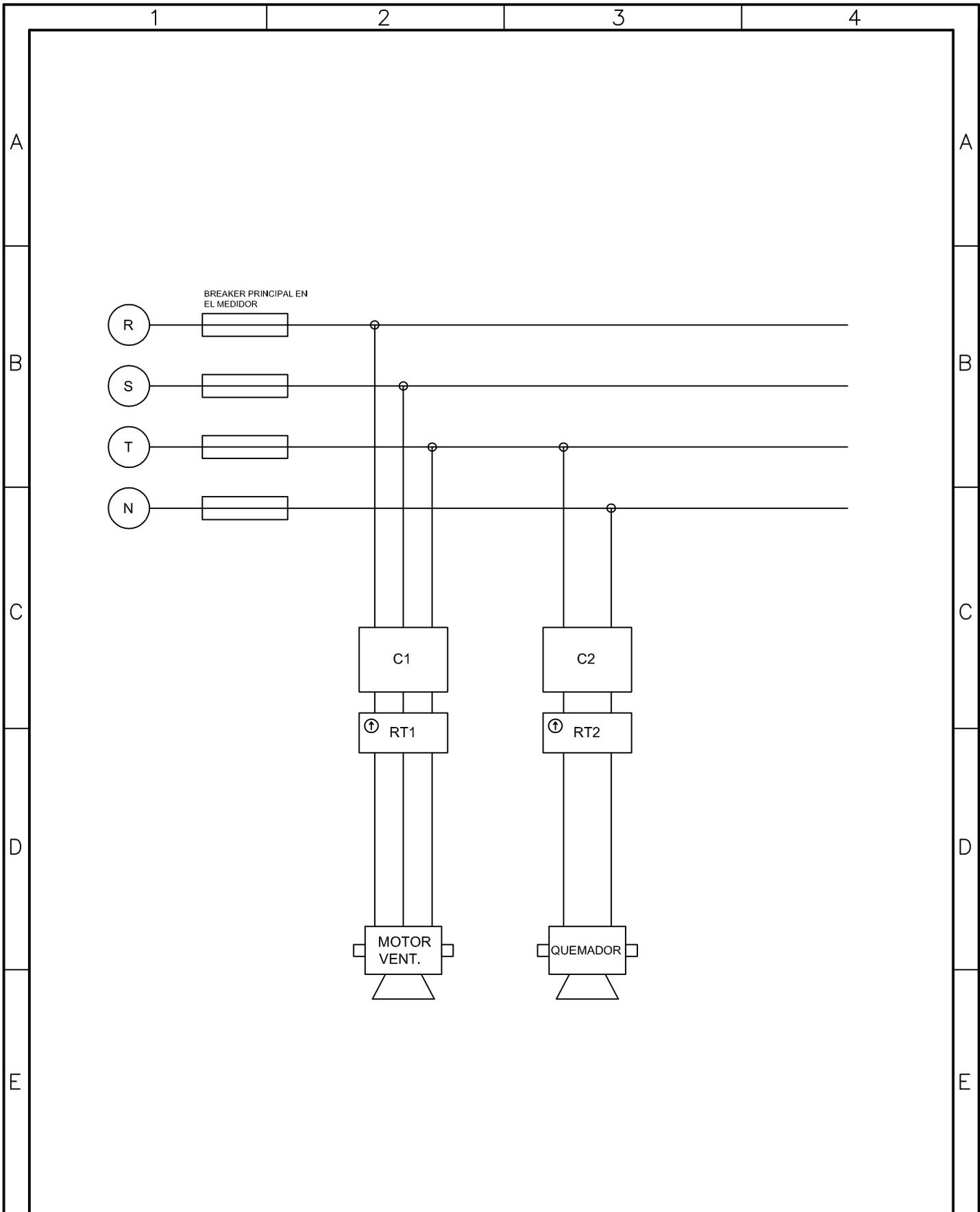


ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD
01	TANQUE DE COMBUSTIBLE	2
02	TUBERIA DE DIESEL	
03	SOPORTE DE TANQUES	1
04	QUEMADOR 3-6 GPH	1
05	INTERCAMBIADOR DE CALOR	1
06	VENTILADOR D-18	1
07	CHIMENEA	1
08	DUCTO RECTO	1
09	CODO 90°	2
10	CABINA DEL HORNO	1

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	03/03/10	Byron Guerrero			1
DIBUJADO	03/03/10	Gustavo Carrillo		CONTIENE:	ESCALA:
REVISADO	10/03/10	Ing. L. Echeverría		ISOMETRIA DEL HORNO	1 : 50
APROBADO	10/03/10	Ing. F. Montenegro			
ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO CARRERA DE INGENIERIA MECANICA				CODIGO:	
				IM - 02	
				SUSTITUYE A:	HOJA: 1/1

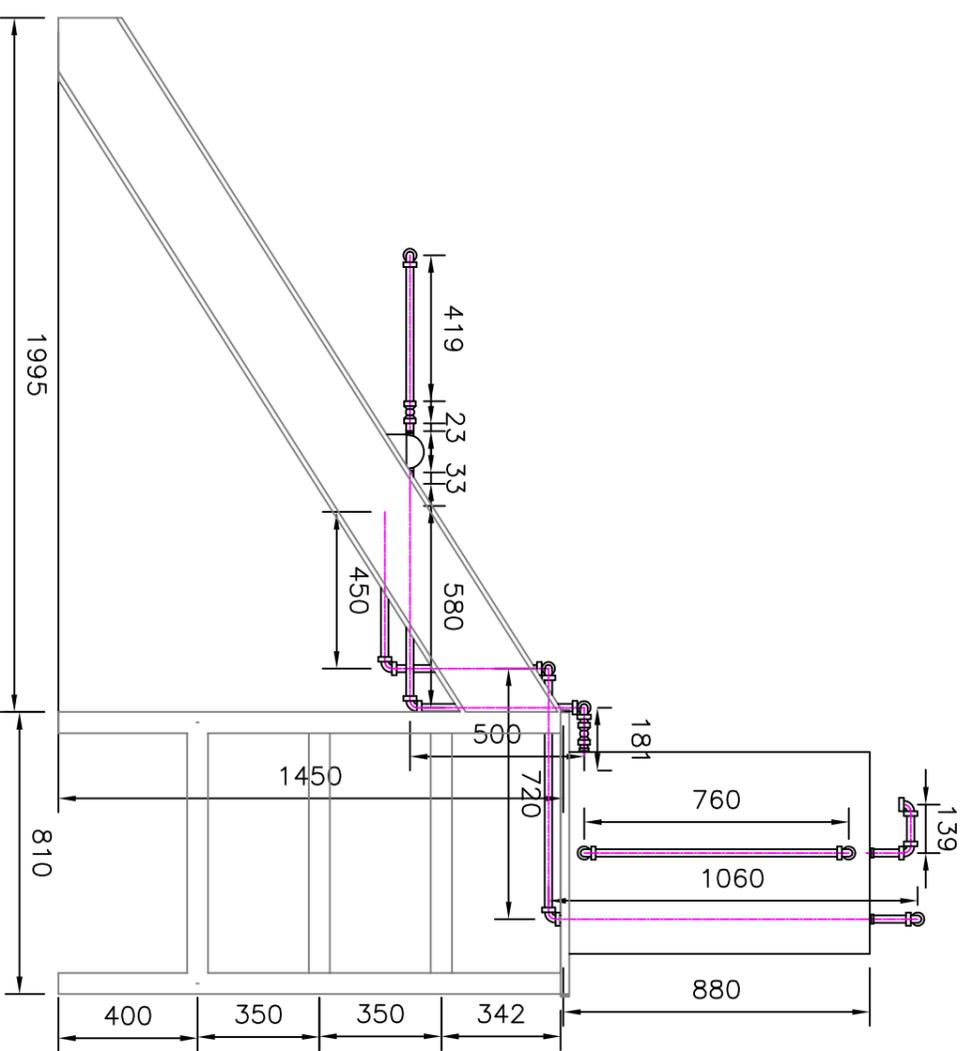


	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	03/03/10	Byron Guerrero		CONTIENE: DIAGRAMA DE CONTROL	ESCALA: S/E
DIBUJADO	03/03/10	Gustavo Carrillo			
REVISADO	10/03/10	Ing. L. Echeverría			
APROBADO	10/03/10	Ing. F. Montenegro			
ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO CARRERA DE INGENIERIA MECANIA				CODIGO: SC - 01	 HOJA: 2/2
				SUSTITUYE A	

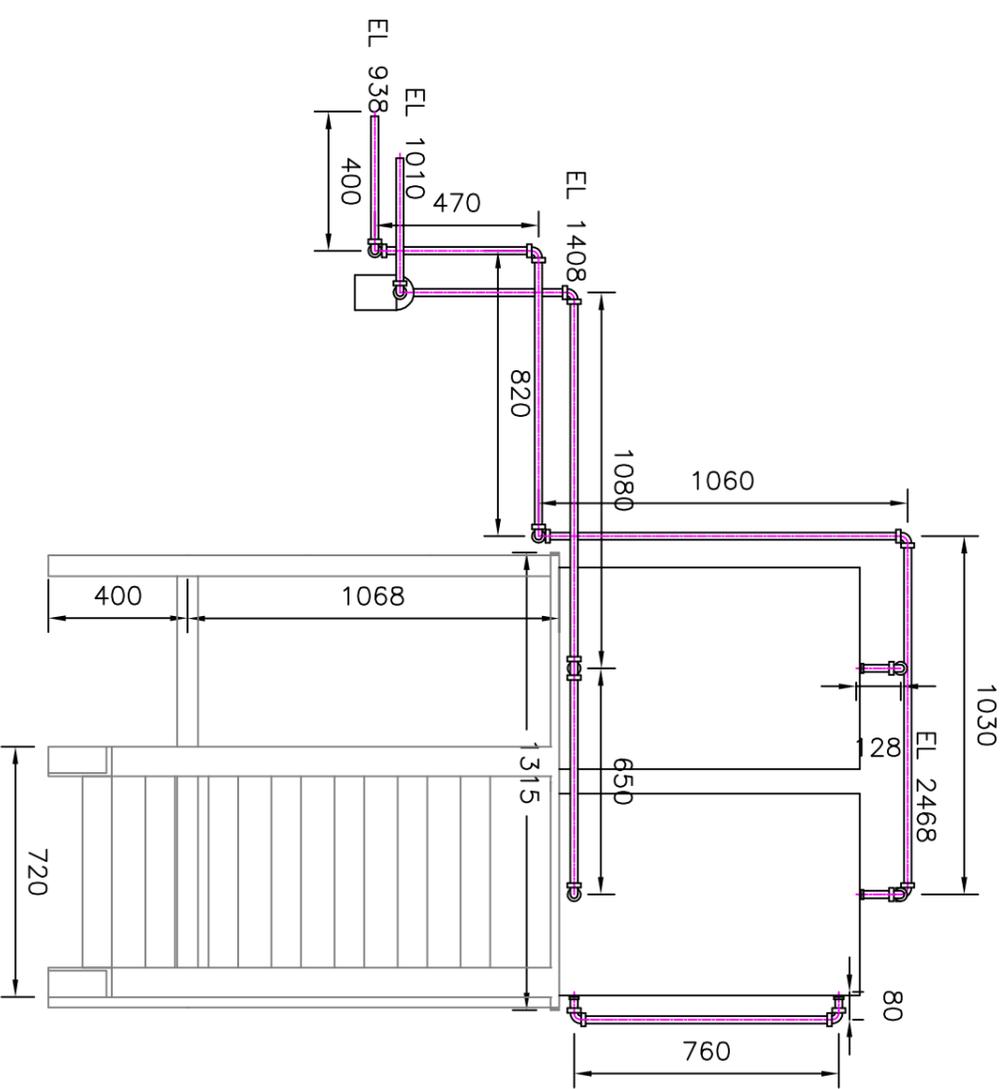


	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	03/03/10	Byron Guerrero		CONTIENE: DIAGRAMA DE FUERZA	ESCALA:
DIBUJADO	03/03/10	Gustavo Carrillo			S/E
REVISADO	10/03/10	Ing. L. Echeverría			
APROBADO	10/03/10	Ing. F. Montenegro			
ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO CARRERA DE INGENIERIA MECANIA				CODIGO: SC - 01	 HOJA: 1/2
				SUSTITUYE A	

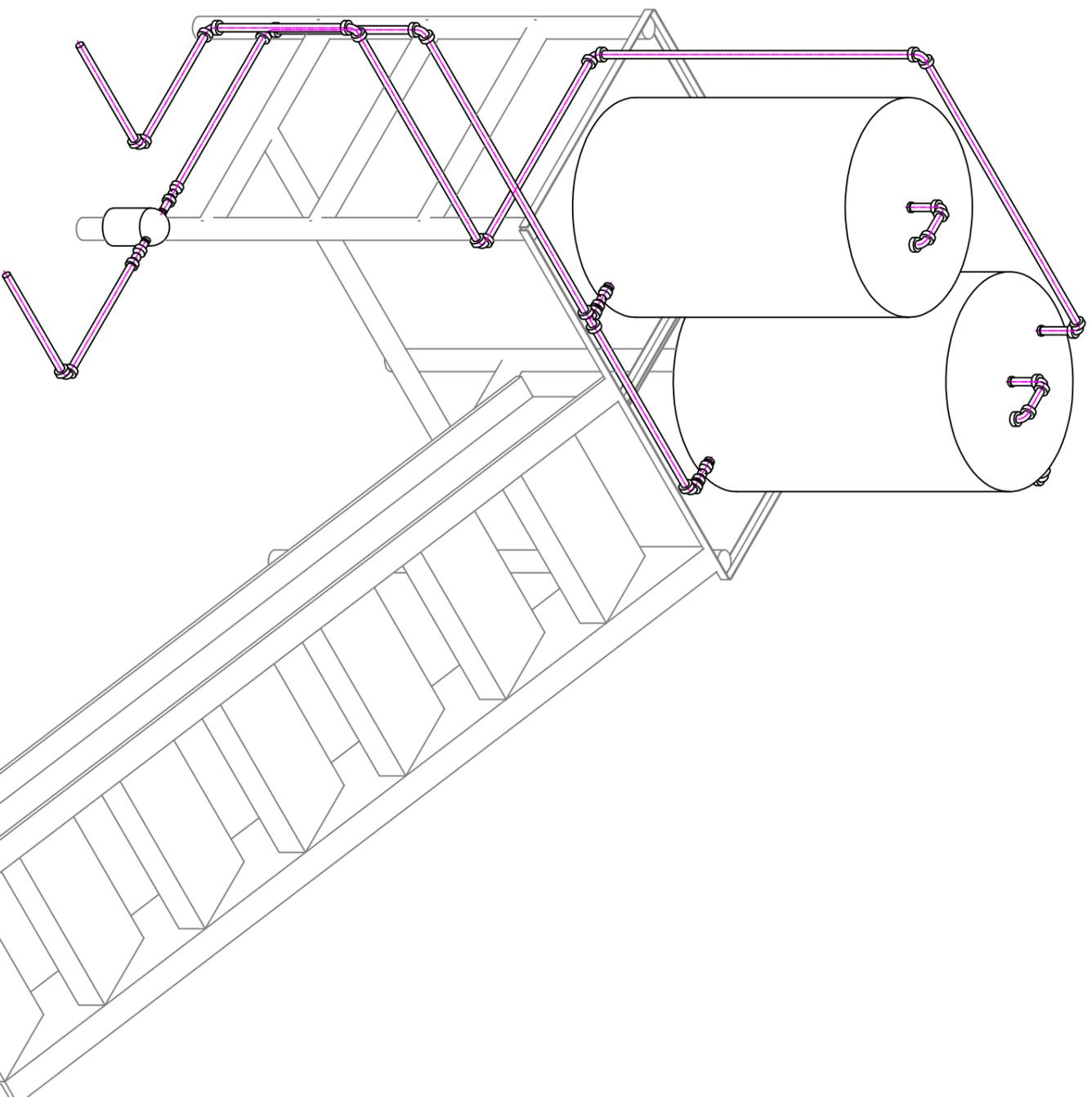
VISTA LATERAL DERECHA



VISTA FRONTAL



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	12/02/10	Byron Guerrero		TUBERIA DE ACERO GALVANIZADO 1/2"	
DIBUJADO	12/02/10	Gustavo Carrillo			ESCALA: 1 : 20
REVISADO	12/02/10	Ing. L. Echeverría		SISTEMA DE TRANSPORTE DE DIESEL	
APROBADO	12/02/10	Ing. F. Montenegro			
ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO CARRERA DE INGENIERIA MECANICA				CODIGO: TC - 01	 
				SUSTITUYE A	HOJA: 1/2

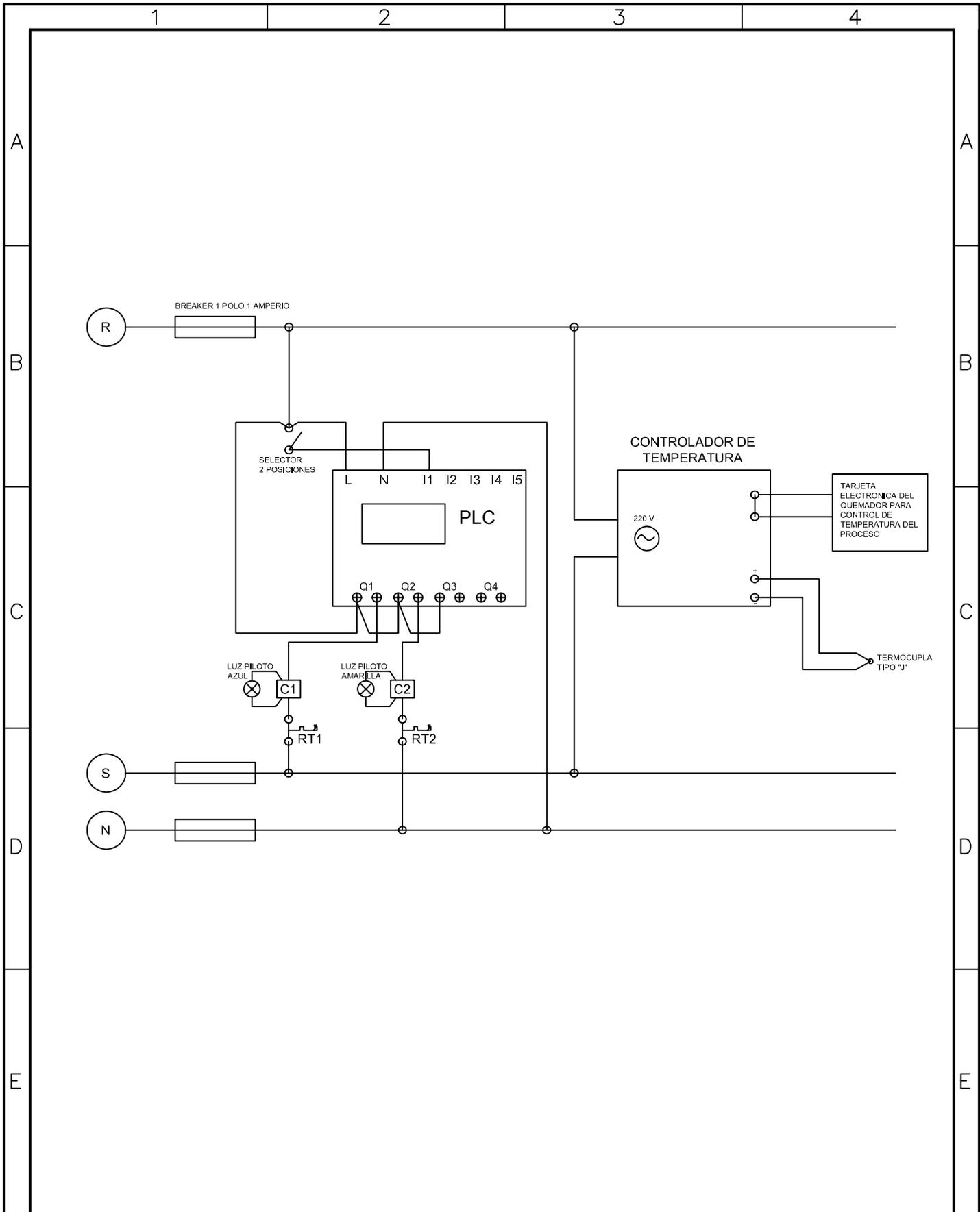


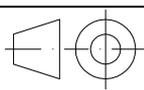
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	03/03/10	Byron Guerrero		TUBERIA DE ACERO GALVANIZADO 1/2"	
DIBUJADO	03/03/10	Gustavo Carrillo		CONTIENE:	ESCALA:
REVISADO	10/03/10	Ing. L. Echeverría		SISTEMA DE TRANSPORTE DE DIESEL	1 : 20
APROBADO	10/03/10	Ing. F. Montenegro		CODIGO:	
ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO CARRERA DE INGENIERIA MECANICA				TC - 01	
				SUSTITUYE A	

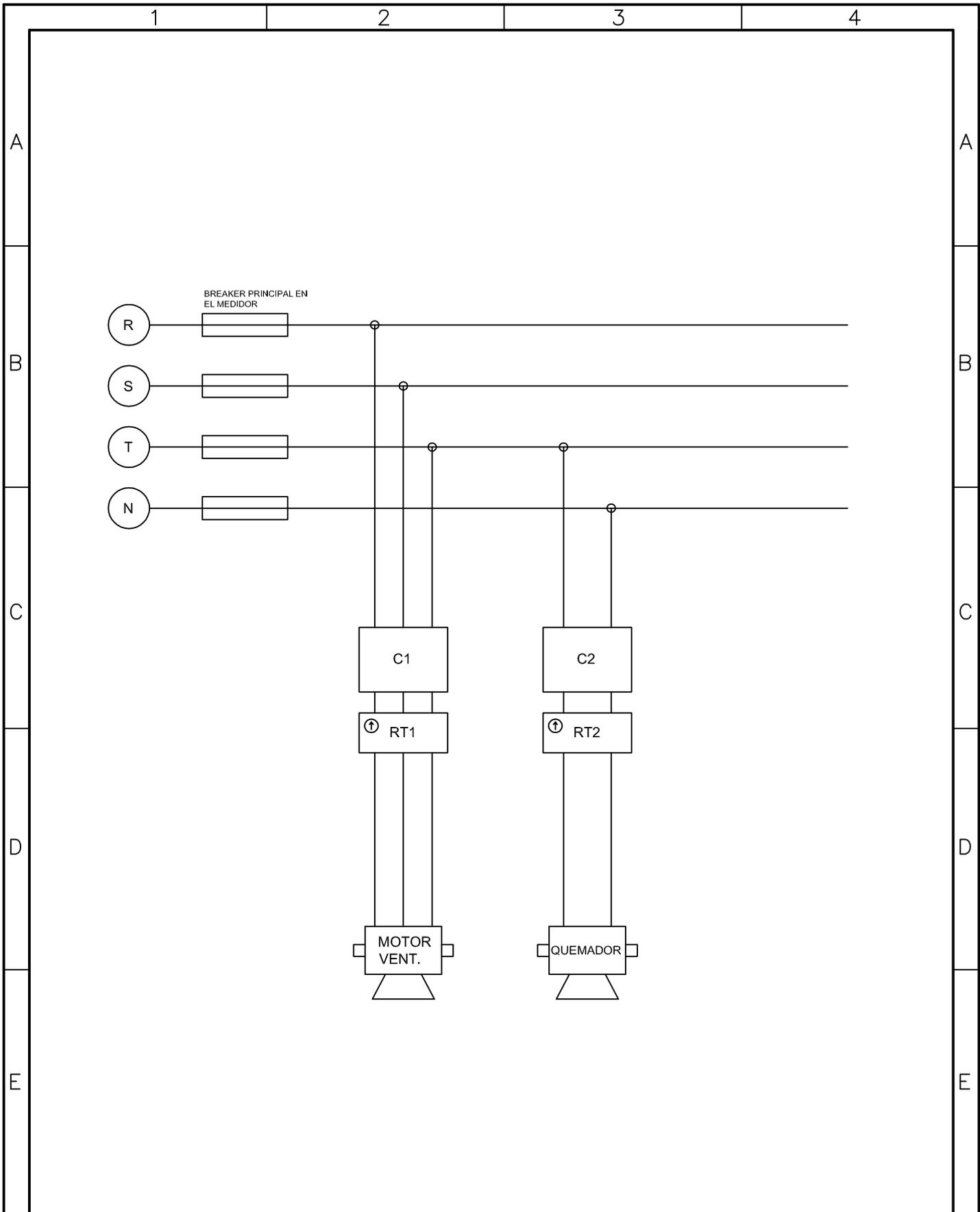


HOJA: 2/2

ANEXO I



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	03/03/10	Byron Guerrero		CONTIENE: DIAGRAMA DE CONTROL	ESCALA: S/E
DIBUJADO	03/03/10	Gustavo Carrillo			
REVISADO	10/03/10	Ing. L. Echeverría			
APROBADO	10/03/10	Ing. F. Montenegro			
ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO CARRERA DE INGENIERIA MECANIA				CODIGO: SC - 01	 HOJA: 2/2
				SUSTITUYE A	



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	03/03/10	Byron Guerrero		CONTIENE: DIAGRAMA DE FUERZA	ESCALA:
DIBUJADO	03/03/10	Gustavo Carrillo			S/E
REVISADO	10/03/10	Ing. L. Echeverría			
APROBADO	10/03/10	Ing. F. Montenegro			
ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO CARRERA DE INGENIERIA MECANIA				CODIGO: SC - 01	 HOJA: 1/2
				SUSTITUYE A	