ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE CALOR PARA APROVECHAR LA DISPONIBILIDAD DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN DE LOS MOTORES MITSUBISHI MAN-18V40/54.

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

JOSÉ LUIS CALDERÓN HERNÁNDEZ
Jccalderonjose@hotmail.com

JOSÉ DAVID PACHACAMA GUALLICHICO
Jd073@hotmail.com

DIRECTOR: ING. ROBERTO WILSON BAHAMONDE TIPÁN
roberto.bahamonde@epn.edu.ec

Quito, Junio 2011

DECLARACIÓN

Nosotros, JOSÉ LUIS CALDERÓN HERNÁNDEZ y JOSÉ DAVID PACHACAMA GUALLICHICO, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

José Luis Calderón H. **José David Pachacama G.**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por los señores José Luís Calderón Hernández y José David Pachacama Guallichico, bajo mi supervisión.

ING. ROBERTO BAHAMONDE

DIRECTOR DEL PROYECTO

ING. RICARDO SOTO

COLABORADOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la salud, la sabiduría e inteligencia para desarrollar el presente trabajo.

Mis más sinceros agradecimientos al Ing. Roberto Bahamonde por su acertada dirección en el presente proyecto, por los conocimientos impartidos durante este proceso.

Al Ing. Milton Garzón quien me apoyo directamente con el fin de poder realizar el presente trabajo de investigación en colaboración con la empresa INGEMECANIC y quien constantemente me extendió su mano sin estimar esfuerzo durante el desarrollo de la tesis.

Al Ing. Ricardo Soto por su colaboración académica e interés puesto que me motivo a seguir adelante con el proceso iniciado y culminar con este objetivo.

Al personal docente de mí querida facultad por las sabias enseñanzas que me han brindado, así como también a su personal administrativo.

Y un agradecimiento muy especial e infinito a la Facultad de Ingeniería Mecánica que en sus aulas recibí todos aquellos conocimientos necesarios y en la cuales e pasado momentos hermosos que nunca he de borrar de mi mente.

José Luis

A Dios que me ha heredado el tesoro más valioso que puede dársele a un hijo "sus padres".

Al Ing. Roberto Bahamonde, por compartir sus conocimientos y guiar de manera acertada el presente proyecto de titulación.

Al Ing. Ricardo Soto, por su colaboración y apertura durante este proceso que culmina.

A mis padres, cuya lucha y sacrificio hicieron posible este momento, porque gracias a su apoyo y consejos, he llegado a realizar una de mis grandes metas lo cual constituye la herencia más valiosa que pudiera recibir

A mis hermanos para quienes la ilusión de su vida ha sido verme convertido en un hombre de provecho.

A mi hermana pequeña Marthita quien con sus ocurrencias alegra mis días y me alienta a seguir adelante.

A Carolina, por ayudarme cada día a cruzar con firmeza el camino de la superación, porque con su apoyo y aliento hoy he logrado uno de mis más grandes anhelos.

Al personal docente y administrativo de mi querida facultad, quienes a lo largo de estos años no solo me han brindado su conocimiento sino también su amistad.

David

DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico a mi amada madre, Rosaura Hernández quien me ha apoyado en mis estudios impulsándome a entregar toda mi capacidad en los mismos y en mi vida, guiándome por el mejor camino especialmente en los momentos más difíciles en los que con su ejemplo, fortaleza, perseverancia y sobre todo con una constante lucha a pesar de la adversidades. Este trabajo está dedicado a mi esposa Judith Torres quien con su amor y compañía ha sido mi motivación y fuente de superación además de su apoyo incondicional para la culminación de mis estudios. Finalmente le dedico este trabajo a mis hermanos, Marcela, Daniela, Geovanny, a mi padre Jesús Alfonso y a mis sobrinitos Demian y Gael.

Con todo mi amor para mi madre Rosaura Hernández y mi esposa Judith Torres.

José Luis

El presente trabajo lo dedico a mis padres Cesar y Josefina, por que gracias a su cariño, apoyo y confianza he llegado a realizar dos de mis más grandes metas en la vida. La culminación de mi carrera profesional y el hacerlos sentirse orgullosos de esta persona que tanto los ama. Lo dedico a mis hermanos, quienes siempre confiaron en mí y me guiaron durante esta etapa tan hermosa de mi vida brindándome su aliento y comprensión.

David

CONTENIDO

CONTENIDO vi

ÍNDICE DE FIGURAS xii

NDICE DE TABLAS xv

SIMBOLOGÍA xviii

RESUMEN xxi

PRESENTACIÓN xxiii

CAPÍTULO 1
FUNCIONAMIENTO DE LA CENTRAL TÉRMICA "GUALBERTO HERNÁNDEZ" .. 1

1.1 DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL TÉRMICA GUALBERTO HERNÁNDEZ .. 1

1.2 ELEMENTOS DEL PROCESO 2

1.2.1 TANQUES DE ALMACENAMIENTO 2

1.2.2 TANQUES INTERMEDIOS DE SUMINISTRO 3

1.2.3 TANQUE DE SUMINISTRO DIARIO 5

1.2.4 MOTORES 6

1.2.5 GENERADORES 7

1.2.6 CALDERAS 8

1.3 CARACTERÍSTICAS DE TRABAJO DE LOS MOTORES MITSUBISHI MAN 18V 40/54. 10

CAPÍTULO 2
PRODUCCIÓN DE VAPOR MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DE LOS GASES DE ESCAPE 12

2.1 JUSTIFICACIÓN DE LA IMPLANTACIÓN DE UN RECUPERADOR DE CALOR. 12

2.1.1 DISPOSICIÓN ACTUAL DE LAS INSTALACIONES. 13

2.1.2 DISPOSICIÓN PROPUESTA DE LAS INSTALACIONES. 13

2.2 ASPECTOS GENERALES DE LAS INSTALACIONES QUE SE DEBEN DE CONSIDERAR EN EL DISEÑO 19

CAPÍTULO 3
ANÁLISIS DE LA CORROSIÓN EN EL RECUPERADOR DE CALOR 20

3.1 CORROSIÓN 20

3.1.1 CORROSIÓN DEBIDO AL AGUA DE FORMACIÓN 20

3.1.1.1 Efecto del pH 20
3.1.1.1.1 Corrosión Acida 20
3.1.1.1.2 Corrosión Cáustica 21
3.1.1.2 Efectos de la Temperatura 21
3.1.1.3 Efectos de las sales disueltas 21
3.1.1.4 Corrosión por oxigeno 22
3.1.1.5 Corrosión por dióxido de carbono CO2 22
3.1.1.6 Erosión 23
3.1.1.7 Incrustaciones 23
3.1.2 CORROSIÓN DEBIDO A LOS GASES DE COMBUSTIÓN O CORROSIÓN EN CALIENTE 26
CAPÍTULO 4
DISEÑO DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE CALOR. 28
4.1 CALDEROS 28
4.1.1 GENERADORES DE VAPOR 28
4.1.1.1 Tipos de calderos generadores de vapor 28
4.1.1.1.1 Por el ensamblaje 29
4.1.1.1.2 Por la circulación de los fluidos 30
4.1.1.1.2.1 Calderos de tubos de fuego 30
4.1.1.1.2.2 Calderos de tubos de agua 32
4.1.1.1.2.3 Calderas de tubos de humo 34
4.1.2 CALEFACTORES 38
4.1.2.1 Calderos de aceite térmico 39
4.1.2.1.1 Calderos de Tubos Doblados Lisos 39
4.1.2.1.2 Calderos Mono o Multitubulares de Serpentín. 39
4.1.2.2 Calderos de agua caliente 40
4.1.2.2.1 Calderos Para Agua Caliente a una Temperatura Inferior a 110 ˚C. 40
4.1.2.2.2 Calderos de Agua Sobrecalentada 42

4.2 EQUIPOS AUXILIARES PARA CALDEROS 42
4.3 RECIPIENTES A PRESIÓN 43
4.4 DISEÑO DEL RECUPERADOR DE CALOR 44
4.4.1 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO 44
4.4.2 DIMENSIONAMIENTO DEL RECUPERADOR DE CALOR 44
4.4.2.1 Balance energético 45
4.4.2.2 Cálculo del calor requerido para la generación de vapor 46
4.4.2.3 Cálculo del flujo másico de gases de escape requerido para la generación de vapor 47
4.4.2.4 Cálculo de la temperatura a la salida de los gases de escape 48
4.4.2.5 Cálculo del área de transferencia. Método del NTU 49
4.4.2.6 Cálculo del número de tubos requeridos 50
4.4.2.7 Cálculo de la temperatura de la pared 51
4.4.2.8 Cálculo del coeficiente de convección interno 53
4.4.2.9 Coeficiente de transferencia de calor externo 57
4.4.2.10 Flujo de calor crítico 57
4.4.2.11 Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor 58
4.4.2.12 Cálculo del Área Real de Transferencia de Calor 59
4.4.3 CÁLCULO DE LA VARIACIÓN DE LA PRESIÓN EN LA CHIMENEA .. 61
4.4.4 DIMENSIONAMIENTO DE LA CORAZA 67
4.4.4.1 Configuración del banco de tubos 67
4.4.4.2 Cálculo del espesor de la coraza 68
4.4.4.3 Barras Tirantes 69
4.4.4.4 Cálculo del espesor del aislante térmico de la coraza 70
4.4.5 ACCESORIOS 76
4.4.6 EQUIPOS AUXILIARES 78
4.4.6.1 Control de nivel de agua 78

4.4.6.1.1 Conexiones eléctricas 80
4.4.6.1.1.1 Circuito de control de la bomba 80
4.4.6.1.1.2 Circuito de control de cierre de agua baja 81
4.4.6.1.1.3 Circuito de alarma 81
4.4.6.1.1.4 Circuito Combinado 81
4.4.6.1.2 Operación esquemática del interruptor 82
4.4.6.2 Deshollinador 82

CAPÍTULO 5
DESARROLLO DE PROGRAMA DE CÁLCULO 85
5.1 SECUENCIA LÓGICA DE CÁLCULO 85
5.1.1 SELECCIÓN DE DATOS DE ENTRADA 85
5.1.2 GENERACIÓN DEL PROGRAMA 93

CAPÍTULO 6
SELECCIÓN DE MATERIALES Y ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO 94
6.1 SELECCIÓN DE MATERIALES 94
6.1.1 TUBERÍAS 96
6.1.1.1 Tubos de acero de bajo carbono 96
6.1.2 BANCO O HAZ DE TUBOS 97
6.1.3 CORAZA 98
6.1.4 CÁMARAS DE ENTRADA Y SALIDA DE GASES 99
6.1.5 BARRAS TIRANTES 99
6.1.6 BRIDAS 100
6.1.7 PERNOS, TUERCAS Y ARANDELAS 101
6.2 ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO 102
6.2.1 ANÁLISIS DE COSTOS DIRECTOS 103
6.2.1.1 Costos de materiales directos 103
6.2.1.2 Costos de elementos normalizados 103
6.2.1.3 Costos de mano de obra 107
6.2.1.4 Costos de montaje 108

6.2.1.5 Costos directo total 108
6.2.2 ANÁLISIS DE COSTOS INDIRECTOS 109
6.2.2.1 Costos de materiales indirectos. 109
6.2.2.2 Costos de ingeniería 109
6.2.2.3 Costo total indirecto 110
6.2.3 COSTO TOTAL DEL EQUIPO..... 110
6.3 CONSUMO DE COMBUSTIBLES 111
6.4 ESTUDIO ECONÓMICO FINANCIERO 112
6.4.1 VALOR DE SALVAMENTO (VS) 112
6.4.2 INGRESOS (I) 112
6.4.3 COSTOS O EGRESOS (E) 113
6.4.4 ANÁLISIS FINANCIERO 113
6.4.4.1 Valor presente (VP)..... 114
6.4.4.2 Tasa interna de retorno (TIR)..... 115
6.4.4.3 Costo-Beneficio..... 115
CAPÍTULO 7
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 116
7.1 CONCLUSIONES 116
7.2 RECOMENDACIONES..... 117
APÉNDICES 119
APENDICE A
ANÁLISIS DE GASES DE COMBUSTIÓN PARA UNA UNIDAD..... 120
A.1 CONVERSIÓN DE UNIDADES..... 121
A.2 ANÁLISIS DE GASES DE COMBUSTIÓN PROMEDIO 128
BIBLIOGRAFÍA 131
ANEXOS 132
ANEXO 1 PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DEL AGUA A PRESIÓN DE SATURACIÓN 133
ANEXO 2 PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DEL AGUA 134

ANEXO 3 VALORES DEL COEFICIENTE C_{sf} PARA VARIAS COMBINACIONES DE LÍQUIDO-SUPERFICIE 135
ANEXO 4 TENSIÓN SUPERFICIAL ENTRE LÍQUIDO Y VAPOR EN AGUA 136
ANEXO 5 CARACTERÍSTICAS DE LA TUBERÍA..... 137
ANEXO 6 PROPIEDADES DE LOS GASES DE ESCAPE VISCOSIDAD VS. TEMPERATURA 138
ANEXO 7 PROPIEDADES DE LOS GASES DE ESCAPE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA VS. TEMPERATURA 139
ANEXO 8 LÍNEAS DE PROGRAMACIÓN 140
ANEXO 9 CONSUMO DE COMBUSTIBLE..... 149
ANEXO 10 ANÁLISIS DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN 150
ANEXO 11 DETALLE DEL CONTROL DE NIVEL 159
ANEXO 12 DIAGRAMA DE MOODY PARA EL FACTOR DE FRICCIÓN . 160
ANEXO 13 SOLDADURAS QUE SE APLICAN EN EL PROYECTO 161
PLANOS 167

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

FIGURA 1.1 Tanques de almacenamiento de diesel y bunker. 2
FIGURA 1.2 Dimensiones del Tanque de almacenamiento de Crudo Reducido. 2
FIGURA 1.3 Dimensiones del Tanque de almacenamiento de Diesel. 3
FIGURA 1.4 Tanques intermedios de diesel y bunker. 3
FIGURA 1.5 Dimensiones del Tanque Intermedio Diesel. 4
FIGURA 1.6 Dimensiones del Tanque Intermedio Crudo Reducido..... 4
FIGURA 1.7 Tanque de suministro diario. 5
FIGURA 1.8 Dimensiones del Tanque de Suministro Diario. 5
FIGURA 1.9 Cuarto de maquinas. 6
FIGURA 1.10 Unidad generadora. 7
FIGURA 1.11 Área de Calderas. 8
FIGURA 1.12 Motores Mitsubishi MAN 18V 40/54 11

CAPÍTULO 2

FIGURA 2.1 Instalaciones actuales de la Central Gualberto Hernández 14
FIGURA 2.2 Instalaciones propuestas para la Central Gualberto Hernández..... 15
FIGURA 2.3 Ubicación del caldero entre las chimeneas..... 16
FIGURA 2.4 Esquema del sistema de agua de alimentación..... 17
FIGURA 2.5 Esquema del sistema de recolección de vapor y purga..... 18

CAPÍTULO 4

FIGURA 4.1 Balance de energía de un caldero. 28
FIGURA 4.2 Caldero de tubos de fuego. 30
FIGURA 4.3 Caldero de dos pasos. 31
FIGURA 4.4 Caldero de tres pasos. 31
FIGURA 4.5 Caldero de cuatro pasos. 31
FIGURA 4.6 Caldero de tubos rectos. 33
FIGURA 4.7 Caldero de tubos de humo. 35

FIGURA 4.8 Etapas de la ebullición. 36
FIGURA 4.9 Caldero horizontal. 41
FIGURA 4.10 Caldero vertical. 41
FIGURA 4.11 Esquema del proceso de generación de vapor. 45
FIGURA 4.12 Esquema final del recuperador de calor. 60
FIGURA 4.13 Esquema de disposición de tubería de escape. 61
FIGURA 4.14 Curvas características del ventilador de tiro inducido. 65
FIGURA 4.15 Arreglo del banco de tubos 67
FIGURA 4.16 Esquema de ubicación del aislante. 71
FIGURA 4.17 Circuito térmico resultante 71
FIGURA 4.18 Circuito térmico reducido 71
FIGURA 4.19 Control de nivel de agua baja “150E McDonell” 79
FIGURA 4.20 Esquema de instalación del control de nivel. 79
FIGURA 4.21 Esquema de disposición de terminales 80
FIGURA 4.22 Esquema del circuito de control de la bomba 80
FIGURA 4.23 Esquema del circuito de control de cierre de agua baja 81
FIGURA 4.24 Esquema del circuito de cierre de agua baja 81
FIGURA 4.25 Esquema del circuito combinado 81
FIGURA 4.26 Bomba de alimentación de la caldera desconectada, alarma desconectada 82
FIGURA 4.27 Bomba de alimentación de la caldera conectada, alarma desconectada 82
FIGURA 4.28 Bomba de alimentación de la caldera conectada, alarma conectada 82
FIGURA 4.29 Sistema de tuberías del deshollinador 83
FIGURA 4.30 Sistema de Sujeción y elevación del deshollinador 84
FIGURA 4.31 Deshollinador completo 84

CAPÍTULO 5

FIGURA 5.1 Bloque de cálculo del calor requerido para la generación de vapor..... 85
FIGURA 5.2 Bloque de cálculo iterativo de la temperatura de salida de los gases de escape. 86
FIGURA 5.3 Bloque de cálculo del área de transferencia de calor. 86
FIGURA 5.12 Bloque de cálculo del número de tubos. 87
FIGURA 5.4 Bloque de cálculo de la temperatura de la pared. 87
FIGURA 5.5 Bloque de cálculo del coeficiente de transferencia de calor interno..... 87
FIGURA 5.6 Bloque de cálculo del coeficiente de transferencia de calor externo..... 88
FIGURA 5.7 Bloque de cálculo del coeficiente global de transferencia de calor. 88
FIGURA 5.8 Bloque de cálculo de la efectividad. 88
FIGURA 5.13 Interfaz del programa de cálculo. 93

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1

TABLA 1.1Datos generales de los motores..... 6
TABLA 1.2 Datos generales de los generadores 8
TABLA 1.3 Datos generales de las calderas. 9
TABLA 1.4 Consumo mensual de combustible de las calderas. 9
TABLA 1.5 Datos de placa de los motores. 11

CAPÍTULO 3

TABLA 3.1 Incrustaciones más comunes..... 25

CAPÍTULO 4

TABLA 4.1 Cálculo de la temperatura a la salida de los gases de escape. 49
TABLA 4.2 Características del ventilador de tiro inducido seleccionado. 65
TABLA 4.3 Barras tirantes normalizadas 70
TABLA 4.4 Resultado de la iteración..... 75
TABLA 4.5 Listado de válvulas del recuperador..... 76
TABLA 4.6 Listado de accesorios del recuperador 77
TABLA 4.7 Listado de equipos auxiliares y materiales del recuperador..... 77

CAPÍTULO 5

TABLA 5.1 Variables calculables 91

CAPÍTULO 6

TABLA 6.1 Composición química de la colada (Max. %). 97
TABLA 6.2 Propiedades mecánicas. 97
TABLA 6.3 Composición química de la colada (Max. %). 98
TABLA 6.4 Propiedades mecánicas. 98
TABLA 6.5 Composición química de la colada (Max. %). 99
TABLA 6.6 Propiedades mecánicas. 99

TABLA 6.9 Composición química de la colada (Max. %). 100
TABLA 6.10 Propiedades mecánicas. 100
TABLA 6.11 Composición química de la colada (Max. %). 101
TABLA 6.12 Propiedades mecánicas. 101
TABLA 6.13 Propiedades mecánicas 102
TABLA 6.14 Costo de materiales directos 103
TABLA 6.15 Costos de elementos normalizados (Válvulas). 104
TABLA 6.16 Costos de elementos normalizados (Accesorios auxiliares). 105
TABLA 6.17 Costo de mano de obra para cada material 107
TABLA 6.18 Costo de montaje 108
TABLA 6.19 Costo Directo Total 108
TABLA 6.20 Costo de materiales indirectos 109
TABLA 6.21 Costo de ingeniería 110
TABLA 6.22 Costo Indirecto Total 110
TABLA 6.23 Costo Indirecto Total 110
TABLA 6.24 Consumo mensual de combustible de las calderas. 111
TABLA 6.25 Gasto anual de combustible por las calderas. 112
TABLA 6.26 Valores del valor presente. 114
TABLA 6.27 Tiempo de recuperación. 115

APÉNDICE 1

TABLA A.1 Datos de flujo de gases secos y humedad del gas. 120
TABLA A.2 Resultado del análisis de los gases de combustión. 121
TABLA A.3 Porcentaje volumétrico de los gases de combustión. 122
TABLA A.4 Datos de los gases de escape antes de los silenciadores. 122
TABLA A.5 Resumen del porcentaje de gases y densidad. 124
TABLA A.6 Datos de los gases de escape después de las chimeneas. 125
TABLA A.7 Parámetros de los gases de combustión. 126
TABLA A.8 Datos de los gases de escape antes de los silenciadores. 126
TABLA A.9 Parámetros de los gases de combustión. 127
TABLA A.10 Valores promedios considerados para el diseño. 128

TABLA A.11 Valores promedios del flujo de gases secos y húmedos. 128
TABLA A.12 Valores promedios de la composición de los Gases. 129
TABLA A.13 Valores promedio de las especificaciones de los gases de combustión 130

SIMBOLOGÍA

A área de transferencia de calor, $[m^2]$

C_{fs} constante empírica que depende de la naturaleza de la superficie de calentamiento-fluido, cuyo valor varia de un sistema a otro.

$\overline{Cp_h}$ calor específico medio del fluido Caliente, $\left[\frac{Kcal}{Kg°C}\right]$

$\overline{Cp_c}$ calor específico medio del fluido frío, $\left[\frac{Kcal}{Kg°C}\right]$

c_l calor específico de líquido saturado, $\left[\frac{J}{Kg\ °C}\right]$

De diámetro exterior de la tubería, $[m]$

Di diámetro interior de la tubería, $[m]$

g aceleración de la gravedad, $\left[\frac{m}{seg^2}\right]$

g_c factor de conversión de unidades $= 1$ $\left[\frac{Kg\ m}{N\ seg^2}\right]$

h_{fg} calor latente de vaporización, $\left[\frac{Kcal}{Kg}\right]$

h_i coeficiente de convección interno, $\left[\frac{Kcal}{Kg}\right]$

h_e coeficiente de transferencia de calor externo, $\left[\frac{Kcal}{Kg}\right]$

k coeficiente de conductividad térmica del fluido caliente

k_t coeficiente de conductividad térmica de la tubería

L longitud de la tubería, [m]

$\dot{m}_h$ flujo másico del fluido caliente, $\left[\frac{Kg}{h}\right]$

$\dot{m}_c$ flujo másico del fluido frío, $\left[\frac{Kg}{h}\right]$

Nu número de Nusselt

n 1.0 para el agua, 1.7 para otros líquidos

Pr número de Prandtl

Pr_l número de Prandtl del líquido saturado

Q_h calor que cede el fluido caliente, $\left[\frac{Kcal}{Kg}\right]$

Q_c calor que recibe el fluido frío, $\left[\frac{Kcal}{Kg}\right]$

$q"$ flujo calórico, $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

Re número de Reynolds

T_{co} temperatura de salida del fluido Caliente, $[°C]$

T_{ci} temperatura de entrada del fluido caliente, $[°C]$

T_{ho} temperatura de salida del fluido frío, $[°C]$

T_{hi} temperatura de entrada del fluido frío, $[°C]$

U_e coeficiente global de transferencia de calor, $\left[\frac{Kg}{m\ seg}\right]$

v velocidad del fluido, $\frac{m}{s}$

Letras griegas

ρ densidad de masa; densidad de fluido, $\frac{Kg}{m^3}$

μ viscosidad dinámica, $\frac{Kg}{m\,h}$

σ tensión superficial en la interfaz líquido-vapor, $\left[\frac{N}{m}\right]$

Subindices

s condiciones de superficie

cond conducción

h fluido caliente

c fluido frío

eb ebullición

bar barométrica

est estática

e exterior

i interior

RESUMEN

Las plantas termo eléctricas sin lugar a duda son un pilar fundamental para poder cumplir con la demanda de energía del país, razón por la que su optimización debe ser una prioridad para quienes están a cargo de ellas.

Dentro del proceso de generación termoeléctrica existe una importante fuente de energía que hasta el momento no se ha aprovechado. El funcionamiento de los motores de combustión interna que se encuentran dentro de la planta genera una gran cantidad de gases de combustión, los mismos que se encuentran a una temperatura elevada, misma que puede ser aprovechada.

El presente proyecto de titulación muestra a través de sus siete capítulos el diseño de un recuperador de calor tipo caldera de tubos de humo, mostrando todos los criterios que han de ser tomados en cuenta para su dimensionamiento y funcionamiento.

El primer capítulo muestra una descripción breve de la central térmica, su localización geográfica, las instalaciones que se consideran importantes para el diseño, así como las máquinas y mecanismos que influyen de alguna manera en el diseño.

El segundo capítulo presenta un esquema de las instalaciones actuales y propuestas de la planta y plantea los requerimientos y restricciones que se han de tomar en cuenta para el diseño.

La corrosión es un problema que debe ser tomado en cuenta en el diseño, debido a las condiciones a las que los materiales deben estar sometidos es indispensable asegurar que los mismos posean ciertas características que aseguren su integridad y buen funcionamiento. Un análisis de los posibles tipos de corrosión que podrían presentarse en el equipo se muestran en el tercer capítulo, además se analizan los problemas de erosión e incrustaciones.

En el cuarto capítulo se inicia con el diseño del recuperador de calor, se estudia los principios de funcionamiento de algunos equipos que serán de ayuda pare el diseño, así como los equipos auxiliares que estarán presentes en el equipo, se plantean las consideraciones para el diseño y por último se procede con el dimensionamiento del recuperador de calor y la selección de los equipos auxiliares.

El quinto capítulo presenta las consideraciones para la realización de un software que permita automatizar el diseño, tomando como base los cálculos realizados de manera manual.

Posteriormente en el sexto capítulo se presenta la selección de los materiales adecuados para la construcción del equipo además del análisis económico del proyecto, el cual demuestra la factibilidad del mismo.

Finalmente en el séptimo capítulo se muestran las conclusiones y recomendaciones a las que se han llegado luego de haber culminado el diseño.

PRESENTACIÓN

El presente proyecto tiene lugar en la Central Termoeléctrica Gualberto Hernández, que se encuentra ubicada en la provincia de Pichincha. Desde sus inicios, la planta de generación cuenta con un caldero, el mismo que provee el vapor requerido para el funcionamiento de los subsistemas que se encuentran dentro de la planta de generación.

El poder calórico contenido en los gases de escape producido por los motores diesel Mitsubishi MAN 18V40/54, es una fuente residual de energía que no ha sido aprovechada para el aumento de la eficiencia en el proceso de generación. El objetivo principal de este proyecto es el de aprovechar este poder calórico (desperdiciado) para la generación de vapor mediante la instalación de un recuperador de calor tipo caldero.

El vapor generado por el equipo será utilizado para el precalentamiento de los combustibles que ingresan a los motores para su funcionamiento, el objetivo principal de este precalentamiento es el de disminuir la viscosidad del bunker para de esta manera facilitar su mezcla con el diesel y su posterior bombeado.

En este proyecto se presentan las condiciones de trabajo para las que se tendrá que diseñar el equipo para un funcionamiento óptimo. Se realiza además un análisis de los gases de combustión para determinar la factibilidad de aprovechar su poder calórico para alcanzar el objetivo planteado. El funcionamiento de los motores es de crucial importancia para determinar la temperatura de salida de los gases de escape y en base a esto poder establecer las propiedades de los mismos.

Por otro lado se realiza también un análisis económico del proyecto, ya que el consumo de combustible de la caldera representa un gasto muy elevado, por tal razón se busca la mejor solución para eliminar este rubro, justificando con este proyecto el beneficio que se obtiene al emplear los gases de combustión como una fuente de energía.

CAPITULO 1
FUNCIONAMIENTO DE LA CENTRAL TÉRMICA "GUALBERTO HERNÁNDEZ"

1.1 DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL TÉRMICA GUALBERTO HERNÁNDEZ

La Central Térmica Gualberto Hernández se encuentra ubicada en la provincia de Pichincha en el sector de Guangopolo en el Valle de los Chillos. El voltaje de generación es de 6.6 KV, el mismo que es elevado a 138 KV para sincronizarse a la Subestación Vicentina y de ahí al sistema interconectado.

En período de estiaje de las centrales hidroeléctricas, las centrales térmicas operan para cubrir la demanda base del país y el resto del tiempo es programado para cubrir la demanda en horas pico y por requerimientos de energía reactiva.

Los combustibles utilizados por los motores de las unidades generadoras son Diesel y Crudo reducido (bunker). En la etapa de arranque el combustible diesel es inyectado a las unidades motoras durante un periodo de cuatro horas. Luego de haber alcanzado las condiciones óptimas de funcionamiento el diesel es reemplazado por una mezcla de 92% de Crudo Reducido y 8% de Diesel, la misma que es inyectada a los motores a una temperatura de 70 ℃, siendo de esta manera el combustible principal consumido durante el funcionamiento, razón por la cual el diseño del recuperador de calor se basará en el análisis de los gases de combustión, productos de la quema de tal combustible en particular.

1.2 ELEMENTOS DEL PROCESO

1.2.1 TANQUES DE ALMACENAMIENTO

FIGURA 1.1 Tanques de almacenamiento de diesel y bunker.

La función principal de estos tanques es la de almacenar los combustibles de consumo de la planta que son el Diesel y el Crudo Reducido (bunker) necesario para el abastecimiento de los motores durante un determinado periodo de tiempo, en total la planta tiene 4 tanques dos de menor capacidad para el Diesel y los otros 2 de mayor capacidad para el Crudo Reducido. La capacidad de almacenamiento del tanque de Diesel es de 380 KLTS ó 100.000 Galones, mientras que la capacidad del tanque de Crudo reducido es de 1.500 KLTS ó 400.000 Galones, este se encuentra ubicado en una zona periférica a la planta por cuestiones de seguridad. Un esquema del mismo se presenta a continuación.

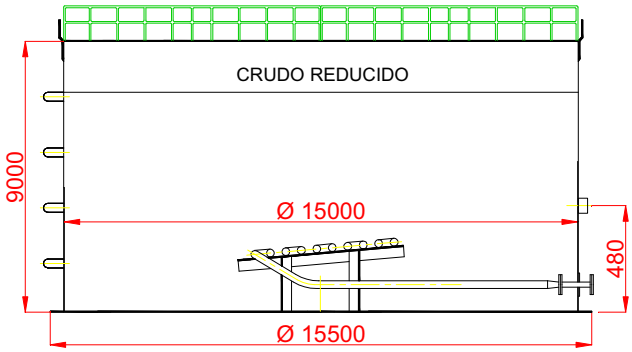


FIGURA 1.2 Dimensiones del Tanque de almacenamiento de Crudo Reducido.

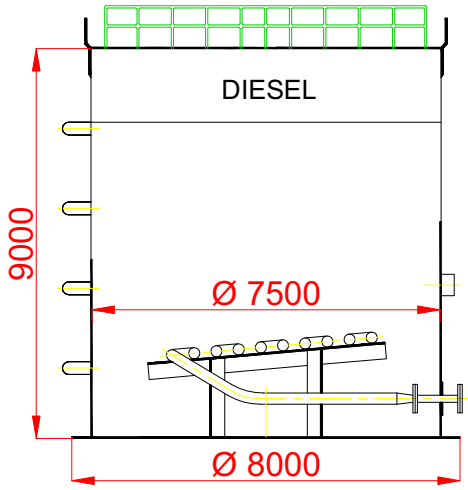


FIGURA 1.3 Dimensiones del Tanque de almacenamiento de Diesel.

1.2.2 TANQUES INTERMEDIOS DE SUMINISTRO

FIGURA 1.4 Tanques intermedios de diesel y bunker.

Estos tanques intermedios están conectados de forma directa a los tanques de almacenamiento y tiene la función de proveer de combustible mezclado al tanque de suministro diario de las unidades motoras por medio de una bomba la cual es la que se encarga de realizar dicha mezcla, además de precalentar el combustible por medio de un serpentín por el cual circula el vapor que proviene de la caldera que actualmente se encuentra funcionando y la que suministra el vapor que consume toda la planta.

El volumen total de estos tanques es de 5780 litros cada uno, su capacidad útil es de 5000 litros, además tienen una alarma de bajo nivel que se activa cuando el volumen de combustible en cualquiera de los tanques intermedios es menor al 60 % de su capacidad útil.

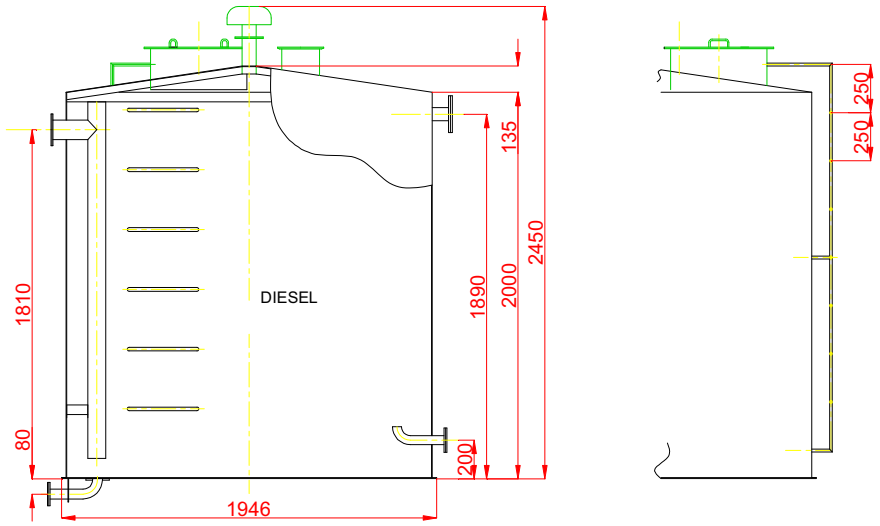


FIGURA 1.5 Dimensiones del Tanque Intermedio Diesel.

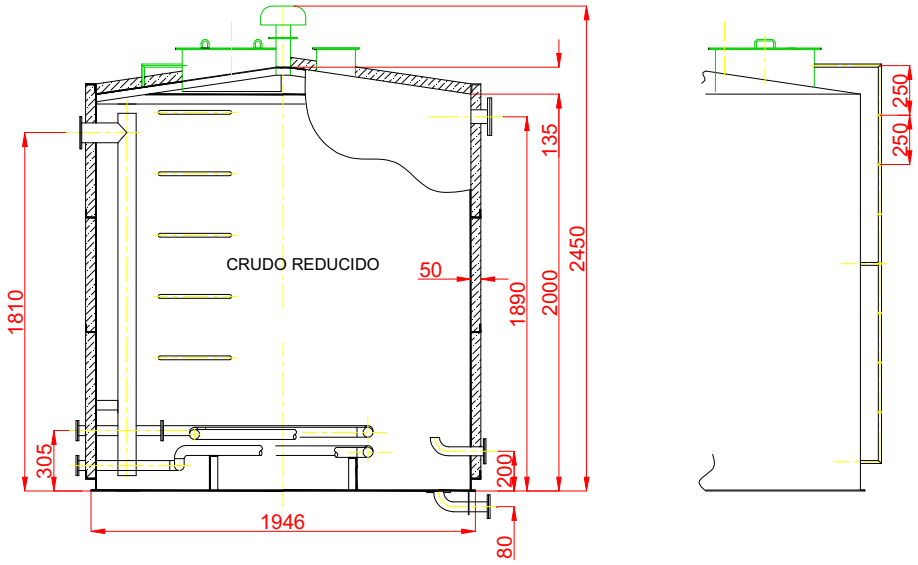


FIGURA 1.6 Dimensiones del Tanque Intermedio Crudo Reducido.

1.2.3 TANQUE DE SUMINISTRO DIARIO

FIGURA 1.7 Tanque de suministro diario.

Este tiene la función de almacenar el combustible mezclado que proviene de los tanques intermedios, en este dispositivo de almacenaje el combustible se encuentra a una temperatura entre 70 ℃.

Este tanque se encarga del suministro directo del combustible a cada una de las bombas de inyección de las unidades motoras, está ubicado en la parte superior del cuarto de maquinas, su capacidad es de 1500 Litros y tiene en su interior un sistema que permite el control de la temperatura del combustible, teniendo como parámetro una temperatura límite de 80 ℃.

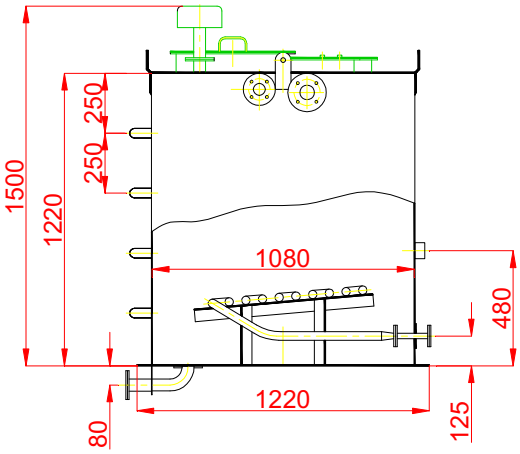


FIGURA 1.8 Dimensiones del Tanque de Suministro Diario.

1.2.4 MOTORES

FIGURA 1.9 Cuarto de maquinas.

Actualmente existen seis unidades motor-generador instaladas dentro de la planta, estas unidades son de características similares las cuales se muestran a continuación.

TABLA 1.1Datos generales de los motores

MARCA	MITSUBISHI-MAN	
TIPO	18V 40/54	
UNIDAD	**NÚMEROS DE SERIE**	**AÑO DE FABRICACIÓN**
1	D154 186	1.979 OCT
2	D154 187	1.979 OCT
3	D154 188	1.979 NOV
4	D154 189	1.979 NOV
5	D154 190	1.979 DIC.
6	D154 191	1.980 ENE
POTENCIA NOMINAL	8093 HP	

VELOCIDAD DEL MOTOR	400 RPM
PROCEDENCIA	JAPÓN
COMBUSTIBLE	DIESEL – CRUDO REDUCIDO
CARRERA	540 mm
DIÁMETRO PISTÓN	400 mm
POTENCIA AL FRENO	8093 PS
NÚMERO DE CILINDROS	18
VELOCIDAD DEL PISTÓN	7.2 m/s
PRESIÓN MEDIA EFECTIVA AL FRENO	14.9 Kg/cm^3
PESO DEL MOTOR DIESEL	110 Ton

1.2.5 GENERADORES

FIGURA 1.10 Unidad generadora.

Una vez que los motores se encuentran en condiciones óptimas de funcionamiento se procede al acoplamiento de las unidades generadoras, las mismas que se encargan de transformar la energía mecánica proveniente de los motores en energía eléctrica.

Al igual que las unidades motoras con características similares, existen 6 unidades de generación cuyos datos de placa se enlistan a continuación.

TABLA 1.2 Datos generales de los generadores

TIPO DE GENERADOR	EK-AF
POTENCIA DE SALIDA	7150 KVA
FACTOR DE POTENCIA	0.80
VELOCIDAD DE ROTACIÓN	400 RPM
CORRIENTE	299 A
VOLTAJE	13800 V
NÚMERO DE FASES	3
NÚMERO DE POLOS	18
FRECUENCIA	60 Hz
PESO DEL GENERADOR	38 Ton

1.2.6 CALDERAS

FIGURA 1.11 Área de Calderas.

Son las calderas las que actualmente generan el vapor necesario para cubrir los requerimientos de la planta. El área de calderas está conformada por las Calderas A y B, la producción de vapor de cada una de ellas es de 1600 Kg/h y la presión máxima de trabajo es de 10 Kg/cm^2.

El requerimiento de vapor de la planta exige el trabajo continuo de una sola de las unidades, utilizando la segunda como unidad de reserva, que entra en funcionamiento cuando la primera necesite mantenimiento.

La presión de operación de las calderas y de todo el sistema de distribución es de 8 Kg/cm^2, todos los parámetros de funcionamiento son controlados desde sus respectivos paneles electrónicos.

Los datos de placa de las calderas muestran a continuación.

TABLA 1.3 Datos generales de las calderas.

TIPO DE CALDERA	RED-20D
PRODUCCIÓN MÁXIMA DE VAPOR	1600 Kg/h
SUPERFICIE DE CALENTAMIENTO	20 m^2
PRESIÓN MÁXIMA DE TRABAJO	10 Kg/cm^2
COMBUSTIBLE	Diesel

En la siguiente tabla se enlista el consumo total de diesel de las calderas en el periodo del año 2009 (datos tomados del resumen de producción y consumo de mes).

TABLA 1.4 Consumo mensual de combustible de las calderas[1].

MES	**CONSUMO (Gal)**
Enero	18693
Febrero	19091

[1] Tomado del reporte de producción y consumo mensual de la planta

MES	CONSUMO (Gal)
Marzo	18693
Abril	19110
Mayo	18693
Junio	19110
Julio	19319
Agosto	19130
Septiembre	19110
Octubre	19663
Noviembre	19110
Diciembre	19110
PROMEDIO	19069
TOTAL	228828 GALONES/AÑO

1.3 CARACTERÍSTICAS DE TRABAJO DE LOS MOTORES MITSUBISHI MAN 18V 40/54.

Los seis motores Diesel Mitsubishi MAN-18V 40/54 que conforman la Central termoeléctrica Gualberto Hernández, vienen operando desde el 25 de abril de 1977, estos motores debido a su considerable periodo de funcionamiento, actualmente no se encuentran operando con sus capacidades nominales y por tal razón la eficiencia de los mismos se ha visto disminuida.

Los combustibles utilizados por los motores de las unidades generadoras son Diesel y Crudo reducido (bunker). En la etapa de arranque el diesel es inyectado a las unidades motoras durante un periodo de cuatro horas para luego de haber llegado a las condiciones optimas de funcionamiento ser reemplazado por una mezcla de 92% de Crudo Reducido y 8% de Diesel, la misma que es inyectada a los motores a una temperatura de 70 ℃.

FIGURA 1.12 Motores Mitsubishi MAN 18V 40/54

Las características de trabajo de los motores se muestran en las siguientes tablas:

TABLA 1.5 Datos de placa de los motores.

TEMPERATURA DE GASES DE ESCAPE	441.4 ℃
PRESIÓN A LA SALIDA DE LOS GASES DE ESCAPE	572.25 mm Hg
POTENCIA NOMINAL	8093 HP
REVOLUCIONES	400 RPM
PROCEDENCIA	JAPÓN
COMBUSTIBLE	DIESEL CRUDO REDUCIDO
CARRERA	540 mm
DIÁMETRO PISTÓN	400 mm

CAPITULO 2
PRODUCCIÓN DE VAPOR MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DE LOS GASES DE ESCAPE

2.1 JUSTIFICACIÓN DE LA IMPLANTACIÓN DE UN RECUPERADOR DE CALOR.

La preocupación del Personal Técnico y Administrativo de la Central Térmica Gualberto Hernández por los rubros correspondientes a la generación del vapor necesario para el abastecimiento de los diferentes subprocesos involucrados en el proceso de generación eléctrica, da paso a la necesidad de la implantación de una alternativa que permita buscar una solución para eliminar de alguna manera los rubros mencionados, principalmente el consumo de combustible.

Actualmente los requerimientos de vapor son cubiertos por una caldera, la misma que necesita una considerable cantidad de combustible diesel para su normal funcionamiento.

La necesidad de encontrar una alternativa que permita minimizar o eliminar el rubro por consumo de diesel de la caldera, ha hecho que se tome en cuenta el potencial energético que poseen los gases de escape y obliga a la investigación de un equipo que sea capaz de usar este potencial energético para mejorar la eficiencia de la planta.

Este problema que afecta a la planta de generación justifica la necesidad de diseñar un recuperador de calor tipo caldera que permita tanto aprovechar el potencial energético que poseen los gases de escape, como suplir la demanda de vapor de la planta sin la necesidad de contar con una caldera cuyo rubro de combustible es significativo.

2.1.1 DISPOSICIÓN ACTUAL DE LAS INSTALACIONES.

En la figura 2.1 se muestra la disposición actual de las instalaciones de la Central Térmica Gualberto Hernández, las que serán analizadas para poder determinar la factibilidad de la implantación de un equipo recuperador de calor.

También se muestra el motor Mitsubishi MAN-18V 40/54 cuyos gases de escape serán aprovechados por el recuperador de calor.

2.1.2 DISPOSICIÓN PROPUESTA DE LAS INSTALACIONES.

Después de realizar un análisis de las actuales instalaciones se muestra en la figura 2.2, las modificaciones que tendría la central para optimizar el proceso de generación de vapor aprovechando el poder calórico de los gases de escape.

Lo que se muestra en la figura es una eliminación del caldero y una redirección del ciclo del vapor, con lo que se garantiza un flujo permanente de vapor, ahorrando dinero al eliminar el uso de diesel para la generación del mismo. Se conserva la misma bomba para la recirculación del fluido a través de la tubería de transporte, el recuperador de calor va montado en una parte de la extensión del tubo de los gases de escape esto se puede observar con mayor claridad en la figura 2.3.

En la figura 2.4 se aprecia el sistema de alimentación de agua para cada uno de los calderos recuperadores de calor, en la figura 2.5 se tiene un esquema del sistema de recolección de vapor y el retorno de condensado de la planta en el tanque Nº 2.

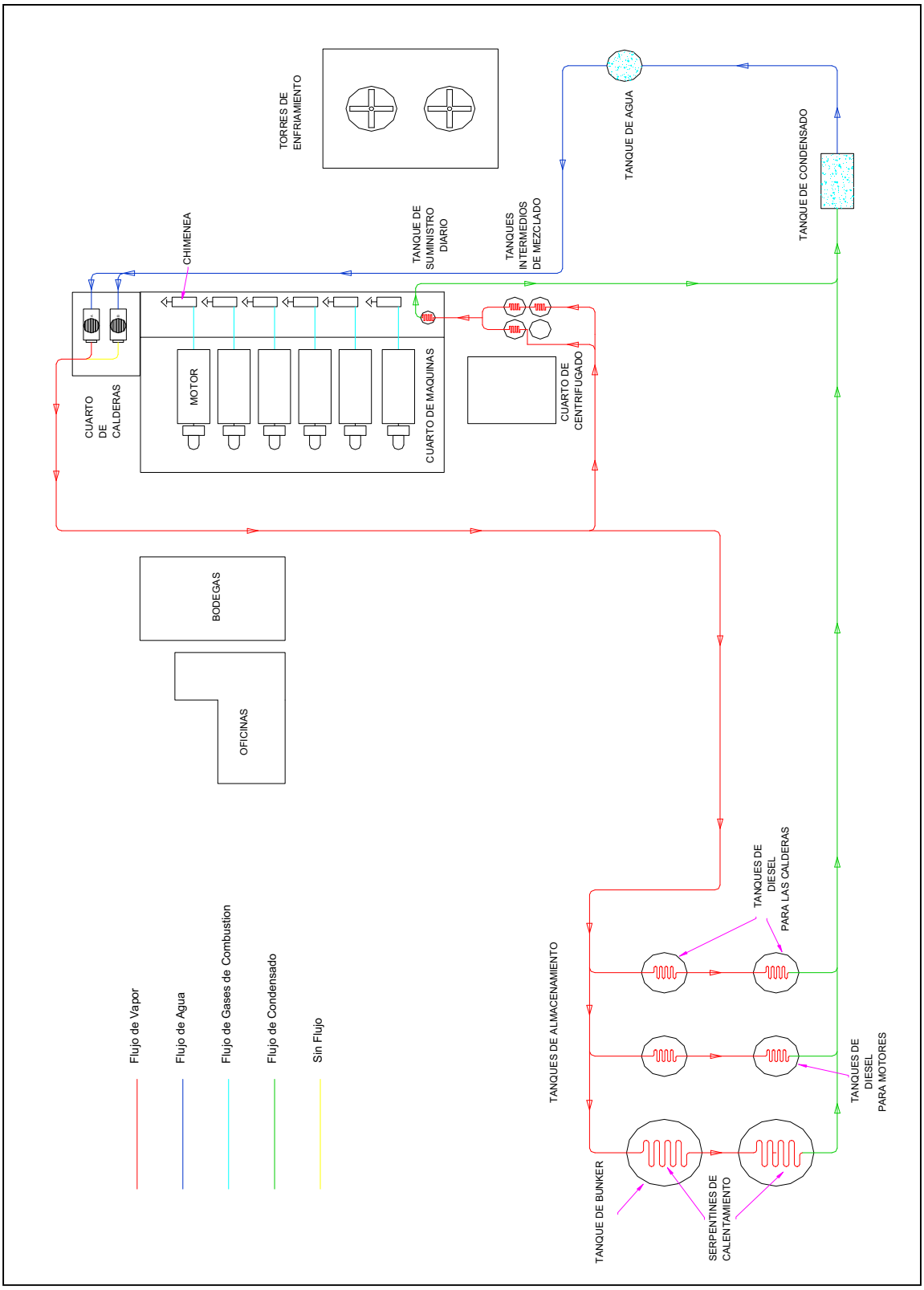


FIGURA 2.1 Instalaciones actuales de la Central Gualberto Hernández

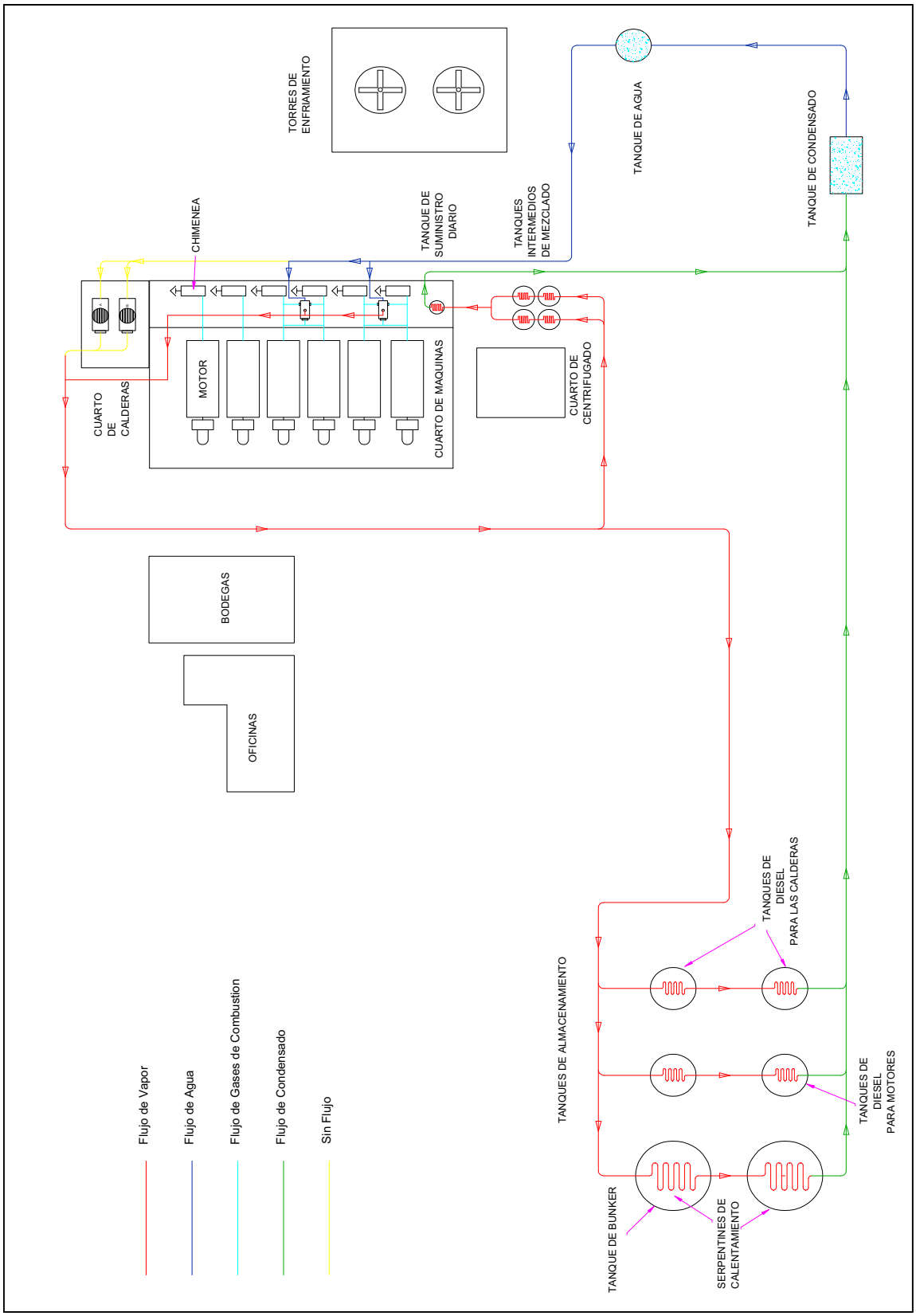


FIGURA 2.2 Instalaciones propuestas para la Central Gualberto Hernández

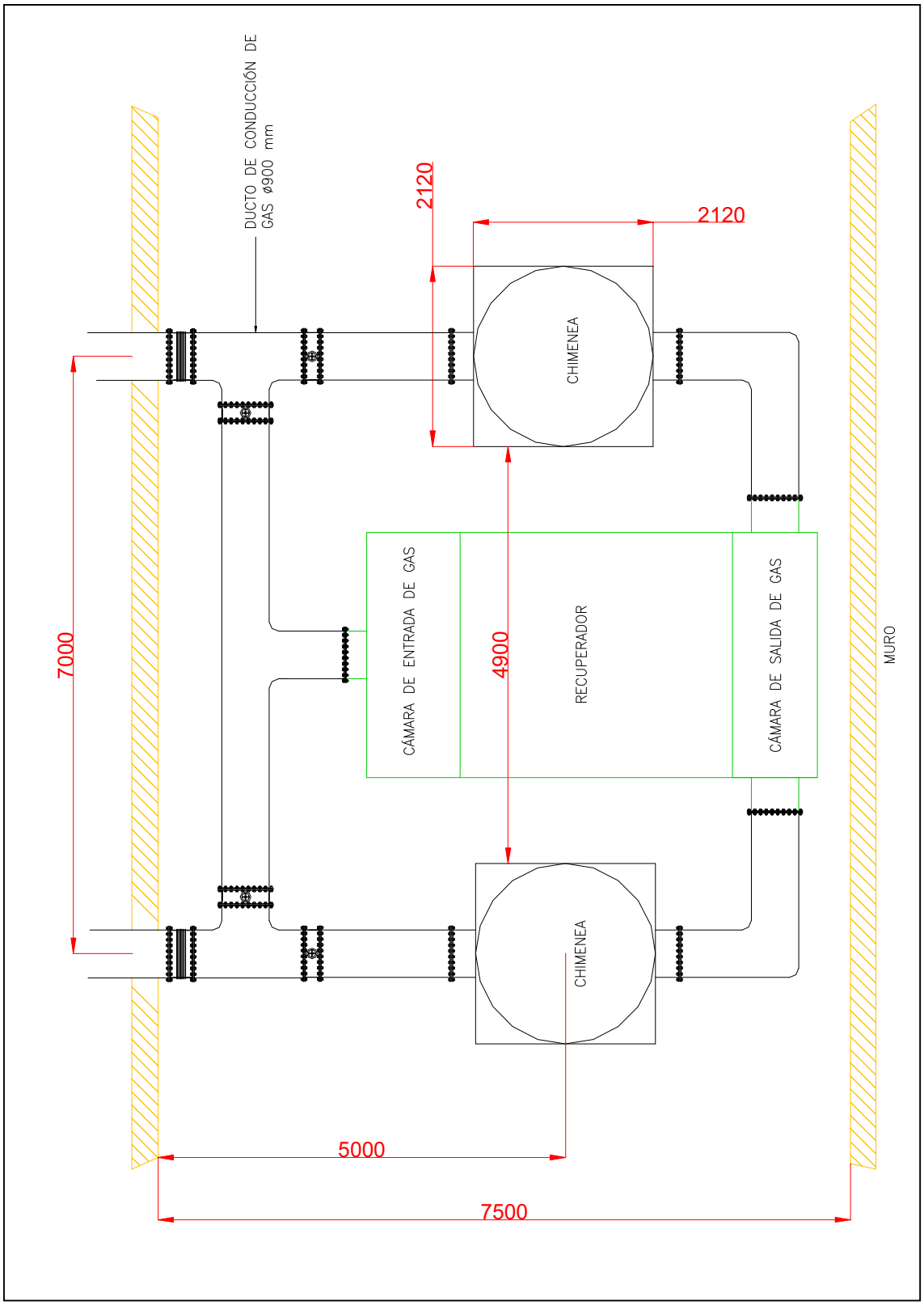


FIGURA 2.3 Ubicación del caldero entre las chimeneas

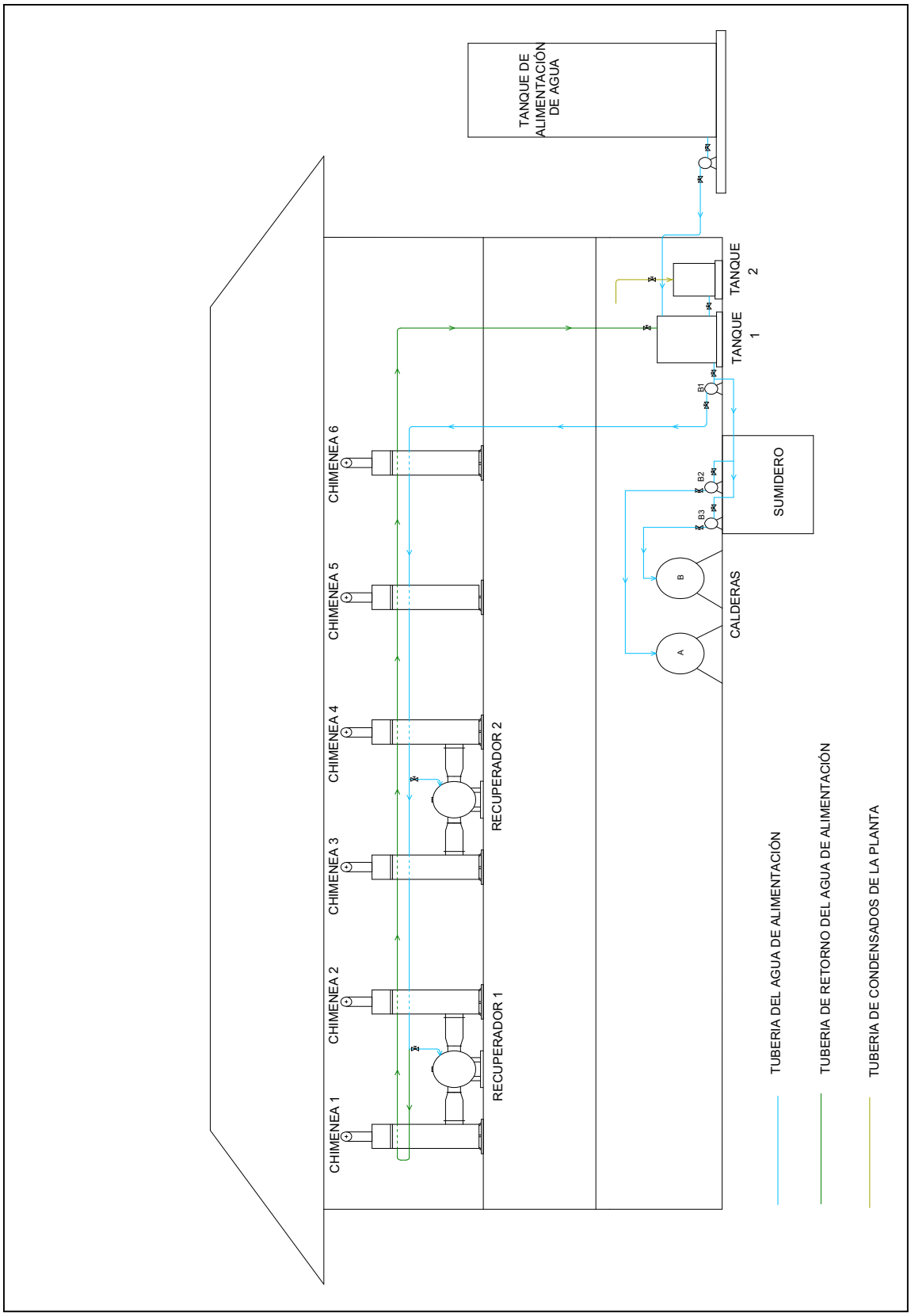


FIGURA 2.4 Esquema del sistema de agua de alimentación

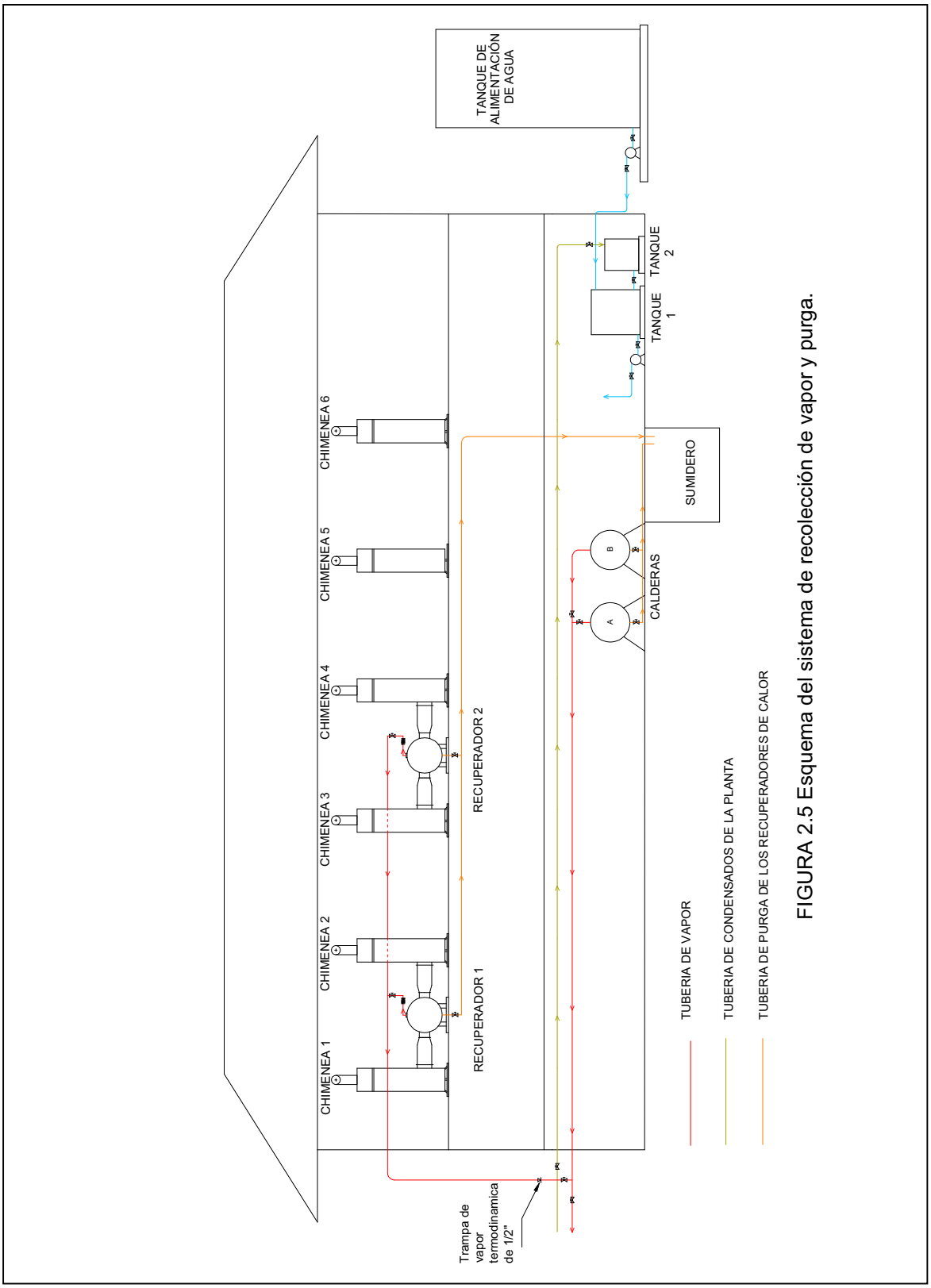


FIGURA 2.5 Esquema del sistema de recolección de vapor y purga

2.2 ASPECTOS GENERALES DE LAS INSTALACIONES QUE SE DEBEN DE CONSIDERAR EN EL DISEÑO

- El espacio disponible para la ubicación del recuperador de calor está limitada por una superficie de 7.50 m x 7 m, la cual se encuentra en la parte superior del cuarto de máquinas donde están instaladas las chimeneas con sus respectivos silenciadores.

- La cantidad de vapor que se necesita para cubrir la demanda de la planta es de 1600 kg/h esta cantidad es la que actualmente produce el caldero que trabaja con Diesel, el cual se encuentra en la parte lateral del cuarto de máquinas.

- Cuatro de los seis motores se encuentran en funcionamiento continuo, los dos restantes son unidades que se ponen en marcha únicamente en emergencias o para dar mantenimiento a las demás.

- La presión de trabajo de todo el sistema de distribución es de 8 Kg/cm^2.

- El número de recuperadores de calor está determinado por la cantidad de vapor que requiere la planta para su consumo y por el espacio disponible entre cada par de chimenea.

- La cantidad de Diesel que requiere el caldero para su continuo funcionamiento es muy grande y por lo tanto implica un gasto excesivo para la planta, por tal razón la implementación de los recuperadores de calor puede eliminar este gasto y utilizar el combustible para otras funciones de la planta.

CAPITULO 3
ANÁLISIS DE LA CORROSIÓN EN EL RECUPERADOR DE CALOR

3.1 CORROSIÓN

El proceso de obtención de un metal refinado requiere una gran cantidad de energía, la misma que se encuentra almacenada en el metal. Debido a que la naturaleza siempre trata de llevar a condiciones más estables a los materiales, es decir que tengan una energía libre de Gibs menor, los metales tienen una tendencia natural a regresar a su estado de baja energía original o “corroerse”.

La corrosión puede ser definida como el ataque químico o electroquímico que sufren los materiales por acción de un medio ambiente agresivo, siempre y cuando conlleve un deterioro de dicho material.

3.1.1 CORROSIÓN DEBIDO AL AGUA DE FORMACIÓN

3.1.1.1 Efecto del pH

Siempre que existen condiciones de bajo pH, la delgada capa de óxido magnético se disuelve y el metal es atacado. El resultado es pérdida de metal en bruto.

Condiciones de pH alto generan escalas protectoras que en cierto grado disminuyen el efecto corrosivo. Sin embargo, estas escalas incrustantes traen a la larga otros problemas como la reducción del área de flujo del agua y por ende variación de los caudales.

3.1.1.1.1 Corrosión Acida

El agua con un pH bajo, ataca al metal en forma generalizada, no localizada como en el caso del oxígeno. El control de un pH adecuado en el agua de la caldera es muy importante ya que la operación en condiciones de relativa acidez, provocarán una corrosión muy severa en un tiempo relativamente corto. En la mayoría de los casos, la alcalinidad presente en el agua de alimentación es aceptable, ya que al

concentrarse en el agua de la caldera, automáticamente el pH alcanza niveles superiores a 9.5. Cuando la alcalinidad del agua de alimentación es insuficiente, se agrega soda cáustica como parte del tratamiento. Las calderas que están instaladas en ingenios azucareros, por ejemplo, están muy expuestas a contaminación del agua con mieles o azúcar. Esto puede ocasionar un descenso en el pH del agua y provocar gran corrosión en pocas horas.

3.1.1.1.2 Corrosión Cáustica

A pesar de que para un adecuado pH es importante operar en condiciones alcalinas, un exceso de iones hidroxilo (OH) particularmente en calderas que trabajan a alta presión, puede resultar en un ataque corrosivo. Este ataque es localizado y por lo general está favorecido por la información de depósitos porosos, en los cuales se evapora el agua dejando una alta concentración cáustica. Sistemas de baja presión, no están expuestos a este tipo de corrosión.

3.1.1.2 Efectos de la Temperatura

La temperatura del agua tiene una influencia indirecta en la tasa de corrosión. Reacciones químicas a temperaturas más altas son parcialmente compensadas por un contenido reducido de oxígeno disuelto. Como regla general, se puede asumir que la corrosión aumenta muy lentamente en aguas con temperaturas más elevadas.

A temperaturas elevadas y presión parcial de hidrógeno alta, éste penetra en el acero, reaccionando con el carbón para formar metano. La presión generada causa una pérdida de ductilidad (fragilización por hidrógeno, "hydrogen embrittlement") y fallos por rotura o formación de burbujas en el acero. La eliminación de carbono (descarburización) provoca el descenso de la resistencia del acero.

3.1.1.3 Efectos de las sales disueltas

Parte del agua de circulación se pierde por evaporación, y como consecuencia, el agua se va concentrando en sales disueltas y sólidos en suspensión. Las sales cálcicas y magnésicas pueden alcanzar su límite de solubilidad, depositándose, por tanto a lo largo del circuito y provocando incrustaciones. Hay que recordar que estas sales disminuyen su solubilidad con la temperatura, al contrario que casi todas las

demás, y también la disminuyen con el pH. Las incrustaciones tienen efectos muy perjudiciales, como descensos en los coeficientes de transferencia de calor y de las secciones reales de paso de los tubos, provocando corrosiones, deformaciones por falta de refrigeración de tubos y roturas de los mismos.

3.1.1.4 Corrosión por oxigeno

El oxígeno disuelto en el agua, se convierte en un elemento muy corrosivo, especialmente cuando el agua se calienta. Uno de los aspectos más negativos es que la corrosión por oxígeno se presenta en forma de perforaciones profundas, por lo que no se requiere que haya habido una gran pérdida de metal para que se produzca una falla en un tubo. La severidad de la corrosión por oxígeno depende de la cantidad de oxígeno disuelto en el agua, del pH y de la temperatura.

Como los óxidos de hierro están en un estado estable y natural, los aceros volverán a esta forma, si las condiciones son favorables desde el punto de vista termodinámico. En general, las condiciones son propicias si el acero que no está cubierto por la forma protectora del óxido de hierro, se expone a líquidos que contengan oxígeno.

Además de la perforación de la pared del tubo, la corrosión por oxígeno es problemática desde otra perspectiva. Las picaduras por oxígeno pueden actuar como sitios de concentración de esfuerzos, fomentando de esta manera el desarrollo de grietas por fatiga con corrosión, grietas cáusticas y otras fallas relacionadas con los esfuerzos.

3.1.1.5 Corrosión por dióxido de carbono CO2

Cualquier cantidad de dióxido de carbono en el agua de alimentación debe ser eliminado. Sin embargo, alguna forma de combinación de dióxido de carbono puede entrar al agua de alimentación de la caldera en forma de carbonatos o bicarbonatos. Bajo la acción del calor la presión estos compuestos pueden formar dióxido de carbono libre que saldrá de la caldera junto con el vapor.

El dióxido de carbono ataca al metal especialmente cuando está en presencia de oxigeno disuelto. El dióxido de carbono combinado con el agua forma acido carbónico que bajo ciertas condiciones, es un agente corrosivo para los metales férreos y las aleaciones de níquel y cobre.

3.1.1.6 Erosión

La erosión resultado de la abrasión causada por las corrientes puede destruir parcialmente la capa protectora del acero. La corrosión puede ser mayor cuando intervienen corrientes más fuertes.

El agua estancada o a baja velocidad usualmente causa una baja tasa de corrosión. La tasa de corrosión generalmente es directamente proporcional a la velocidad.

3.1.1.7 Incrustaciones

Las incrustaciones o depósitos, es la acumulación de materiales sobre las superficies internas de la caldera, que pueden interferir o retardar la transferencia de calor y/o restringir la circulación normal del agua. El efecto resultante será un recalentamiento del metal, pudiendo llegar a presentarse fallas catastróficas. Los contaminantes más comúnmente culpables de la formación de depósitos en sistemas de baja presión son: el calcio y el magnesio.

Muchos sólidos que son solubles en el agua de alimentación se precipitan, o sea, que se convierten en sólidos en suspensión en el agua de la caldera. Este fenómeno se produce a raíz de solubilidad inversa de algunas sales, las cuales se tornan menos solubles conforme aumenta la temperatura. En otros casos, la mayor concentración y cambios químicos que se realizan en el agua de la caldera, serán factor determinante para la precipitación. Tenemos por ejemplo la alcalinidad. Por lo general, en el agua de alimentación, la alcalinidad está en la forma de bicarbonato ($HCO^{-}3$). Dentro de la caldera, la alta temperatura provoca la conversión de bicarbonato a carbonato. Los carbonatos se combinan con el calcio para producir carbonato de calcio.

$$\underbrace{Ca(HCO_3)}_{\text{Bicarbonato de calcio}} + Calor \rightarrow \underbrace{CaCO_3}_{\text{carbonato de calcio}} + CO_2 + H_2O \qquad (3.1)$$

La precipitación, directamente sobre la superficie de los tubos, es lo que forma la incrustación.

La incrustación comienza a actuar como material aislante entre el metal y el agua que circula, la cual actúa como refrigerante sobre la pared del tubo; de ahí viene el recalentamiento y posterior ruptura del metal.

Los sólidos que no se precipitan directamente sobre los tubos, se mantienen en el agua como materiales en suspensión. Esto es lo que se conoce como lodo de caldera. Mucho de este material se irá a acumular sobre la incrustación formada en las áreas más calientes, pero no tendrá la formación cristaloide de la incrustación. Mientras se siga un régimen de purga adecuado, los lodos se pueden extraer de la caldera de manera que no presenten un peligro grave para el sistema. Si la purga no se hace con la frecuencia requerida, los lodos comienzan a depositarse prácticamente sobre toda la superficie de las calderas y sobre todo en áreas de poca circulación. Los depósitos entonces, pueden adherirse muy tenazmente a la superficie del metal y convertirse en un material duro, muy difícil de despegar. El calor actúa cementando los depósitos. Esto es particularmente cierto en calderas a las que se les bota el agua cuando aún están calientes. Debido a este fenómeno, los depósitos de lodos pueden ser tan problemáticos de eliminar como las incrustaciones.

El hierro entra a la caldera en forma de productos de corrosión proveniente de los sistemas de condensado sin ninguna protección contra la corrosión. En calderas sin ningún tratamiento, las incrustaciones pueden ser de carbonato de calcio, sulfato de calcio, etc. Otros contaminantes del agua se comportan en forma diferente; por ejemplo el magnesio tiende a combinarse con la sílice precipitándose como silicato de magnesio; si no hay suficiente sílice, se combina con la alcalinidad como hidróxido de magnesio.

En general, la forma de controlar la formación de depósitos de hierro, cobre y sílice, es limitando su concentración en el agua de la caldera, siendo de especial importancia en el área centroamericana, la sílice.

Los depósitos en áreas externas y anteriores a la caldera, pueden ser causados por uno o varios de los siguientes aspectos: sobresaturación de carbonato de calcio presente en el agua; reacción entre la dureza del agua y productos químicos de tratamiento; la presencia de gran cantidad de hierro y/o condensado contaminado con aceite, por ejemplo. Dos aspectos importantes tendientes a evitar este tipo de problemas son: un buen control de la dureza en el agua de alimentación y procurar que la dosificación del fosfato se haga directamente a la caldera o en la línea de agua de alimentación, lo más cerca de la caldera que las condiciones lo permitan.

Las reacciones químicas principales que se producen en el agua de calderas con las sales presentes por el agua de aporte son las siguientes:

$$Ca^{++} + 2\ HCO_3 \text{ ---------> } CO_3\ Ca + CO_2 + H_2O \qquad (3.2)$$

$$Ca^{++} + SO_4^{=} \text{ ---------> } SO_4Ca\ Ca^{++} + SiO_3^{=} \text{ --------> } SiO_3Ca \qquad (3.3)$$

$$Mg^{++} + 2\ CO_3\ H\text{- -------> } CO_3\ Mg + CO_2 + H_2O \qquad (3.4)$$

$$CO_3\ Mg + 2\ H_2O \text{ -------> } (HO)_2\ Mg + CO_2Mg^{++} + SiO_3 \text{ -----> } SiO_3\ Mg \qquad (3.5)$$

TABLA 3.1 Incrustaciones más comunes

NOMBRE	FÓRMULA QUÍMICA	VARIABLES
Carbonato de Calcio (Calcita)	$CaCO_3$	Presión parcial de CO_2, pH, temperatura, presión total, sólidos disueltos

NOMBRE	FÓRMULA QUÍMICA	VARIABLES
Sulfato de Calcio **Yeso (más común)** **Semi - Hidratado** **Anhídrido**	$CaSO_4 . 2H_2O$ $CaSO_4 . 1/2H_2O$ $CaSO_4$	Temperatura, sólidos disueltos, presión.
Sulfato de Bario	$BaSO_4$	Temperatura, sólidos disueltos, presión
Sulfato de Estroncio	$SrSO_4$	Temperatura, sólidos disueltos, presión
Componentes de Hierro **Carbonato Ferroso** **Sulfuro Ferroso** **Hidróxido Ferroso** **Hidróxido Férrico** **Óxido Férrico**	$FeCO_3$ FeS $Fe(OH)_2$ $Fe(OH)_3$ Fe_2O_3	Gases disueltos, corrosión. Temperatura, presión, pH.

3.1.2 CORROSIÓN DEBIDO A LOS GASES DE COMBUSTIÓN O CORROSIÓN EN CALIENTE.

Algunos metales expuestos a gases oxidantes en condiciones de muy altas temperaturas, pueden reaccionar directamente con ellos sin la necesaria presencia de un electrolito. Este tipo de corrosión es conocida como empañamiento, escamamiento o corrosión por altas temperaturas.

Generalmente esta clase de corrosión depende directamente de la temperatura.

Al estar expuesto el metal al gas oxidante, se forma una pequeña capa sobre el metal, producto de la combinación entre el metal y el gas en esas condiciones de temperatura. Esta capa o “empañamiento” actúa como un electrolito “sólido”, el que

permite que se produzca la corrosión de la pieza metálica mediante el movimiento iónico en la superficie.

Las corrosiones en caliente, son localizadas principalmente en válvulas de escape, chimeneas y turbos fundamentalmente. Son debidas principalmente:

1. Por la composición química de los combustibles, principalmente por la presencia del Azufre, el cual reacciona a altas temperaturas.

2. Por las altas temperaturas a las cuales sucede la combustión, independientemente del contenido en Azufre.

Los óxidos de azufre originan efectos directos e indirectos sobre los materiales, por su concentración en la atmósfera y por su deposición seca y/o húmeda. El dióxido de azufre es sumamente soluble en agua y reacciona para formar ácido sulfúrico.

Los óxidos de nitrógeno (NO_x), otros causantes de la corrosión en caliente, son compuestos químicos, derivados de procesos de combustión, producto del nitrógeno contenido en el aire que se requiere para la combustión.

Los NOx en el aire ambiente consisten fundamentalmente de una mezcla de óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO_2). El NO es la forma predominante y se convierte a NO_2, y se forma en menor proporción (< 10 %).

CAPITULO 4
DISEÑO DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE CALOR.

4.1 CALDEROS

Son aparatos en que se produce intercambio de calor entre los gases producidos por la combustión y, generalmente, agua o aceite con la finalidad de producir vapor, agua o aceite caliente.

4.1.1 GENERADORES DE VAPOR

El balance de energía para un caldero de vapor se representa en la figura 4.1

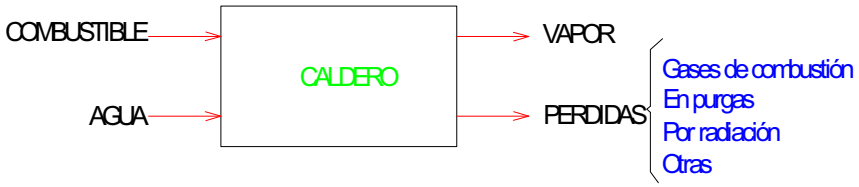


FIGURA 4.1 Balance de energía de un caldero.

Básicamente un caldero consta de tres partes:

- El hogar donde se produce la combustión.
- Tubos a través de cuya superficie lateral se produce el intercambio de calor entre los gases de combustión y el agua a ser evaporada.
- Chimenea para la salida de los gases de combustión a la atmosfera luego que han cedido el calor necesario para la evaporación.

4.1.1.1 Tipos de calderos generadores de vapor

Los calderos pueden clasificarse según diferentes criterios relacionados con el ensamblaje y aspectos estructurales, la disposición de los fluidos y su circulación, el

mecanismo dominante de transferencia de calor, el tipo de combustible empleado, la presión de trabajo, el tipo, el modo de operación, etc.

Según estos criterios, se tendría, por ejemplo, la siguiente clasificación:

4.1.1.1.1 Por el ensamblaje

Existen dos tipos generales de calderos de vapor en relación con el tipo de ensamblaje: calderos empacados y calderos construidos en el sitio.

Calderos empacados

Este tipo de calderos se caracterizan por ser ensamblados en la planta de la fábrica y luego de su instalación están listos para entrar en operación. Su capacidad llega en la práctica hasta 300.000 lb de vapor/h y son de uso generalizado.

Calderos que van a construirse en el sitio

Este tipo de calderos vienen en piezas para ser ensambladas, su capacidad es mayor que la de los empacados y tiene un costo de instalación superior a aquellos.

Algunas de las ventajas de los calderos empacados son:

- Los diseños, materiales de construcción, procedimientos de fabricación, etc., cumplen con códigos ó estándares.
- Cumple con la eficiencia especificada debido a que lo diseños con estándares.
- Son compactos y por lo tanto requieren menor espacio.
- Los costos de instalación son reducidos, pues para ponerlos en operación el trabajo se reduce al realizar anclajes, conexiones a las líneas de corriente eléctrica, agua, combustible y tubería de vapor y al instalar los accesorios en los sitios previstos.

Por las consideraciones anteriores y la capacidad máxima anotada, los calderos más utilizados en la industria son los de tipo empacado.

4.1.1.1.2 Por la circulación de los fluidos

En esta clasificación se destacan las siguientes configuraciones:

4.1.1.1.2.1 Calderos de tubos de fuego

Consisten en recipientes cilíndricos que contienen tubos pasantes a lo largo de ellos. El haz ó banco de tubos es generalmente horizontal, pero puede ser también vertical en los de menos capacidad.

La combustión se realiza en cámaras cilíndricas ubicadas en el interior y los gases calientes circulan por los tubos, dispuestos en uno ó varios pasos, cediendo el calor al agua contenida en el recipiente antes de salir por la chimenea (FIGURA 4.2).

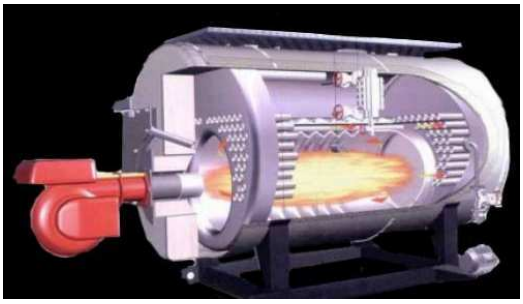


FIGURA 4.2 Caldero de tubos de fuego.

Características importantes de los calderos de tubos de fuego:

- Capacidad máxima de 850 BHP (1 BHP = 8,436 Kcal/h).
- Presión máxima de 250 psi
- Intensidad de vaporización de 6,9 lb vapor/h pie^2.
- Tubos generalmente de 2 a 2½ pulgadas de diámetro exterior, con arreglo generalmente triangular y distancias de 1 a 1½ pulgadas entre ellos.

- Número de pasos de los gases por los tubos antes de salir por la chimenea de 2, 3 y 4 (FIGURAS 4.3, 4.4, 4.5), siendo más eficientes en recuperación del calor los de mayor número de pasos.
- Eficiencia total alrededor del 80%.

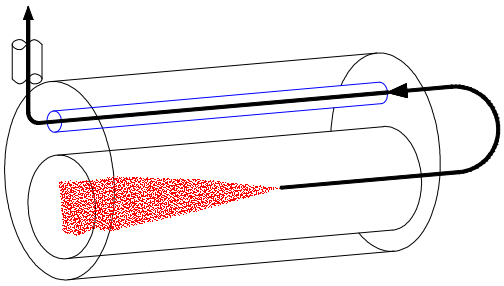


FIGURA 4.3 Caldero de dos pasos.

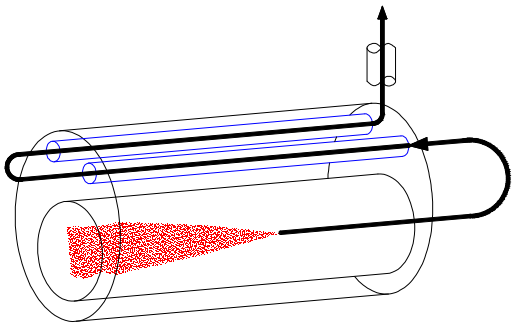


FIGURA 4.4 Caldero de tres pasos.

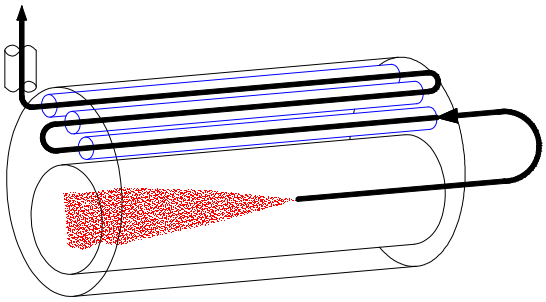


FIGURA 4.5 Caldero de cuatro pasos.

4.1.1.1.2.2 Calderos de tubos de agua

El los calderos de tubos de agua, el agua circula por el interior de los tubos. La transferencia de calor se verifica desde los gases de combustión calientes que circulan por el exterior de los tubos al agua que circula por el interior en convección natural.

Características importantes de los calderos de tubos de fuego:

- Capacidad máxima de 300.000 lb vapor/h.
- Presión máxima de 1.500 psi
- Intensidad de vaporización más de 20 lb vapor/h pie^2.
- Tubos generalmente de 2 a 4 pulgadas de diámetro exterior.
- Eficiencia total mayor que el 80% según el equipo complementario de ahorro energético que lleven acoplado. En este tipo de caldero puede acoplarse economizadores para precalentar el agua de alimentación, sobre calentadores de vapor.

Los calderos de tubos de agua empacados según la disposición de los tubos pueden ser:

- *Calderos de Tubos Rectos*

No son muy usuales. En este tipo de calderos los tubos se disponen en banco con inclinación de 5 a 15 grados y con distancias de centro a centro de los tubos de 7 a 8 pulgadas longitudinalmente y 6 pulgadas verticalmente (Fig. 4.6).

Por el lado de los tubos se disponen deflectores dando 2 ó 3 pasos a través del haz de tubos.

Los tubos en que se realiza la evaporación están conectados a un domo colocado en la parte superior del banco de tubos para almacenar vapor y agua.

El vapor producido en el interior asciende hacia el domo en donde se separa del líquido.

El agua desciende por los tubos hacia el depósito interior para lodos. Aquí los sólidos disueltos del agua de alimentación y que se concentran por la evaporación, se depositan y son, en parte, removidos del sistema por purgas que pueden ser manuales ó automáticas. De aquí el agua sigue circulando por los tubos por convección natural a tiempo que se evapora.

FIGURA 4.6 Caldero de tubos rectos.

- *Calderos de Tubos Doblados*

En estos calderos, de mayor capacidad que son los de tubos rectos, los tubos están conectados a 2, 3 ó 4 tambores ó domos. Los colocados en la parte superior del banco de tubos almacenan agua y vapor. La circulación del agua se hace por convección natural, como en los calderos de tubos rectos.

Tienen tres formas básicas de diseño, dadas por la forma que adquiere la disposición de los tubos A, D y O existiendo diseños combinados o más complejos.

Los tubos del caldero están dispuestos en las paredes laterales, aunque también se usan tubos de calentamiento en la parte inferior y pared posterior del caldero.

Los calderos de tubos de agua de tubos doblados, comparados con calderos de tubos de agua de tubos rectos:

- Son de mayor capacidad.
- Permiten mayor flexibilidad de diseño con mejor aprovechamiento del espacio.

Si se comparan los calderos de tubos de agua con los calderos de tubos de fuego, resulta ser:

- De mayor capacidad y eficiencia.
- Pueden trabajar a presiones más elevados.
- Son más seguros, cualquier fuga no produce descompresión en el sistema.
- Suministrar vapor con mayor rapidez y permiten atender demandas fluctuantes. Tienen mayor reserva.
- Son más accesibles para la limpieza, inspección y mantenimiento.

4.1.1.1.2.3 Calderas de tubos de humo

El vapor se genera calentando un importante volumen de agua, por medio de los humos producidos durante la combustión de gas o combustibles derivados del petróleo que circulan por los tubos sumergidos. Esta es la técnica más clásica para la producción de vapor saturado, de agua o de vapor sobrecalentado para una gama de caudales de 160 a 50000 kg/h (112 a 34000 kW). Son de fácil construcción, ocupan un reducido espacio y son fáciles de ubicar.

La principal diferencia que presentan frente a los calderos de tubos de fuego es la ausencia de quemador, pues estos calderos son acoplados directamente a los ductos de escape de otros equipos. Generalmente estos equipos son diseñados para un solo paso, ya que, un número mayor dificultaría la salida de los gases de escape y por ende tendría un efecto perjudicial en el rendimiento del motor al que está acoplado.

FIGURA 4.7 Caldero de tubos de humo.

Generalmente este tipo de calderos son diseñados para un régimen de ebullición nucleada debido a que esta condición asegura un coeficiente de transferencia de calor aceptable.

Ebullición Nucleada:

Antes de iniciarse la ebullición del líquido se aplicarán las ecuaciones habituales de transmisión de calor en régimen laminar o turbulento según proceda. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que elevados flujos de calor a través de la pared de la conducción, combinados con velocidades no excesivas del líquido, pueden motivar apreciables efectos convectivos pudiendo alcanzarse antes de lo esperado la temperatura de la pared requerida para la iniciación de la ebullición.

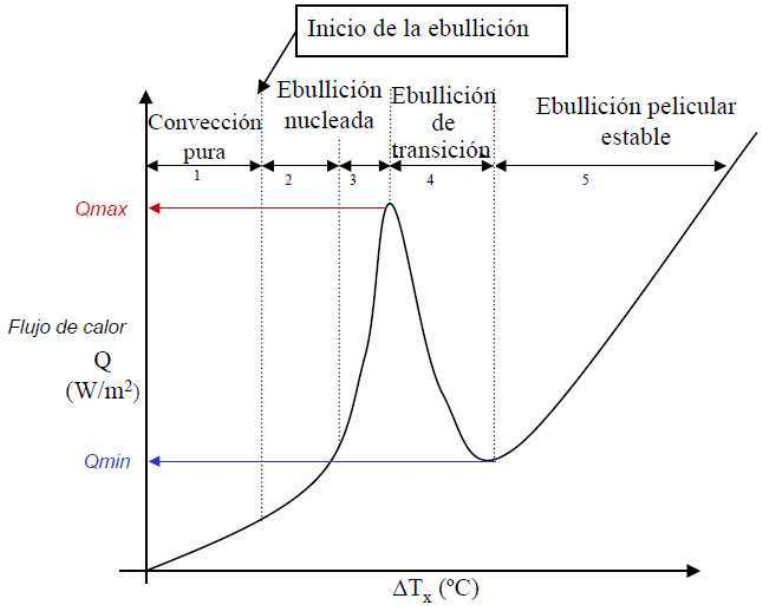


FIGURA 4.8 Etapas de la ebullición.

Tras la sección de iniciación de la ebullición, la temperatura de la pared y con ella su sobrecalentamiento suele descender ligeramente. El descenso se atribuye a los pequeños ángulos de contacto de los líquidos bien desgasificados y sugiere que los centros de nucleación inestables se activan al ser barridos por las burbujas procedentes de los centros estables anteriores. Para flujos de calor en las paredes más pequeños disminuye la sobrecalefacción de la pared en la región de ebullición superficial sin variar su sección de iniciación.

La gran ventaja que presenta la ebullición nucleada es que no se pierde el contacto entre el líquido y la superficie, garantizando así un óptimo coeficiente convectivo.

En la ebullición nucleada, la temperatura excedente ΔT_x es el potencial de temperatura físicamente significativo, el cual es la diferencia de temperaturas entre la superficie y la masa del fluido, la cual nos permite calcular el coeficiente de ebullición nucleada representada en la siguiente ecuación:

$$h_b = \frac{q''}{\Delta T_x} \tag{4.1}$$

Utilizando como guía datos experimentales sobre la ebullición en recipientes, Rohsennow modifico la ecuación tipo Nusselt:

$$Nu_b = \frac{h_b D_b}{k_l} = \emptyset(Re_b, Pr_l) \tag{4.2}$$

Por medio de suposiciones simplificadoras. Una ecuación conveniente para la reducción y correlación de datos experimentales de diferentes fluidos es:

$$\frac{c_l \Delta T_x}{h_{fg} Pr_l^n} = C_{sf} \left[\frac{q''}{\mu_l h_{fg}} \sqrt{\frac{g_c \sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \right]^{0.33} \tag{4.3}$$

Donde:

c_l = calor específico de líquido saturado, $\left[\frac{J}{Kg\ °C}\right]$

q'' = flujo calórico, $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

h_{fg} = calor latente de vaporización, $\left[\frac{J}{Kg}\right]$

g = aceleración de la gravedad, $\left[\frac{m}{seg^2}\right]$

g_c = factor de conversión de unidades = 1 $\left[\frac{Kg\ m}{N\ seg^2}\right]$

ρ_l = densidad de líquido saturado, $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

ρ_v = densidad de vapor saturado, $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

σ = tensión superficial en la interfaz líquido-vapor, $\left[\frac{N}{m}\right]$

$Pr_l =$ número de Prandtl del líquido saturado.

μ_l = viscosidad del líquido, $\left[\frac{Kg}{m\ seg}\right]$

$n =$ 1.0 para el agua, 1.7 para otros líquidos.

$C_{fs} =$ constante empírica que depende de la naturaleza de la superficie de calentamiento-fluido, cuyo valor varia de un sistema a otro.

Las variables más importantes que afectan a C_{sf} son la rugosidad de la superficie de calentamiento, pues la que determina en número de sitios de nucleación para una temperatura dada, y el ángulo de contacto entre la burbuja y la superficie de calentamiento, el cual es una medida de humectancia de una superficie con un fluido en particular.

4.1.2 CALEFACTORES

El uso de aceite térmico es un ejemplo de calefacción indirecta en el que el aceite se calienta en un caldero y se envía mediante tuberías a distintos radiadores instalados en equipos como: ramas, sacadoras, calandras, reactores de doble fondo, etc. Luego de haber transmitido su calor a los mismos retorna al caldero para repetir el ciclo.

El uso de aceite térmico como fluido de calefacción indirecta aventaja el uso del agua con la misma finalidad, en que tiene tensiones de vapor muy inferiores a las del agua por lo que puede alcanzar temperaturas altas con bajas presiones de trabajo.

Así, el agua a 120 ˚C requiere una presión de 2 Kg/cm^2, a 180 ˚C, 10 Kg/cm^2, a 240 ˚C, 34 Kg/cm^2, a 360 ˚C, 190 Kg/cm^2, mientras que el aceite térmico a 350 ˚C, que puede ser una temperatura limite, necesita presiones de 0,2 Kg/cm^2 de acuerdo al tipo.

4.1.2.1 Calderos de aceite térmico

Existen dos tipos principales de calderos de aceite térmico:

- Calderos de tubos doblados.
- Calderos mono o multitubulares de serpentín.

4.1.2.1.1 Calderos de Tubos Doblados Lisos

Los calderos de tubos doblados lisos o aleados, son como los descritos en la sección 4.1.1.1.2.2 consta especialmente de:

- La cámara de combustión.
- Tubos doblados dispuestos en la periferia de la cámara, por cuyo interior circula el aceite térmico a presión.
- La chimenea para la salida de los gases de escape.

En estos calderos los domos para el vapor y lodos que tienen los calderos descritos en 4.1.1.1.2.2 se sustituyen por un depósito hermético presurizado para expansión del fluido y un depósito hermético aislado del aire para acumulación de mismo.

4.1.2.1.2 Calderos Mono o Multitubulares de Serpentín.

Constan como en el caso anterior de los tres elementos fundamentales de todo caldero.

La cámara generalmente es cilíndrica ó cónica, en cuyo interior se disponen los tubos formando una ó dos espirales paralelas en la superficie lateral. El quemador de preferencia se sitúa en la parte superior de la cámara, con la finalidad de que los tubos reciban el calor directamente por radiación y por convección luego que los gases retornan del fondo circulando entre la pared de la cámara y los espirales antes de salir por la chimenea.

Algunas características importantes de los calderos de aceite térmico mono ó multitubulares de serpentín:

- Los espirales son construidos de tubería sin costura, generalmente de 2 a 2 ½ pulgadas de diámetro exterior.
- Las conexiones se efectúan mediante soldadura ó bridas, no se admiten uniones roscadas.
- Las espirales se disponen paralelamente a la longitud de la llama para aprovechar el calor por radiación en la mejor forma.
- La temperatura máxima esta en el orden de 350 ˚C.
- La presión de saturación efectiva esta entre 0,2 y 8 Kg/cm^2.
- La circulación es forzada mediante equipo de bombeo común al circuito y al caldero.
- La velocidad de circulación debe regularse para evitar sobrecalentamientos del aceite que podría conducir a degradación y craqueo.
- La instalación debe incluir un tanque de expansión térmica resistente a la presión, pues el aceite sufre una expansión térmica que puede estar en el orden del 10% por cada 100˚C.
- La instalación debe incluir un tanque de almacenamiento hermético para evitar envejecimiento y precipitaciones que se producen por contacto del aceite con el oxigeno del aire.

4.1.2.2 Calderos de agua caliente

Usualmente se tiene dos tipos de calderos para agua caliente:

- Calderos para agua caliente a una temperatura inferior a 110 ˚C.
- Calderos para agua sobrecalentada.

4.1.2.2.1 Calderos Para Agua Caliente a una Temperatura Inferior a 110 ˚C.

Los tipos más comunes son:

- Calderos de tubos de fuego, como los descritos en la sección 4.1.1.1.2.1 pero inundados es decir sin dejar cámara para el vapor.
- Calderos mono o multitubulares de serpentín, como los descritos en la sección 4.1.2.1.2 que pueden ser horizontales o verticales, como puede verse en las Fig. 4.9 y 4.10.

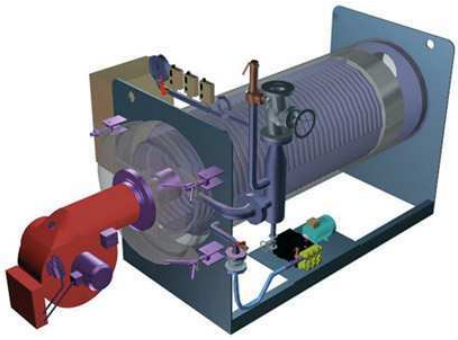


FIGURA 4.9 Caldero horizontal.

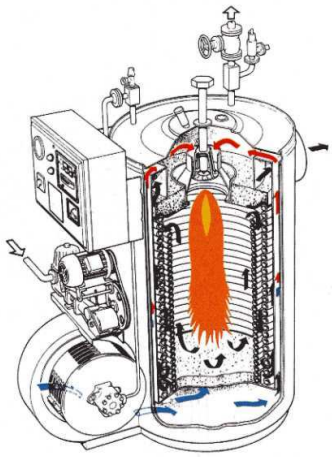


FIGURA 4.10 Caldero vertical.

Algunas características importantes de los calderos de agua caliente:

- Como en el casos de calderos de aceite térmico de serpentín, los espirales son construidos de tubería sin costura, generalmente de 2 a 2 ½ pulgadas

de diámetro exterior y se disponen paralelamente a la longitud de la llama para aprovechar el calor por radiación en la mejor forma.

- La temperatura máxima es de 110℃.
- La circulación del agua es forzada en circuito cerrado, mediamente bombeo.
- La instalación debe incluir un tanque de expansión térmica y almacenamiento.

4.1.2.2.2 Calderos de Agua Sobrecalentada

Los tipos de calderos más comunes de agua sobrecalentada son:

- Calderos de tubos de fuego, como los descritos en la sección 4.1.1.1.2.1, inundados.
- Calderos de tubos de agua, como los descritos en la sección 4.1.1.1.2.2 de circulación forzada en que los domos para vapor y lodos se han sustituido por un tanque de expansión y almacenamiento..

Algunas características importantes de los calderos para agua sobrecalentada:

Son similares a las indicadas para calderos de agua caliente, excepto que la temperatura máxima practica es de 200℃ y se deben tomar providencias especiales para manejar las presiones que requiere el agua a elevadas temperaturas, como es estableció anteriormente.

4.2 EQUIPOS AUXILIARES PARA CALDEROS

El equipo auxiliar está constituido fundamentalmente por:

- Equipo de ablandamiento y alimentación de agua, incluye: batería de resinas de intercambio iónico, tanque de precalentamiento de agua, válvulas, bomba.

- Equipo para suministrar combustible, incluye: tanque de almacenamiento y sistema de distribución con válvulas, filtros, bombas, etc.

Para combustibles pesados, como bunker, además de lo anteriormente anotado, se tiene que precalentar el combustible y tener precauciones en el transporte y atomización del mismo.

- Quemador y equipo de monitoreo de llama que regula la secuencia automática predeterminada de encendido, el mismo que puede ser mecánico ó electrónico.
- Equipo para suministrar aire para la combustión, incluye: motor, ventilador, compuertas para regulación de flujo.
- Equipo de control y seguridad, incluye: manómetros, termómetros, corte de encendido a máxima presión, válvulas de seguridad, alarma de bajo nivel de agua, corte de encendido cuando existe fallas en el barrido de gases previo al encendido.

4.3 RECIPIENTES A PRESIÓN

Se considera como un recipiente a presión cualquier cuerpo cerrado que sea capaz de almacenar un fluido a presión manométrica, ya sea presión interna o vació, independientemente de su forma y dimensiones.

Por su uso se dividen en recipientes de almacenamiento y en recipientes de proceso. Los primeros sirven únicamente para almacenar fluido a presión, es decir, son usados como tanques de almacenamiento, tanques de día, tanques acumuladores, etc.

Los recipientes a presión de proceso tienen múltiples y muy variados usos, entre ellos los intercambiadores de calor, calderas, reactores, torres de destilación, etc.

Los intercambiadores de calor son considerados como recipientes a presión, los cuales están normalizados según el código A.S.M.E., Sección VIII y IX.

4.4 DISEÑO DEL RECUPERADOR DE CALOR

4.4.1 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO

El recuperador de calor trabajará con los siguientes parámetros de diseño:

- Todos los cálculos se apegarán a un régimen de ebullición nucleada.
- Los gases de escape pasan una sola vez a través de los tubos de la caldera, por tal razón se consideraría un caldero de un solo paso.
- Condiciones de estado estable.
- El consumo total de vapor de la planta es de 1600 kg/h.
- La capacidad de generación del recuperador debe estar en capacidad de cubrir la demanda total de la planta manteniendo un rango de seguridad del 10% de sobreproducción (1760 Kg/h).
- La presión de diseño es de 10 Kg/cm^2.
- La temperatura del agua de alimentación es: T agua = 40 ℃.
- El espacio disponible para la instalación del equipo es de 52.5 m^2.
- La planta dispone de tubería de 3 in de diámetro.
- La efectividad requerida para el equipo es del 60%

4.4.2 DIMENSIONAMIENTO DEL RECUPERADOR DE CALOR

En este proceso, un porcentaje de calor se emplea en elevar la temperatura del agua de alimentación de 40℃ que es con la que ingresa al caldero, hasta su temperatura de saturación, posteriormente es necesario un nuevo aporte de calor para el proceso de evaporación, que permita llevar al agua de formación de líquido saturado a vapor a la presión de saturación de 10 Kg/cm^2.

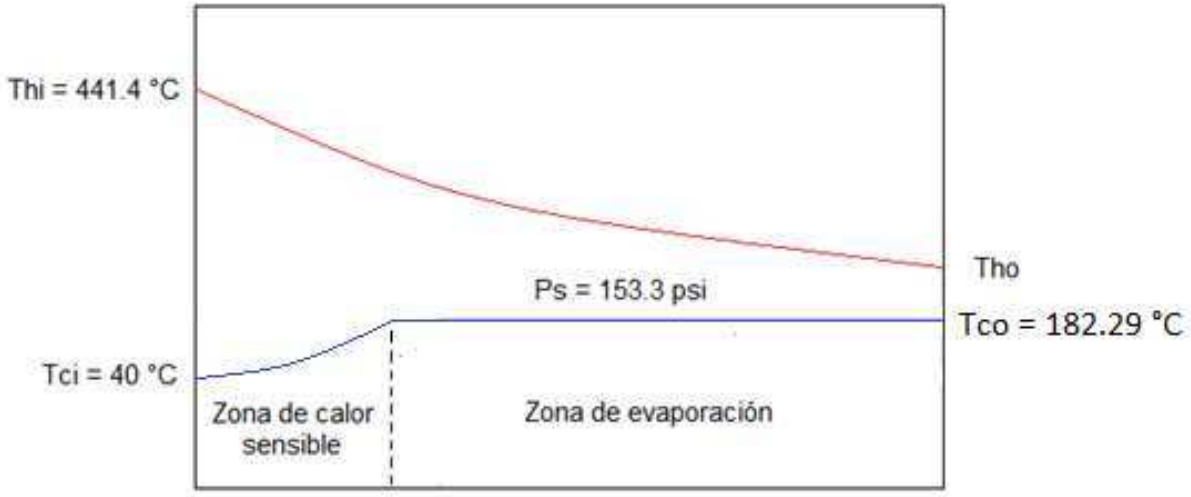


FIGURA 4.11 Esquema del proceso de generación de vapor.

4.4.2.1 Balance energético

$$Q_h = Q_c = Q \tag{4.4}$$

$$Q_h = \dot{m}_h \overline{Cp_h}(Th_i - Th_o) = \dot{m}_h \Delta h_h \quad \rightarrow \text{ Fluido Caliente} \tag{4.5}$$

$$Q_c = \dot{m}_c \overline{Cp_c}(Tc_o - Tc_i) + \dot{m}_c h_{fg} \quad \rightarrow \text{ Fluido Frío} \tag{4.6}$$

Siendo:

$Q_h =$ calor que cede el fluido caliente, $\left[\frac{Kcal}{Kg}\right]$

$Q_c =$ calor que recibe el fluido frío, $\left[\frac{Kcal}{Kg}\right]$

$\dot{m}_h =$ flujo másico del fluido caliente, $\left[\frac{Kg}{h}\right]$

$\dot{m}_c =$ flujo másico del fluido frío, $\left[\frac{Kg}{h}\right]$

$h_{fg} =$ calor latente de vaporización, $\left[\frac{Kcal}{Kg}\right]$

$\overline{Cp_h}$ = calor específico medio del fluido Caliente, $\left[\frac{Kcal}{Kg°C}\right]$

$\overline{Cp_c}$ = calor específico medio del fluido frío, $\left[\frac{Kcal}{Kg°C}\right]$

T_{co} = Temperatura de salida del fluido Caliente,$[°C]$

T_{ci} = Temperatura de entrada del fluido caliente,$[°C]$

T_{ho} = Temperatura de salida del fluido frío,$[°C]$

T_{hi} = Temperatura de entrada del fluido frío,$[°C]$

4.4.2.2 Cálculo del calor requerido para la generación de vapor

De la ecuación 4.4 y 4.5 se tiene que:

$$Q = \dot{m}_c\overline{Cp_c}(Tc_o - Tc_i) + \dot{m}_c h_{fg}$$

Se conoce que la presión de diseño para el recuperador es de 10 kg/cm^2 (142.3 psi), teniendo como presión atmosférica local 571 mm de Hg (11.0413 psi) se obtiene el valor de la presión absoluta a la que se encontrará el vapor. (Dato tomado del análisis de gases de combustión mostrado en el Anexo 10)

$$P_{abs} = 142.3 + 11.04$$

$$P_{abs} = 153.3\ [psia]$$

$\overline{Cp_c} = 1.02\ \left[\frac{Kcal}{Kg\ °C}\right]$ (Anexo 1)

Propiedades del vapor saturado @ P=153.3 psia. (Anexo 2)

$$T = 182.29\ [°C]\ = T_{co}$$

$$h_f\ =\ 184.79\left[\frac{Kcal}{Kg}\right]$$

$$h_g = 663.78\left[\frac{Kcal}{Kg}\right]$$

$$h_{fg} = 478.99\left[\frac{Kcal}{Kg}\right]$$

$$Q = 1760\left[\frac{Kg}{h}\right] * 1.02\left[\frac{Kcal}{Kg\ °C}\right] * (182.29\ [°C] - 40\ [°C]) + 1760\left[\frac{Kg}{h}\right](478.99)\left[\frac{Kcal}{Kg}\right]$$

$$Q = 1098461.408\left[\frac{Kcal}{h}\right]$$

4.4.2.3 Cálculo del flujo másico de gases de escape requerido para la generación de vapor

Para establecer cuál es el flujo másico de los gases de escape mínimo que permita generar la cantidad de vapor requerido y diseñar un equipo con las condiciones de efectividad planteadas, se deben tomar en cuenta que por tratarse de un proceso de transferencia de calor con cambio de fase el valor de c_c es infinito, razón por la que:

$$C_{min} = C_h = \dot{m}_h\overline{Cp_h} \tag{4.7}$$

$$\dot{m}_h = \frac{C_{min}}{\overline{Cp_h}}$$

$$Q_{max} = \frac{Q}{\varepsilon} \tag{4.8}$$

$$Q = 1098461.408\left[\frac{Kcal}{h}\right]$$

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}}$$

$$Q_{max} = \frac{Q}{\varepsilon} = \frac{1098461.408\left[\frac{Kcal}{h}\right]}{0.6} = 1.83077x10^6\left[\frac{Kcal}{h}\right]$$

$$Q_{max} = C_{min}(T_{hi} - T_{ci}) \tag{4.9}$$

$$C_{min} = \frac{Q_{max}}{(T_{hi} - T_{ci})}$$

$$C_{min} = \frac{1.83077x10^6 \left[\frac{Kcal}{h}\right]}{(441.4 - 40)[°C]} = 4560.96 \left[\frac{Kcal}{h\ °C}\right]$$

$$\dot{m}_h = \frac{4560.96 \left[\frac{Kcal}{h\ °C}\right]}{0.2606 \left[\frac{Kcal}{Kg\ °C}\right]} = 17501{,}8 \left[\frac{Kg}{h}\right]$$

4.4.2.4 Cálculo de la temperatura a la salida de los gases de escape

El cálculo de la temperatura a la salida de los gases de escape se realiza mediante un proceso de iteración asumiendo un valor aproximado y comparándolo luego con uno calculado.

Las ecuaciones que rigen este cálculo son las siguientes:

$$Q = \dot{m}_c \overline{Cp_c}(Tc_o - Tc_i) + \dot{m}_c h_{fg} = \dot{m}_h \overline{Cp_h}(Th_i - Th_o)$$

De donde:

$$\dot{m}_h = 17501{,}8 \left[\frac{Kg}{h}\right]$$

$$T_{ho} = Th_i - \frac{Q}{\dot{m}_h \overline{Cp_h}} \tag{4.10}$$

$$T_{mh} = \frac{T_{hi} + T_{ho}}{2} \tag{4.11}$$

Se asume:

$$T_{ho} = 250\ [°C]$$

$$T_{mh} = \frac{441.4\ [°C] + 250\ [°C]}{2} = 345.7\ [°C]$$

$$\overline{Cp_h}\ @\ T_{mh} = 0.2606 \left[\frac{Kcal}{Kg\ °C}\right]$$

La obtención de el valor del $\overline{Cp_h}$ se describe en el Apéndice A.

Por tanto se tiene que:

$$T_{ho} = 441.4\ [°C] - \frac{1098461.408\ \left[\frac{Kcal}{h}\right]}{17501{,}8\ \left[\frac{Kg}{h}\right] 0.2606\ \left[\frac{Kcal}{Kg\ °C}\right]} = 200.56\ [°C]$$

El siguiente valor asumido es el promedio entre el último valor asumido y el calculado.

Los resultados de las iteraciones se muestran a continuación.

TABLA 4.1 Cálculo de la temperatura a la salida de los gases de escape.

T_{ho} sumido [°C]	T_{mh} [°C]	$\overline{Cp_h}$ [Kcal/(Kg°C)]	$\dot{m}_h$ [Kg/h]	T_{ho} calculado [°C]
250,00	345,70	0,26066	17497,8	200,56
200,56	320,98	0,259619	17567,9	200,56

$T_{ho} = 200.56\ \ [°C]$

$T_{mh} = 320.98\ \ [°C]$

Al comparar este dato con el flujo másico disponible calculado en el Apéndice A, el cuál es de 30070 [Kg/h], se confirma que se cuenta con el flujo necesario de gases de combustión para la producción de vapor. El excedente de gases se desecha a través de una derivación en el ducto de escape.

4.4.2.5 Cálculo del área de transferencia. Método del NTU.

El cálculo del área de transferencia de calor se determina tomando como base la efectividad que debe tener el equipo diseñado, el procedimiento de cálculo se muestra a continuación:

$\varepsilon = 0.6$

$$NTU = -ln(1 - \varepsilon) \tag{4.12}$$

$$NTU = -ln(1 - 0.6) = 0.916$$

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}} \tag{4.13}$$

Se asume que:

$$U = 50 \left[\frac{Kcal}{h\, m^2\, °C}\right]$$

De la ecuación 4.13 se tiene:

$$A = \frac{C_{min}\, NTU}{U}$$

$$A = \frac{4560.96 \left[\frac{Kcal}{h\, °C}\right] 0.916}{50 \left[\frac{Kcal}{h\, m^2\, °C}\right]} = 83.56\, [m^2]$$

Características de la tubería: (Anexo 5)

$$Di = 0.0704\, [m]$$

$$De = 0.0762\, [m]$$

4.4.2.6 Cálculo del número de tubos requeridos

Debido a factores de disponibilidad de espacio, se ha llegado a establecer que para asegurar un área suficiente para dar mantenimiento y poner en marcha el equipo, la longitud de los tubos no debe ser mayor a 3 [m], considerando a demás que la longitud máxima de la tubería empleada es de 5.9 [m] y tomando en cuenta los requerimientos para la soldadura, se ha llegado a establecer para el cálculo una longitud de 2.88 [m].

Luego de estas consideraciones se tiene que:

$$n = \frac{A}{\pi . De . L} \tag{4.14}$$

$$n = \frac{83.56\ [m^2]}{\pi * 0.0762\ [m] * 2.88[m]} = 121.2\ \cong 122\ tubos$$

4.4.2.7 Cálculo de la temperatura de la pared

$$\Delta T = Tw - Tsat \tag{4.15}$$

$$Tw = \Delta T + Tsat$$

Según Rohsennow, la ecuación 4.3 permite encontrar la temperatura excedente en régimen de ebullición nucleada es:

$$\Delta T = C_{fs} \left[\frac{q''}{\mu_l\, h_{fg}} \sqrt{\frac{g_c\, \sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \right]^{0.33} \left(\frac{h_{fg} {Pr_l}^n}{c_l} \right) \tag{4.16}$$

Siendo:

c_l = calor específico de líquido saturado, $\left[\frac{J}{Kg\ °C}\right]$

q'' = flujo calórico, $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

h_{fg} = calor latente de vaporización, $\left[\frac{J}{Kg}\right]$

g = aceleración de la gravedad, $\left[\frac{m}{seg^2}\right]$

g_c = factor de conversión de unidades = 1 $\left[\frac{Kg\ m}{N\ seg^2}\right]$

ρ_l = densidad de líquido saturado, $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

ρ_v = densidad de vapor saturado, $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

$\sigma =$ tensión superficial en la interfaz líquido-vapor, $\left[\frac{N}{m}\right]$

$Pr_l =$ número de Prandtl del líquido saturado

μ_l = viscosidad del líquido, $\left[\frac{Kg}{m\ seg}\right]$

$n =$ 1.0 para el agua, 1.7 para otros líquidos

$C_{fs} =$ constante empírica que depende de la naturaleza de la superficie de calentamiento-fluido, cuyo valor varia de un sistema a otro.

$$q" = \frac{Q\left[\frac{Kcal}{h}\right]}{A\ [m^2]} \tag{4.17}$$

$$q" = \frac{1098461.408\ \left[\frac{Kcal}{h}\right]}{83.56\ [m^2]} = 13145.8\ \left[\frac{Kcal}{h\ m^2}\right]$$

$$q" = 15284.26\ \left[\frac{W}{m^2}\right]$$

Conociendo:

$h_{fg} = 2005052.14 \left[\frac{J}{Kg}\right]$ (Anexo 2)

$$c_l = 4408\ \left[\frac{J}{Kg\ °C}\right]$$

$$g = 9.8\ \left[\frac{m}{seg^2}\right]$$

$$g_c = 1\ \left[\frac{Kg\ m}{N\ seg^2}\right]$$

$$\rho_l = 883.87\ \left[\frac{Kg}{m^3}\right]$$

$\rho_v = 5.39 \left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

$\sigma = 4.17\ x\ 10^{-2} \left[\frac{N}{m}\right]$

$Pr_l = 1.0031$

$\mu_l = 1.51\ x\ 10^{-4} \left[\frac{Kg}{m\ seg}\right]$

$n = 1.0$

$C_{fs} = 0.0133$

Datos obtenidos de los Anexos 3 y 4.

$$\Delta T = 0.0133\left[\frac{15284.26\ \left[\frac{W}{m^2}\right]}{1.51\ x\ 10^{-4}\ \left[\frac{Kg}{m\ seg}\right] 2005052.14 \left[\frac{J}{Kg}\right]}\sqrt{\frac{1\ \left[\frac{Kg\ m}{N\ seg^2}\right]\ 4.17\ x\ 10^{-2}\ \left[\frac{N}{m}\right]}{9.8\ \left[\frac{m}{seg^2}\right](883.87\ -5.39)\left[\frac{Kg}{m^3}\right]}}\right]^{0.33}\left(\frac{2005052.14\left[\frac{J}{Kg}\right]1.0031}{4408\ \left[\frac{J}{Kg\ °C}\right]}\right)$$

$\Delta T = 2.93\ [°C] \cong 3\ [°C]$

De la ecuación 4.15 se tiene:

$Tw = 3\ [°C] + 182.29\ [°C]$

$Tw = 185.29\ [°C]$

4.4.2.8 Cálculo del coeficiente de convección interno

Este coeficiente se ve determinado por la ecuación tipo Nusselt que se muestra a continuación:

$$h_i = \frac{Nu\ k}{Di} \tag{4.18}$$

Siendo:

$Nu =$ número de Nusselt

$K =$ coeficiente de conductividad térmica del fluido caliente

$Di =$ diámetro interior de la tubería

$h_i =$ coeficiente de convección interno

Características de la tubería: (Anexo 5)

$Di = 0.0704\ [m]$

$De = 0.0762\ [m]$

El coeficiente de transferencia de calor interno depende del flujo másico que circula por el interior de los tubos, lo que a su vez establece la velocidad del fluido en su interior.

El flujo dentro de las tuberías no debe exceder los 30.05 [m/seg] ni bajar de los 0.9 [m/seg] para evitar posibles problemas de pérdidas de presión debido a procesos de erosión[2].

$$v = \frac{Caudal}{A_t}$$

$$Caudal = \frac{\dot{m}_{ht}}{\rho_i}$$

$$\dot{m}_{ht} = \frac{\dot{m}_h}{n} = \frac{17500\left[\frac{Kg}{h}\right]}{122} = 143.44\ \left[\frac{Kg}{h}\right]$$

$\rho_i = 0.3740\ \left[\frac{Kg}{m^3}\right]$ (Apéndice A; Tabla A13)

$$Caudal = \frac{143.44\ \left[\frac{Kg}{h}\right]}{0.3740\ \left[\frac{Kg}{m^3}\right]} = 383.53\left[\frac{m^3}{h}\right]$$

$$A_t = \frac{\pi Di^2}{4} = \frac{\pi * \left[0.0704\ [m]\right]^2}{4} = 0.003893\ [m^2]$$

[2] Perry ; Manual del Ing. Químico; Pág. 10-44

$$v = \frac{383.53 \left[\frac{m^3}{h}\right]}{0.003893\ [m^2]} = 98517.9 \left[\frac{m}{h}\right]$$

$$v = 27.36 \left[\frac{m}{seg}\right]$$

Siendo:

$v =$ Velocidad del fluido por el interior de los tubos $\left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{seg}}\right]$

$A_t =$ Área de la sección transversal interna de los tubos $[\mathrm{m}^2]$

$\rho_i =$ Densidad del gas $\left[\frac{\mathrm{Kg}}{\mathrm{m}^3}\right]$

$\dot{m}_h =$ Flujo másico total de gases $\left[\frac{\mathrm{Kg}}{\mathrm{h}}\right]$

$\dot{m}_{ht} =$ Flujo másico de gases por tubo $\left[\frac{\mathrm{Kg}}{\mathrm{h}}\right]$

$n =$ Número de tubos

Propiedades de los gases de escape @ T_{mh}: (Anexos 6 y 7)

$$Cp = 0.2617 \left[\frac{Kcal}{Kg\ °C}\right]$$

$$\rho = 0.41434 \left[\frac{Kg}{m^3}\right]$$

$$\mu = 0.1088 \left[\frac{Kg}{m\ h}\right]$$

$$k = 0.04 \left[\frac{Kcal}{m\ h\ °C}\right]$$

$$Re = \frac{\rho\ v\ Di}{\mu} \tag{4.19}$$

$$Re = \frac{0.41434 \left[\frac{Kg}{m^3}\right]\ 27.36 \left[\frac{m}{seg}\right]\ 0.0704\ [m] * 3600 \left[\frac{seg}{h}\right]}{0.1088 \left[\frac{Kg}{m\ h}\right]} = 26407$$

Por lo tanto el flujo es turbulento:

$$Pr = \frac{\mu\, Cp}{k} \tag{4.20}$$

$$Pr = \frac{0.1088\ \left[\frac{Kg}{m\,h}\right]\ 0.2617\ \left[\frac{Kcal}{Kg\ °C}\right]}{0.04\ \left[\frac{Kcal}{m\,h\ °C}\right]} = 0.712$$

Según Siedere y Tate el número de Nusselt para flujo turbulento al interior de tuberías se encuentra definido por:

$$Nu = 0.027\ Re^{0.8} Pr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} \tag{4.21}$$

Siendo:

$Re =$ número de Reynolds

$Pr =$ número de Prandtl

$\mu =$ viscosidad @ T_{mh}, $\left[\frac{Kg}{m\,h}\right]$

$\mu_w =$ viscosidad @ T_w, $\left[\frac{Kg}{m\,h}\right]$

Viscosidad de los gases de escape @ T_w:

$Tw = 185.29\ [°C]$

$\mu_w = 0.0835\ \left[\frac{Kg}{m\,h}\right]$ (Anexo 6)

$$Nu = 0.027\ x\ 26407^{0.8}\ x\ 0.712^{1/3} \left(\frac{0.1088\ \left[\frac{Kg}{m\,h}\right]}{0.0835\ \left[\frac{Kg}{m\,h}\right]}\right)^{0.14} = 86.23$$

El coeficiente de convección interno según la ecuación 4.18 es:

$$hi = \frac{86.23\ x\ 0.04\ \left[\frac{Kcal}{m\ h\ °C}\right]}{0.0704\ [m]} = 49\ \left[\frac{Kcal}{h\ m^2\ °C}\right]$$

4.4.2.9 Coeficiente de transferencia de calor externo

De la teoría de ebullición nucleada descrita al final del punto 4.1.1.1.2.3 y de la ecuación 4.1 se tiene:

$$h_b = \frac{q''}{\Delta T}$$

$$h_b = \frac{13145.8\ \left[\frac{Kcal}{h\ m^2}\right]}{3\ [°C]} = 4381.93\ \left[\frac{Kcal}{h\ m^2\ °C}\right]$$

4.4.2.10 Flujo de calor crítico

De la teoría según Súber[3], el flujo de calor máximo para asegurar un régimen de ebullición nucleada es:

$$q''_{max} = \frac{\pi}{24}\rho_v^{\frac{1}{2}} h_{fg}[\sigma g(\rho_l - \rho_v)g_c]^{\frac{1}{4}} \qquad (4.22)$$

Propiedades del agua saturada @ 153.3 [psia] (Anexo 2)

$$h_{fg} = 2005052.14\left[\frac{J}{Kg}\right]$$

$$g = 9.8\ \left[\frac{m}{seg^2}\right]$$

$$g_c = 1\ \left[\frac{Kg\ m}{N\ seg^2}\right]$$

$$\rho_l = 883.87\ \left[\frac{Kg}{m^3}\right]$$

$$\rho_v = 5.39\ \left[\frac{Kg}{m^3}\right]$$

[3] Kreith; Principios de Transferencia de Calor; Pág. 660

$$\sigma = 4.17\ x\ 10^{-2}\ \left[\frac{N}{m}\right]$$

$$q"_{max} = \frac{\pi}{24}\left(5.39\ \left[\frac{Kg}{m^3}\right]\right)^{1/2} 2005052.14\left[\frac{J}{Kg}\right]\left[4.17\ x\ 10^{-2}\ \left[\frac{N}{m}\right] 9.8\ \left[\frac{m}{seg^2}\right]\left(883.87\ \left[\frac{Kg}{m^3}\right] - 5.39\ \left[\frac{Kg}{m^3}\right]\right) 1\ \left[\frac{Kg\ m}{N\ seg^2}\right]\right]^{1/4}$$

$$q"_{max} = 2663571.694\left[\frac{W}{m^2}\right]$$

$$q"_{max} = 2652358.3\left[\frac{Kcal}{h\ m^2}\right]$$

Sabiendo que:

$$q" = 13145.8\ \left[\frac{Kcal}{h\ m^2}\right]$$

$$q" < q"_{max}$$

Se confirma que el proceso se encuentra dentro de un régimen de ebullición nucleada.

4.4.2.11 Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor

$$\frac{1}{U_e} = \frac{1}{hi\frac{D_i}{D_e}} + \frac{D_e - D_i}{k_t\frac{D_i}{D_e}} + \frac{1}{h_b} \tag{4.23}$$

Se tiene:

$$h_i = 49\ \left[\frac{Kcal}{h\ m^2\ °C}\right]$$

$$h_b = 4381.93\ \left[\frac{Kcal}{h\ m^2\ °C}\right]$$

$$D_e = 0.0762\ [m]$$

$$D_i = 0.0704\ [m]$$

$$k_t = 50.6\ \left[\frac{Kcal}{mh°C}\right]$$

De la ecuación 4.23 despejando se tiene:

$$U_e = \frac{1}{\frac{1}{hi\frac{D_i}{D_e}} + \frac{D_e - D_i}{k\frac{D_i}{D_e}} + \frac{1}{h_b}}$$

$$U_e = \frac{1}{\frac{1}{49\left[\frac{Kcal}{h\ m^2\ °C}\right]\ x\ \frac{0.0704\ [m]}{0.0762\ [m]}} + \frac{0.0762\ [m] - 0.0704\ [m]}{50.6\ \left[\frac{Kcal}{mh°C}\right]\ x\ \frac{0.0704[m]}{0.0762[m]}} + \frac{1}{4381.93\ \left[\frac{Kcal}{h\ m^2\ °C}\right]}}$$

$$U_e = 40.72\ \left[\frac{Kcal}{m^2 h°C}\right]$$

4.4.2.12 Cálculo del Área Real de Transferencia de Calor

De la ecuación 4.13 se tiene:

$$A = \frac{C_{min}\ NTU}{U}$$

$C_{min} = \dot{m}_h \overline{Cp_h}$ (De la ecuación 4.7)

$$C_{min} = 17500\ \left[\frac{Kg}{h}\right] x\ 0.2617\ \left[\frac{Kcal}{Kg\ °C}\right] = 4579.75\ \left[\frac{Kcal}{h\ °C}\right]$$

$NTU = -ln(1 - \varepsilon)$ (De la ecuación 4.12)

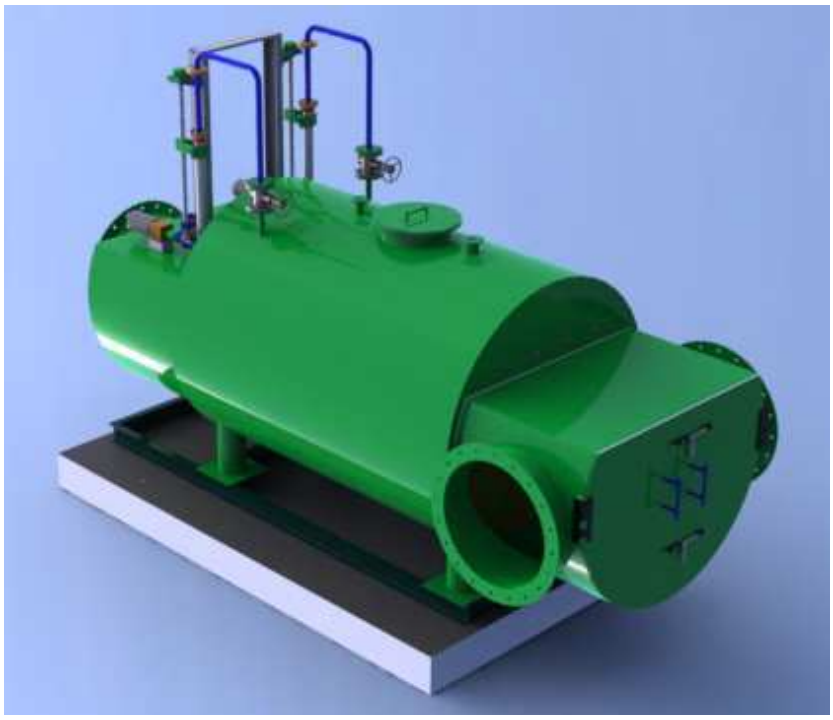
$$NTU = -ln(1 - 0.6) = 0.916$$

$$A = \frac{4579.75\ \left[\frac{Kcal}{h\ °C}\right]\ x\ \ 0.916}{40.72\ \left[\frac{Kcal}{m^2 h°C}\right]} = 103\ [m^2]$$

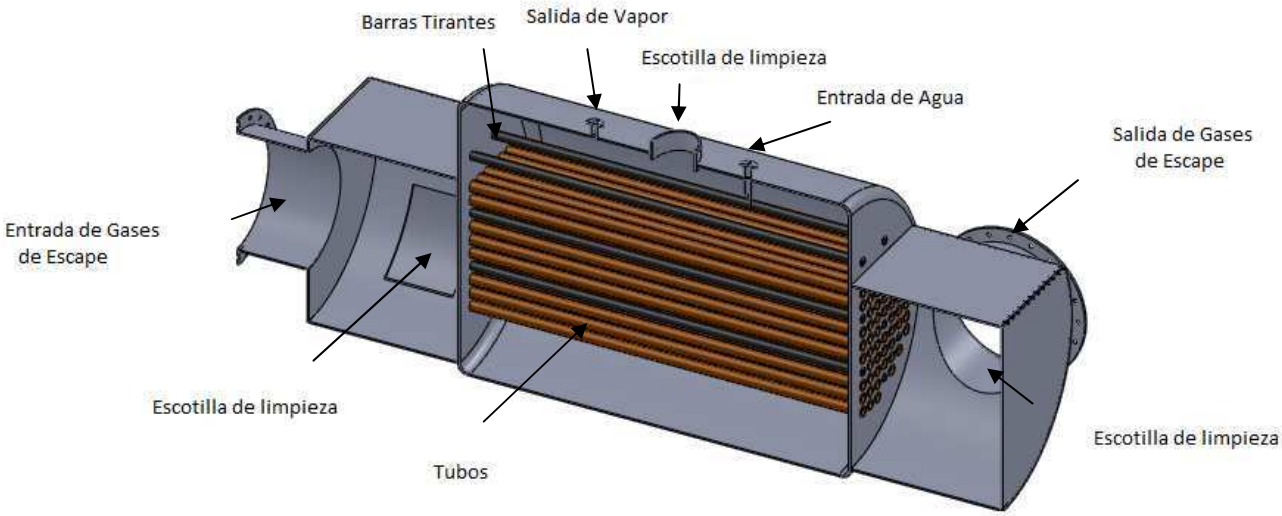
Por tanto el número de tubos reales será:

$n = \frac{A}{\pi.De.L}$ (De la ecuación 4.14)

$$n = \frac{103\ [m^2]}{\pi * 0.0762\ [m] * 2.88[m]} = 149.4 \approx 150\ \ tubos$$



a) Isometría



b) Sección completa

FIGURA 4.12 Esquema final del recuperador de calor.

4.4.3 CÁLCULO DE LA VARIACIÓN DE LA PRESIÓN EN LA CHIMENEA

De acuerdo a las normas de la ASHRAE, capítulo 30 que hace referencia a las chimeneas y ductos de ventilación, se re calcula la variación de presión en la chimenea para adaptar el recuperador de calor y no provocar caída de presión en el ducto de escape.

Los datos de los que se dispone para el cálculo son los siguientes:

$H = 6.8\ [m]$; $D = 0.9\ [m]$; $P_{bar} = 570\ [mm\ Hg]$;

$P_{est} = 2.38\ [mm\ Hg]$; $T = 200.56[°C]$; $T_a = 20\ [°C]$;

$v = 27.36\ \left[\frac{m}{s}\right]$; $Caudal = 46601.68\ \left[\frac{m^3}{h}\right] = 12.95\ \left[\frac{m^3}{seg}\right]$

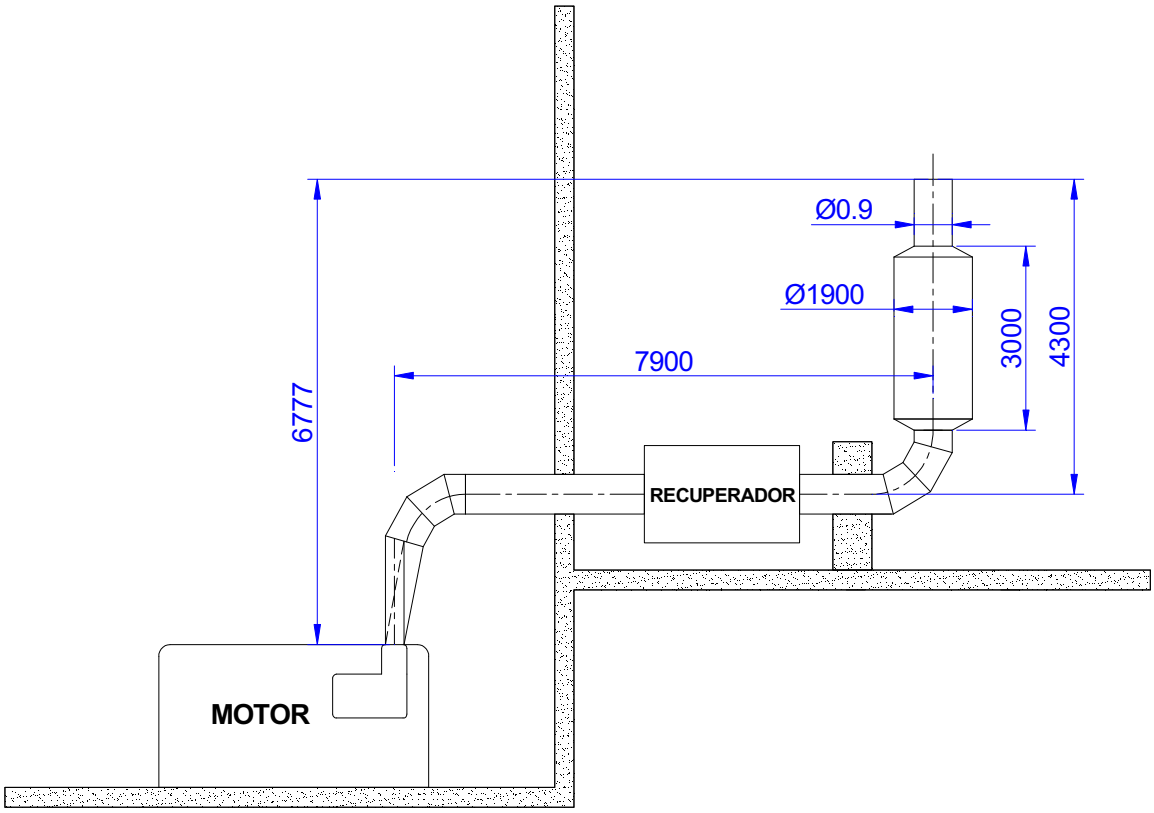


FIGURA 4.13 Esquema de disposición de tubería de escape.

La densidad media es determinada mediante la siguiente expresión[4]:

$$\rho_m = 0.00348\ x\ \frac{B}{T_m} \tag{4.24}$$

Donde:

$$T_m = \frac{200.56[°C] + 20[°C]}{2} + 273[K] = 383.28\ [K]$$

$$B = 570[mm\ Hg]\ x\ \frac{0.1333[KPa]}{1[mm\ Hg]}\ x\ \frac{1000[Pa]}{1[KPa]} = 75981\ [Pa]$$

Entonces:

$$\rho_m = 0.00348\frac{B}{Tm} = 0.00348\ x\ \frac{75981\ [Pa]}{383.28\ [K]} = 0.6898\ \left[\frac{Kg}{m^3}\right]$$

Cálculo del tiro teórico y disponible de la chimenea:

$$D_t = 0.03413\ x\ B\ x\ H\ x\left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T}\right) \tag{4.25}$$

$$D_t = 0.03413\ x\ 75981\ [Pa]\ x\ 6.8[m]\ x\ \left(\frac{1}{293\ [K]} - \frac{1}{473.56\ [K]}\right) = 22.94[Pa]$$

$$D_a = 2.38[mm\ Hg]\ x\ \frac{0.1333[KPa]}{1[mm\ Hg]}\ x\ \frac{1000[Pa]}{1[KPa]} = 317.25[Pa]$$

D_a es el tiro disponible de la chimenea, que es positivo ya que se ha podido medir una presión estática a la salida de la misma.

El tiro disponible es la presión estática definida por los requerimientos de operación del equipo como sigue:

- Tiro positivo (presión negativa de la chimenea) del equipo: D_a es positivo en la ecuación anterior, es decir $\Delta P < D_t$
- Tiro neutro del equipo: $D_a = 0$ y $\Delta P < D_t$

[4] Norma Ashrae; Pág. 30.3

- Tiro negativo (presión positiva, sobre la atmosférica, tiro forzado) del equipo: D_a es negativo, así $\Delta P = D_t - (-D_a) = D_t + D_a$ y $\Delta P > D_t$

Ahora se calcula la variación de la presión al interior de la chimenea[5]:

$$\Delta P = D_t - (-D_a) \tag{4.26}$$

$$\Delta P = 22.94[Pa] + 317.25[Pa] = 340.19[Pa]$$

Independiente del signo de D_a, ΔP es siempre positivo.

Se debe de tomar en cuenta las pérdidas de presión en la tubería, de acuerdo a la ecuación de Bernoulli, tenemos:

$$\Delta P = k\rho_m \frac{v^2}{2} \tag{4.27}$$

Primero calculamos las pérdidas por accesorios y por la fricción para lo cual:

Longitud de la tubería = 14.7 [m]

N°de codos = 4; k = 0.75

Para determinar el factor de fricción de la tubería se calcula el número de Reynolds a las condiciones dadas:

$$R_{ED} = \frac{\rho v D}{\mu} \tag{4.28}$$

Donde la viscosidad de los gases de escape correspondiente a la Temperatura media es de:

$\mu = 2.111\ x\ 10^{-5}\ \left[\frac{Kg}{m.s}\right]$ (Anexo 6)

$$R_{ED} = \frac{0.6094\ \left[\frac{Kg}{m^3}\right]\ x\ 21.87\ \left[\frac{m}{s}\right]\ x\ 0.9\ [m]}{2.111\ x\ 10^{-5}\ \left[\frac{Kg}{m.s}\right]} = 5.68205\ x10^5$$

La rugosidad correspondiente a los aceros comerciales es de:

[5] Norma Ashrae; Pág. 30.3

$\epsilon = 0.046\ [mm]$ (Anexo 12)

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{0.046[mm]}{900[mm]} = 5.1x10^{-5}$$

Entonces:

Del anexo 12, determinamos un factor de fricción de 0.0135.

$$\Delta P_{pérdidas} = \rho_m \frac{v^2}{2}\left(f\frac{L}{D} + k\right) \tag{4.29}$$

$$\Delta P_{pérdidas} = 0.6094\ \left[\frac{Kg}{m^3}\right]\left(\frac{\left(27.36\ \left[\frac{m}{s}\right]\right)^2}{2}\right)\left(0.0135\frac{14.67\ [m]}{0.9\ [m]} + 4(0.75)\right)$$

$$\Delta P_{pérdidas} = 734.5\ [Pa]$$

Al comparar los resultados entre la variación de presión y la variación de la presión debido a las pérdidas por la tubería y los accesorios, podemos darnos cuenta que la chimenea no está trabajando eficientemente.

Para aumentar la eficiencia de la chimenea, y debido a la dificultad para modificar las dimensiones de la misma ya que el espacio disponible para la instalación no lo permite, la mejor alternativa para vencer esta presión negativa es la de seleccionar un ventilador de tiro inducido para forzar la salida del flujo. Este elemento será seleccionado de acuerdo a las siguientes variables de trabajo:

Donde la diferencia de presiones que se debe vencer es:

$$\Delta P = 734.5\ [Pa] - 340.19[Pa] = 394.31\ [Pa]$$

$$\Delta P = 394.31\ [Pa]\ x\ \frac{4.015\ x\ 10^{-3}[pulg\ H_2O]}{1\ [Pa]} = 1.6\ [pulg\ H_2O]$$

El ventilador de tiro inducido se lo debe de instalar a la salida de la chimenea, esta ubicación no requiere compensación adicional del aumento de la corriente de aire por la inducción.

En la figura 4.19 se muestran curvas de un ventilador de tiro inducido que se ajusta a los datos calculados necesarios para el correcto desfogue de los gases, de esta manera el elemento seleccionado es el inductor centrífugo CASIBA VCM 22/22.

TABLA 4.2 Características del ventilador de tiro inducido seleccionado.

Presión [Pa]	400
Caudal [m^3/s]	13
RPM	650

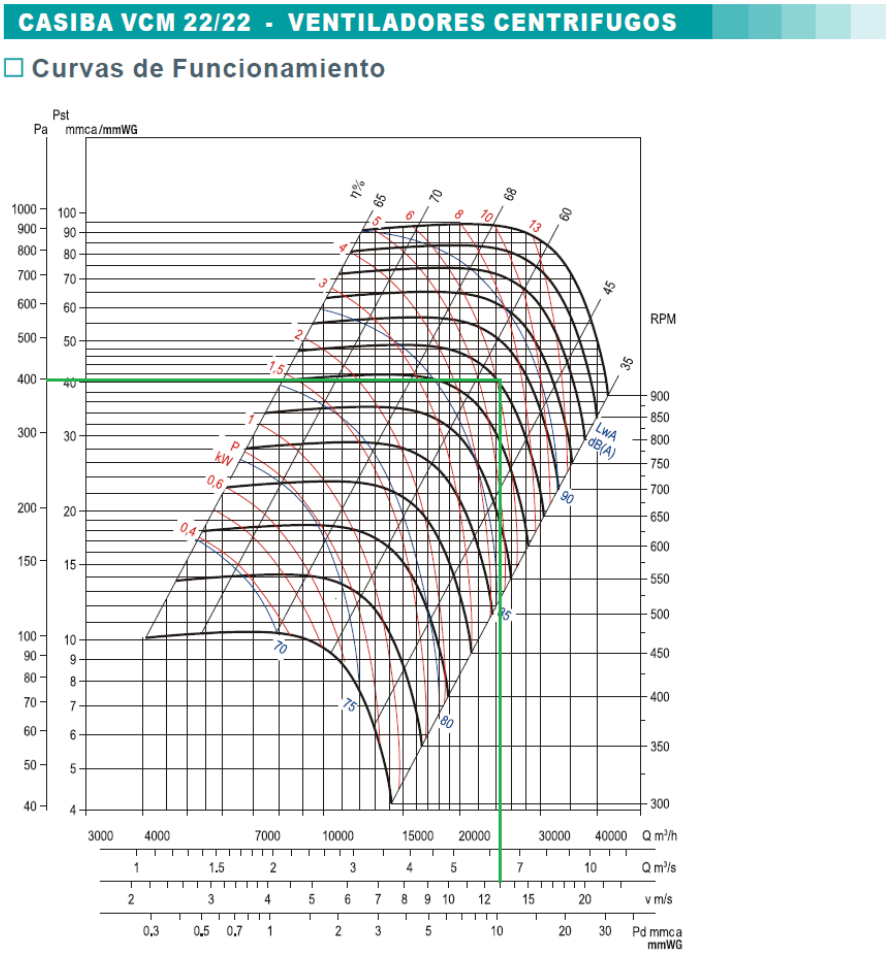


FIGURA 4.14 Curvas características del ventilador de tiro inducido.

Donde:

$H =$ Altura de la chimenea

$D =$ Diámetro de la tubería

$P_{bar} =$ Presión barométrica

$P_{est} =$ Presión estática

$T =$ Temperatura de la chimenea

$T_a =$ Temperatura ambiente

$T_m =$ Temperatura media

$v =$ Velocidad

$\dot{m} =$ Flujo másico de los gases de escape

$\rho_m =$ Densidad del gas de la chimenea

$B =$ Presión barométrica local

$D_t =$ Tiro teórico

$D_a =$ Tiro disponible

$k =$ Constantes de las pérdidas en los accesorios de la tubería

$\mu =$ Viscosidad de los gases

$\Delta P =$ Caída de presión en la chimenea

$\Delta P_{pérdidas} =$ Caída de presión por fricción

4.4.4 DIMENSIONAMIENTO DE LA CORAZA

4.4.4.1 Configuración del banco de tubos

El proceso de ebullición hace que se desprendan burbujas de vapor desde las paredes de los tubos, la separación entre los tubos debe ser la suficiente como para que las burbujas que se desprenden desde los tubos ubicados en la parte inferior, no recubran con una capa de vapor a los tubos de la parte superior, creando una barrera que disminuya la capacidad de transferencia de calor y por ende afecte a la efectividad del equipo. Una separación excesiva entre los tubos causara que las dimensiones del equipo aumenten considerablemente, mientras que una separación insuficiente generará una caída en la efectividad del equipo. Las normas TEMA recomiendan un espaciamiento mínimo de 1.25 veces el diámetro exterior de la tubería, mientras que otros autores recomiendan una distancia mínima de 1.5 veces el diámetro exterior de la tubería para procesos de evaporación.

Debido a la presencia de un mecanismo deshollinador, el arreglo escogido para el banco de tubos es el cuadrado con una distancia entre tubos mínima de 1.5 veces el diámetro de la tubería (115 mm), el mismo que facilita la limpieza de los tubos.

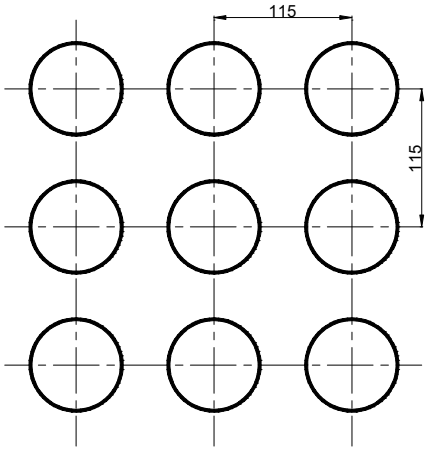


FIGURA 4.15 Arreglo del banco de tubos

Luego de establecer la disposición del banco de tubos, el diámetro interior de la coraza que contenga al banco de tubos se muestra en el plano 1.2598.201.

4.4.4.2 Cálculo del espesor de la coraza

Al calcular un recipiente cilíndrico horizontal por presión interna, es necesario recurrir al código ASME, el cual en su sección VIII, división 1, presenta todos los cálculos necesarios para el dimensionamiento. Para la carcasa se trabajara con el acero A.S.T.M. A-131.

Datos:

P = 153.3 [psia]

R = 1235.9 [mm] (Plano 1.2598.201)

E = 0.85

S = 35000 [psi]

El cálculo del espesor requerido para la coraza se encuentra regido por la siguiente expresión[6]:

$$t = \frac{P\ x\ R}{(S\ x\ E) - (0.6\ x\ P)} \tag{4.36}$$

Donde:

t = Espesor mínimo requerido

P = Presión de diseño

R = Radio interior del cilindro

E = Eficiencia de las soldaduras. El punto óptimo de eficiencia de soldaduras, por experiencia para los cuerpos cilíndricos, lo tenemos cuando E = 0.85, es

[6] Código ASME 2004; Sección VIII; División 1; Pág. 18

decir, el espesor no es muy grande y el costo del radiografiado es relativamente bajo[7].

S = Esfuerzo máximo permisible a la fluencia del material seleccionado para fabricar el recipiente a la temperatura de diseño.

$$t = \frac{153.3\ [\text{psi}]\ x\ 1235.9\ [\text{mm}]}{(35000\ [\text{psi}]\ x\ 0.85) - (0.6\ x\ 153.3\ [\text{psia}])}$$

$$t = 6.4\ [mm]$$

Si bien es verdad el espesor calculado hace referencia a los esfuerzos que ha de soportar la coraza, no se toma en cuenta factores muy importantes como son la corrosión y la erosión. Las normas TEMA, tomando en cuenta estos factores recomiendan un espesor no menor a 12.7 [mm] para diámetros de coraza entre 2057 [mm] y 2540 [mm][8], razón por la que el espesor seleccionado para este elemento es de 12.7 [mm] (1/2 in).

4.4.4.3 Barras Tirantes

Las barras tirantes son elementos que permiten mantener la integridad estructural del tanque y evitar posibles deformaciones de las paredes del mismo.

Las perforaciones requeridas para alojar el banco de tubos en el interior del tanque debilitan la estructura, razón por la cual es necesario reforzar la estructura colocando barras rígidas a lo largo del tanque, distribuidas de manera uniforme.

Existe una relación entre el diámetro de la coraza y el número y diámetro de las barras tirantes que son necesarias. Las normas TEMA presentan una tabla con número y dimensiones de barras tirantes recomendadas de acuerdo al diámetro de la coraza.

[7] Código ASME; Sección VIII; División 1; Pág. 109
[8] Normas TEMA; 8va Ed.; 1999; pg. 30.

TABLA 4.3 Barras tirantes normalizadas[9]

Nominal Shell Diameter		Tie Rod Diameter		Minimum Number of Tie Rods
6 - 15	(152-381)	3/8	(9.5)	4
16 - 27	(406-686)	3/8	(9.5)	6
28 - 33	(711-838)	1/2	(12.7)	6
34 - 48	(864-1219)	1/2	(12.7)	8
49 - 60	(1245-1524)	1/2	(12.7)	10
61-100	(1549-2540)	5/8	(15.9)	12

"Otras combinaciones de número y diámetro de la barra tirante con área de soporte equivalente se permiten, sin embargo, no se utilizan menos de cuatro barras tirantes, y no de diámetro inferior a 3 / 8" (9,5 mm)."[10]

Luego de revisar las recomendaciones de la norma, el número de barras tirantes seleccionadas es 12 con un diámetro de 5/8" (15.9 mm).

4.4.4.4 Cálculo del espesor del aislante térmico de la coraza

Para este cálculo se hacen las siguientes consideraciones:

- Condiciones de estado estable
- Temperatura de la pared igual a la del fluido caliente (183 ℃)
- Transferencia de calor unidimensional en la dirección radial
- Propiedades constantes para el aislante
- Resistencia térmica de contacto despreciable

El material escogido como aislante es una manta de fibra de vidrio con unión orgánica y recubierta exteriormente por una lámina de acero inoxidable pulido de 0.5 [mm] de espesor.

La resistencia térmica de la plancha de acero inoxidable es despreciable debido a su espesor tan delgado, más su influencia en la transferencia de calor por radiación debe ser tomada en cuenta.

[9] Normas TEMA; 8va Ed.; 1999; pg. 36.
[10] Normas TEMA; 8va Ed.; 1999; pg. 36.

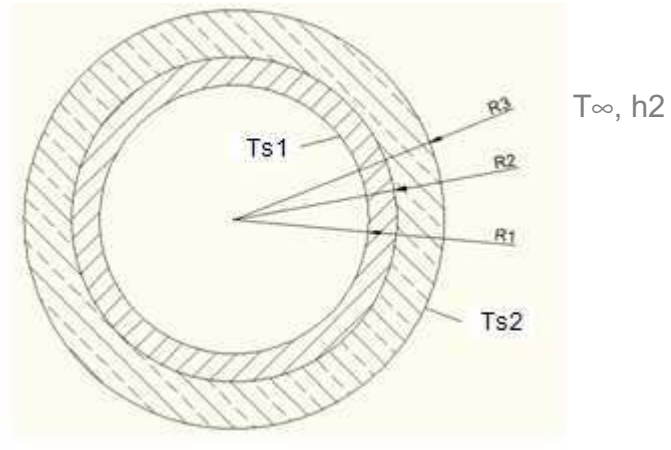


FIGURA 4.16 Esquema de ubicación del aislante

El circuito térmico resultante es:

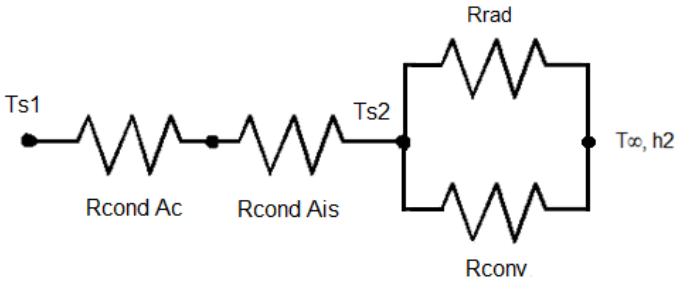


FIGURA 4.17 Circuito térmico resultante

Cuando T∞ es igual a T_{alr} se puede combinar las resistencias térmicas de convección y radiación en una sola resistencia efectiva, así el circuito térmico sería:

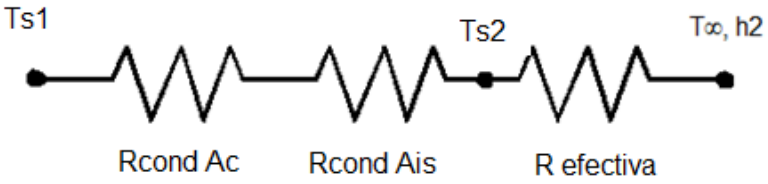


FIGURA 4.18 Circuito térmico reducido

Para poder encontrar las dimensiones del aislante térmico, es imperativo asumir una temperatura superficial externa (T_{s2}) y un espesor de aislante, para luego de un proceso iterativo llegar a obtener los valores finales de estos parámetros.

Para el inicio de la iteración se asume:

$T_{s2} = 70\ [°C]$
$R_3 = 1.30\ [m]$

La temperatura asumida se fundamenta en mediciones realizadas a la coraza de los calderos que actualmente se encuentran en funcionamiento en la planta, los valores obtenidos de estas mediciones oscilan entre los 50 ℃ y 80 ℃.

La pérdida de calor a través de la coraza queda definida por la siguiente ecuación:

$$q = (T_{s2} - T_\infty)A.h_{cr} = (T_{s2} - T_\infty)(2\pi R_3 L)h_{cr}$$
$$h_{cr} = h_{conv} + h_r$$
$$h_r = \varepsilon\sigma(T_{s2} + T_{alr})\left({T_{s2}}^2 + {T_{alr}}^2\right)$$

Donde:

$T_{s1} = 183\ [°C] = 456\ [K]$
$T_{s2} = 70\ [°C] = 343\ [K]$
$T_\infty = T_{alr} = 20\ [°C] = 293\ [K]$
$h_{conv} = 25\ \left[\frac{W}{m^2K}\right]$ [11]
$\varepsilon = 0.17$
$\sigma = 5.67\ x\ 10^{-8}\ \left[\frac{W}{m^2K^4}\right]$
$L = 2.88\ [m]$
$h_r = 0.17 * 5.67\ x\ 10^{-8}\ \left[\frac{W}{m^2K^4}\right](343\ [K] + 293\ [K])(343\ [K]^2 + 293\ [K]^2)$
$h_r = 1.25\left[\frac{W}{m^2K}\right]$

[11] Fundamentos de transferencia de calor; Frank P. Incropera; Pag. 8

$$h_{cr} = 25\left[\frac{W}{m^2K}\right] + 1.25\left[\frac{W}{m^2K}\right] = 26.25\left[\frac{W}{m^2K}\right]$$

$$q = (343[K] - 293[K])(2\pi * 1.3[m] * 2.88\,[m]) * 26.25\left[\frac{W}{m^2K}\right]$$

$$q = 30872.7\,[W]$$

Según el esquema del circuito térmico mostrado en la figura 4.18, la pérdida de calor queda establecida por la siguiente ecuación:

$$q = \frac{T_{s1} - T_\infty}{\sum R}$$

$$\sum R = R_{cond\ ac} + R_{cond\ ais} + R_{efectiva}$$

$$\sum R = \frac{Ln(R_2/R_1)}{2\pi L K_{ac}} + \frac{Ln(R_3/R_2)}{2\pi L K_{ais}} + \left(\frac{1}{\frac{1}{2\pi R_3 L h_{conv}} + \frac{1}{2\pi R_3 L h_r}}\right)$$

$$\sum R = \frac{1}{2\pi L}\left(\frac{Ln(R_2/R_1)}{K_{ac}} + \frac{Ln(R_3/R_2)}{K_{ais}} + \frac{1}{R_3 h_{cr}}\right)$$

Donde:

$R_1 = 1.237[m]$

$R_2 = 1.25[m]$

$R_3 = 1.30[m]$

$L = 2.88[m]$

$K_{ac} = 51.9\left[\frac{W}{mK}\right]$

$K_{ais} = 0.046\left[\frac{W}{mK}\right]$

$h_{cr} = 26.25\left[\frac{W}{m^2K}\right]$

$$\sum R = \frac{1}{2\pi * 2.88[m]}\left(\frac{Ln(1.25[m]/1.237[m])}{51.9\left[\frac{W}{mK}\right]} + \frac{Ln(1.30[m]/1.25[m])}{0.046\left[\frac{W}{mK}\right]} + \frac{1}{1.30 * 26.25\left[\frac{W}{m^2K}\right]}\right)$$

$$\sum R = 0.049\left[\frac{K}{W}\right]$$

$$q = \frac{456[K] - 293\ [K]}{0.049\left[\frac{K}{W}\right]} = 3343.7[W]$$

Como se observa, el valor de la perdida de calor no es el mismo, ahora se procede a la comprobación de la temperatura asumida T_{s2}.

Del circuito térmico mostrado en la figura 4.18 se obtiene:

$$q = \frac{T_{s1} - T_{s2}}{R_{cond\ ac} + R_{cond\ ais}} = \frac{T_{s1} - T_{s2}}{\frac{Ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2\pi L K_{ac}} + \frac{Ln\left(\frac{R_3}{R_2}\right)}{2\pi L K_{ais}}}$$

De donde resolviendo para T_{s2} tenemos:

$$T_{s2} = T_{s1} - q\left(\frac{Ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2\pi L K_{ac}} + \frac{Ln\left(\frac{R_3}{R_2}\right)}{2\pi L K_{ais}}\right)$$

$$T_{s2} = 456\ [K] - 2762.7[W]\left(\frac{Ln(1.03[m]/0.91[m])}{2\pi * 2.88[m] * 51.9\left[\frac{W}{mK}\right]} + \frac{Ln(1.08[m]/1.03[m])}{2\pi * 2.88[m] * 0.046\left[\frac{W}{mK}\right]}\right)$$

$$T_{s2} = 298.4[K]$$

Siendo:

$A =$ Área de transferencia de calor

$\varepsilon =$ Emisividad

$h_{conv} =$ Coeficiente de transferencia de calor por convección

$h_r =$ Coeficiente de transferencia de calor por radiación

$h_{cr} =$ Coeficiente de transferencia de calor efectivo

$K_{ac} =$ Conductividad térmica de acero

$K_{ais} =$ Conductividad térmica del aislante

$q =$ Calor perdido por la coraza

$L =$ Longitud

$\sigma =$ Constante de Stefan-Boltzmann

Como era de esperarse, el valor obtenido es muy diferente al asumido en un principio.

Se debe analizar qué parámetro es el que será optimizado en este cálculo, si nos enfocamos en reducir al máximo la pérdida de calor, el espesor del aislante se incrementará de manera significativa, mientras que si tratamos de reducir la cantidad de aislante, la pérdida de calor ocasionará una disminución de la efectividad del recuperador y por ende representará una pérdida para la planta.

Para el presente cálculo se fijará el espesor del aislante en 5 [cm] y se procederá a realizar la iteración en función de la temperatura T_{s2}, posteriormente se analizará qué porcentaje de calor se pierde en base al calor requerido para la generación del vapor y se establecerá si es factible o no lo asumido.

A continuación se muestra una tabla de resumen de la iteración realizada:

TABLA 4.4 Resultado de la iteración

T_{s2} Asumida [K]	**R_3 [m]**	**q [W]**	**T_{s2} Calculado [K]**
343	1,3	25650,48	298,44
320		16585,4	298,44
309		9805,7	298,45
303		6121,2	298,46
300		3669,8	298,46
299		3048,74	298,46
298,46		3302,4	298,46

Del cálculo anterior se establece que para un espesor de aislante de 5 [cm] la pérdida de calor es de 3302,4 [W]. En el punto 4.4.2.2 se estableció que el calor requerido para la generación de vapor es 1098461.408 [Btu/h] equivalente a 1274215.23 [W], por lo que el porcentaje de pérdida de calor en base a este dato es de 0.26 %, valor que asegura la efectividad del caldero.

4.4.5 ACCESORIOS

Después de considerar los parámetros tanto de seguridad como de funcionabilidad se ha llegado a establecer la necesidad de la utilización de ciertos accesorios que garanticen la integridad del equipo así como de las instalaciones donde este ha de ser ubicado.

En las siguientes tablas se detallan todos los elementos que son necesarios para el correcto funcionamiento del equipo. La disposición de todos los accesorios de las TABLAS 4.5 y 4.6 se observan en los planos 1.2598.AC001 y 1.2598.AC002.

TABLA 4.5 Listado de válvulas del recuperador

Ítem	Símbolo	Descripción de la válvula
1	V-1	Válvula de cierre principal vapor 2" x PN16, T/ ángulo, Bridada
2	V-2	Válvula check principal de vapor de 2"x PN16, Bridada
3	V-3 / 4	Válvula seguridad No 1 -2 de 1" x 175 psi
4	V-5	Válvula Raíz de seguridad 1 1/2" PN 16, Bridada
5	V-6	Válvula seguridad principal de 1 1/2" X 175 psi, Bridada
6	V-7	Válvula cierre agua de alimentación 2" X 250 psi
7	V-8	Válvula Check agua alimentación 3/4" X 250 psi
8	V-9	Válvula raíz de cierre de agua de alimentación 3/4"
9	V-10/11	Válvula aviso de nivel bajo/alto 1 1/2 " x 250 psi, Mc#150
10	V-12/13	Válvula aviso de nivel bajo/alto 1 1/2 " x 250 psi, Mc#150
11	V-14/15	Válvula raíz regulador de agua alimentación 1 1/2 "X250 psi
12	V-16/17	Válvula Purga 1 y 2 - 1 1/2 "X 250 psi
13	V-18	Válvula toma muestras 3/4 " x 250 psi
14	V-19/20/21	Válvula raíz de regulador de agua alim. 1 1/2 " x 250 psi
15	V-22/23/24	Válvula derivación del tanque de mezcla 1 1/2" x 250 psi
16	V-25	Válvula de raíz para tanque de medición 1 1/2" x 250 psi
17	V-26	Válvula drenaje del tanque de medición 3/4" x 250 psi
18	V-27/28	Válvula de raíz para soplador de hollín 1 1/2 " x 250 psi

Ítem	Símbolo	Descripción de la válvula
19	V-29/30	Válvula de drenaje del visor nivel de agua 3/4 " x 250 psi
20	V-31/32	Válvula drenaje de nivel bajo/alto 1'' x 250 psi, Mc#150
21	V-33/34	Válvula drenaje de nivel bajo/alto 1'' x 250 psi, Mc#150
22	V-35/36	Válvula de drenaje p/regulador de flujo de agua 1" x 250 psi
23	V-37/38	Válvula raíz del visor nivel bajo / alto de agua 3/4 " 250 psi
24	V-39	Válvula Drenaje visor nivel bajo /alto de agua 3/4 " 250 psi
25	V-40	Válvula de raíz para manómetro 1/2 x 250 psi
26	V-41	Válvula de respiradero de aire 3/4" x 250 psi

TABLA 4.6 Listado de accesorios del recuperador

Ítem	Símbolo	Descripción del elemento
1	M-1	Indicador de nivel de agua 1/2 X 200 psi con válvulas
2	M-2	Manómetro Ac. Inox. cart.8", 0 - 250 psi, toma 1/2"
3	M-3/4	Switch de nivel alto / bajo (Mc. Donnell № 150)
6	M-5	Regulador de flujo de agua 2"
7	M-6	Silenciador salida vapor 1 1/2
8	M-7	Tolva de medición de químicos - Toma 1" soldable
9	M-8	Tanque de mezcla de químicos - Toma 1" soldable

TABLA 4.7 Listado de equipos auxiliares y materiales del recuperador

Ítem	Descripción
1	Tablero eléctrico de control y seguridades
2	Control de entrada agua al recuperador de calor 1"
3	Moto-reductor eje recto 0,90 kw, 60 Hz, Trifásico 220 V, 60 rpm, con acoples Ø32 mm

Ítem	Descripción
4	Inversor de giro, Juego de 2 piñones cónicos, base - soportes - ejes y chumaceras, tornillo sin fin Ø30 mm con tuerca y apoyos.
5	Soplador de vapor para limpieza de hollín, Soportes, tubos guías , cuerpos de prensaestopas (2), corredera de flauta de soplado, otros
6	Switch de final de carrera alto / bajo del soplador de vapor
7	Panel eléctrico del sistema de limpieza de hollín
8	Tuberías A53, C-40 y accesorios para: agua y vapor en Ø de 1/2 (1), 3/4 (3), 1 (2), 1 1/2 (3) ,y 2" (2).
9	Plancha Ac. Inox. Brillante 0,5 X1220x2440 mm
10	Lana de vidrio 2"x1x1 m², alambre, soportes, otros
11	Pintura thermaline 4700 aluminio 649C, alta temperatura, exteriores.

4.4.6 EQUIPOS AUXILIARES

4.4.6.1 Control de nivel de agua

El control del nivel de agua es fundamental para el normal funcionamiento del equipo, la falta de líquido en la cámara ocasionaría que parte de los tubos queden expuestos causando un rápido deterioro de los mismos a la vez que el rendimiento y por ende la producción de vapor se vería seriamente afectada.

El control de nivel de agua seleccionado para el equipo es el 150E McDonnell, el mismo que puede ser utilizado en equipos con presiones de hasta 150 psi y cualquier capacidad de producción de vapor.

Este controlador es accionado con la ayuda de un flotador, el cual se encarga de activar o desactivar un contacto cuando el nivel del agua en la caldera se eleva ó desciende.

FIGURA 4.19 Control de nivel de agua baja “150E McDonell”

La flecha que se encuentra marcada en el equipo sirve como referencia para la instalación del mismo, el nivel de encendido de la bomba se encuentra 1 ½ in por encima de la flecha. Para la instalación colóquese el control de nivel de modo que la flecha de referencia se encuentre 1 ½ in debajo del nivel de agua normal de la caldera. El nivel de encendido de la bomba viene establecido de fábrica y se encuentra a ¾ in debajo del nivel de apagado. Un esquema del montaje del control se muestra a continuación.

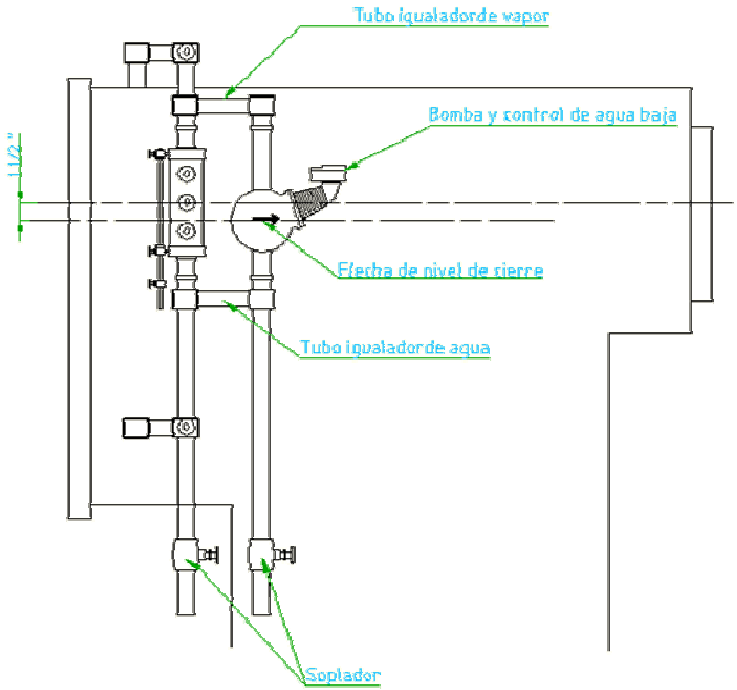


FIGURA 4.20 Esquema de instalación del control de nivel.

4.4.6.1.1 Conexiones eléctricas

El panel eléctrico de de este equipo se encuentra dividido en dos partes de tal manera que se separan las terminales de los interruptores.

La sección principal del panel se sella en la fábrica como medida de seguridad contra la manipulación.

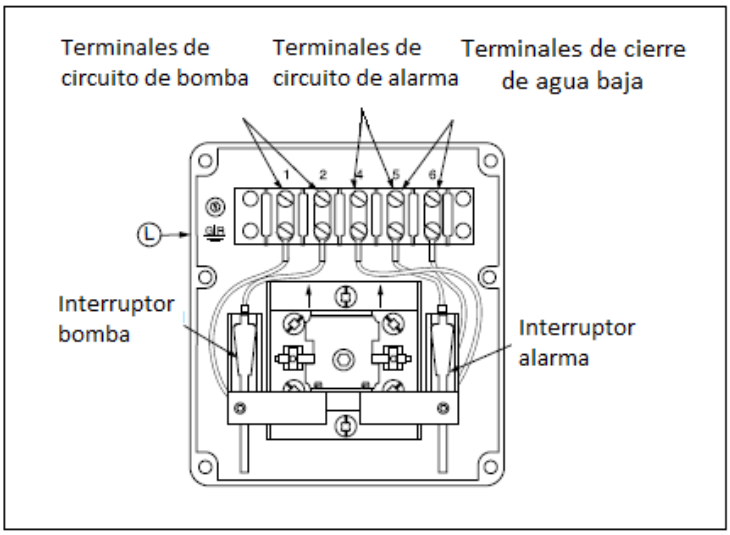


FIGURA 4.21 Esquema de disposición de terminales

Los circuitos de control pueden ser divididos en tres partes bien definidas de tal manera que se pueda manipular de manera independiente, estas partes se muestran a continuación.

4.4.6.1.1.1 Circuito de control de la bomba

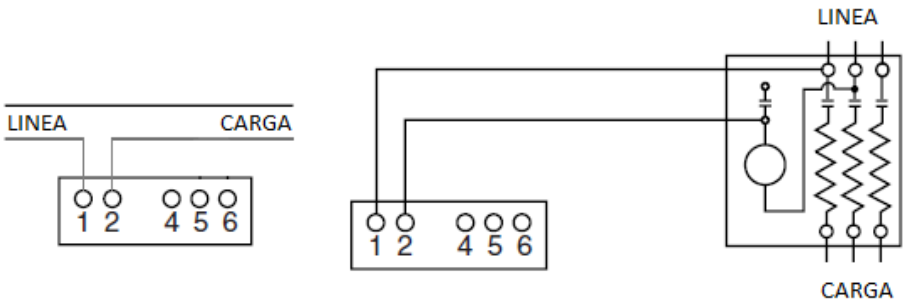


FIGURA 4.22 Esquema del circuito de control de la bomba

4.4.6.1.1.2 Circuito de control de cierre de agua baja

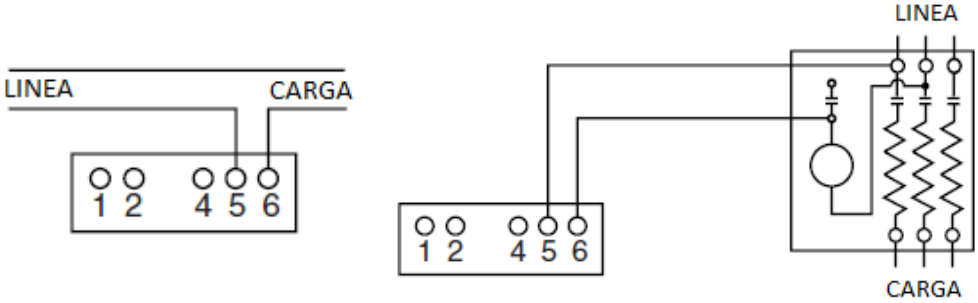


FIGURA 4.23 Esquema del circuito de control de cierre de agua baja

4.4.6.1.1.3 Circuito de alarma

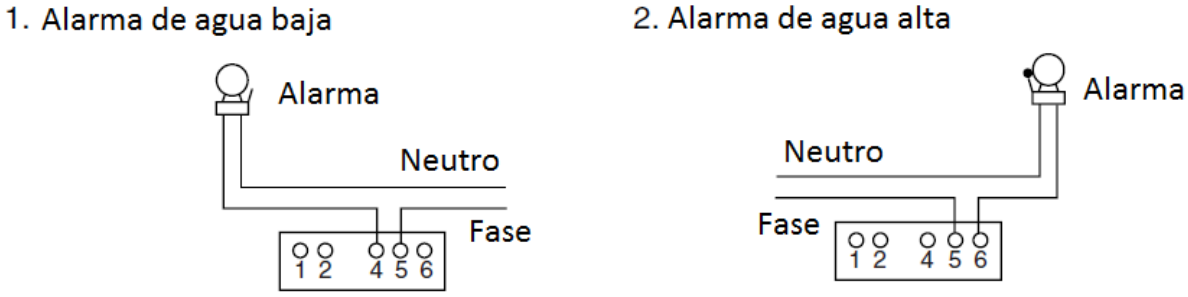


FIGURA 4.24 Esquema del circuito de cierre de agua baja

4.4.6.1.1.4 Circuito Combinado

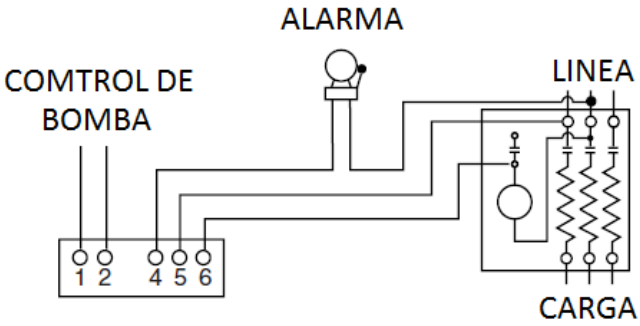


FIGURA 4.25 Esquema del circuito combinado

4.4.6.1.2 Operación esquemática del interruptor

FIGURA 4.26 Bomba de alimentación de la caldera desconectada, alarma desconectada

FIGURA 4.27 Bomba de alimentación de la caldera conectada, alarma desconectada

FIGURA 4.28 Bomba de alimentación de la caldera conectada, alarma conectada

Para que no existan inconvenientes en este tipo de conexiones, se debe controlar que el terminal número cinco siempre corresponda a una fase.

4.4.6.2 Deshollinador

Este dispositivo permite una limpieza periódica del interior de los tubos mediante la inyección de vapor de la red al interior del banco de tubos, esta operación retira los residuos de hollín que se adhieren a las paredes internas de los tubos y reduce al mínimo las incrustaciones que puedan generarse, optimizando así el funcionamiento del equipo.

Un temporizador programado para accionar un servomotor y una electroválvula cada 6 horas de funcionamiento es quien controla el mecanismo de limpieza.

La flauta que inyecta el vapor a los tubos sube y baja al accionarse el servomotor, una vez completado un ciclo el motor se apaga y el temporizador se reinicia.

La siguiente figura muestra un esquema de este equipo.

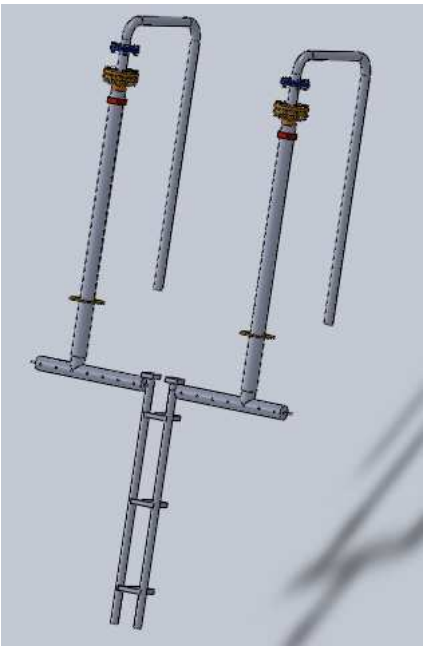
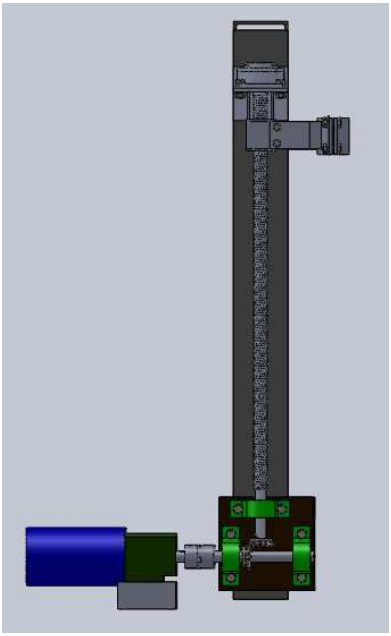
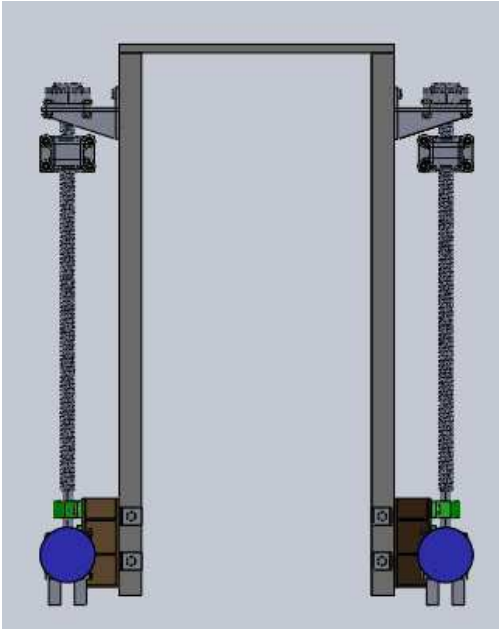
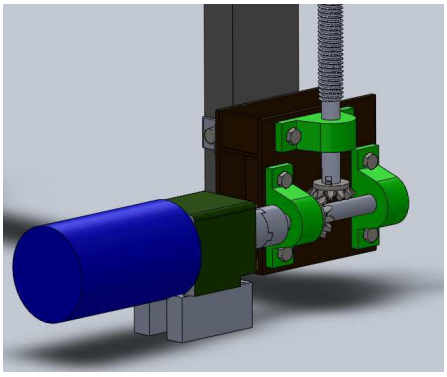


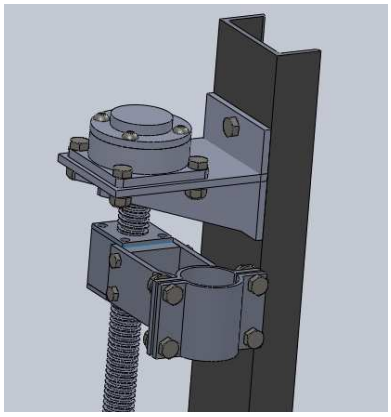
FIGURA 4.29 Sistema de tuberías del deshollinador





(a) (b)





(c) (d)

FIGURA 4.30 Sistema de Sujeción y elevación del deshollinador

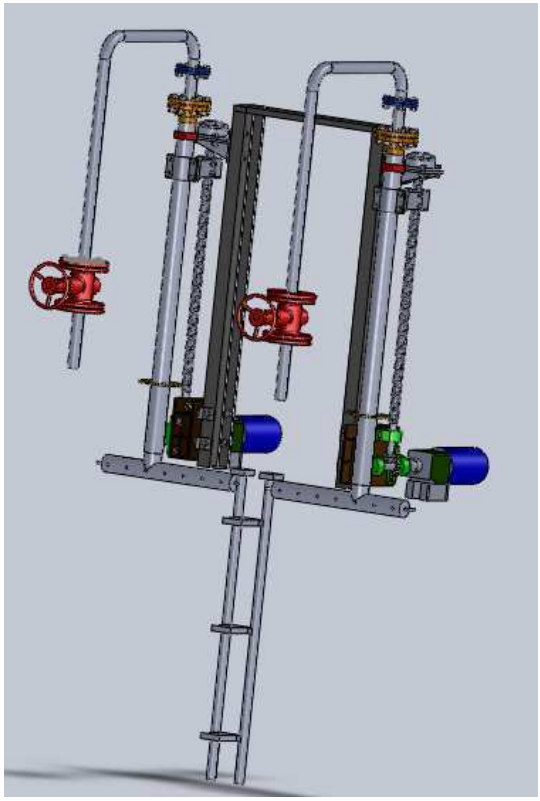


FIGURA 4.31 Deshollinador completo

CAPITULO 5
DESARROLLO DE PROGRAMA DE CÁLCULO

5.1 SECUENCIA LÓGICA DE CÁLCULO

El establecer un orden lógico de cálculo mediante diagramas de flujo, permite organizar la información de tal manera que el resultado es un algoritmo no muy complejo, el mismo que puede ser fácilmente trasladado a cualquier lenguaje de programación.

Dentro de los cálculos presentes en el diseño, existen ciertos parámetros que requieren de un proceso iterativo para llegar a la obtención de un resultado certero, el mismo que servirá como dato de entrada para un cálculo posterior.

La estructura del programa debe estar orientada a la obtención de un proceso que tenga los cálculos necesarios y que muestre los resultados fundamentales para el diseñador. Además de esto se deben seleccionar los datos de entrada justos y necesarios tratando de facilitar el manejo del programa.

5.1.1 SELECCIÓN DE DATOS DE ENTRADA

Como se mostró en el capítulo anterior, el proceso de cálculo tiene una secuencia definida, lo que permite dividirlo en varios bloques de tal manera que la identificación de los datos de entrada se torne sencilla y se tenga menos probabilidad de caer en redundancias.

Cálculo del calor requerido para la generación de vapor:

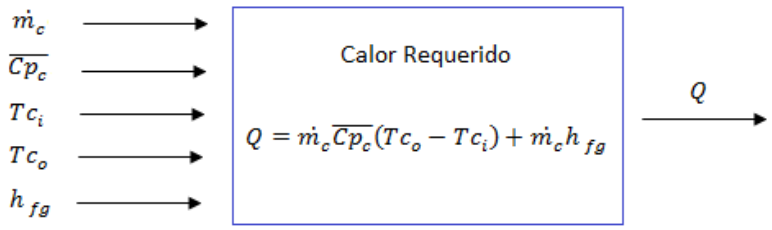


FIGURA 5.1 Bloque de cálculo del calor requerido para la generación de vapor.

Cálculo de la temperatura de salida de los gases de escape:

Para este cálculo es necesaria una iteración, de manera que se tome como dato de entrada una temperatura asumida y luego del proceso de cálculo se la confirme o se la corrija.

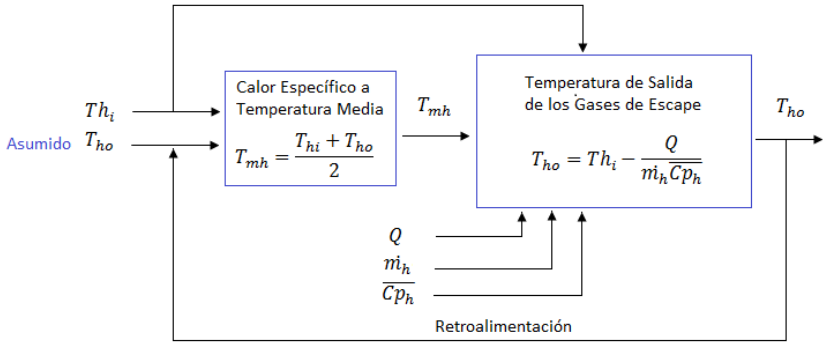


FIGURA 5.2 Bloque de cálculo iterativo de la temperatura de salida de los gases de escape.

Cálculo del área de transferencia de calor:

Para determinar el área de transferencia de calor, es necesario plantearse como dato de entrada un valor aceptable de efectividad para el equipo, así como un valor para el coeficiente global de transferencia de calor aproximado, basado en pruebas realizadas a equipos similares.

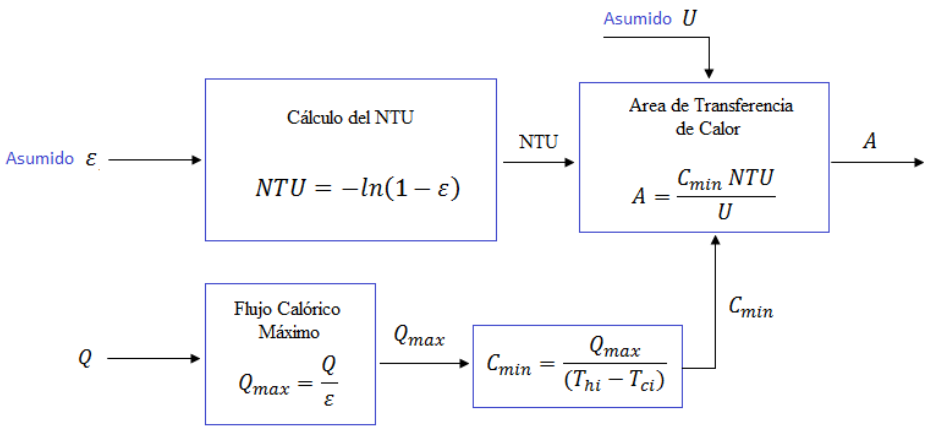


FIGURA 5.3 Bloque de cálculo del área de transferencia de calor.

Cálculo del número de tubos:

Una vez obtenido el valor final del área de transferencia, es fácil establecer el número de tubos necesarios, el bloque de cálculo para esto se muestra a continuación.

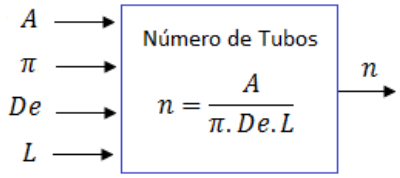


FIGURA 5.4 Bloque de cálculo del número de tubos.

Cálculo de la temperatura de la pared:

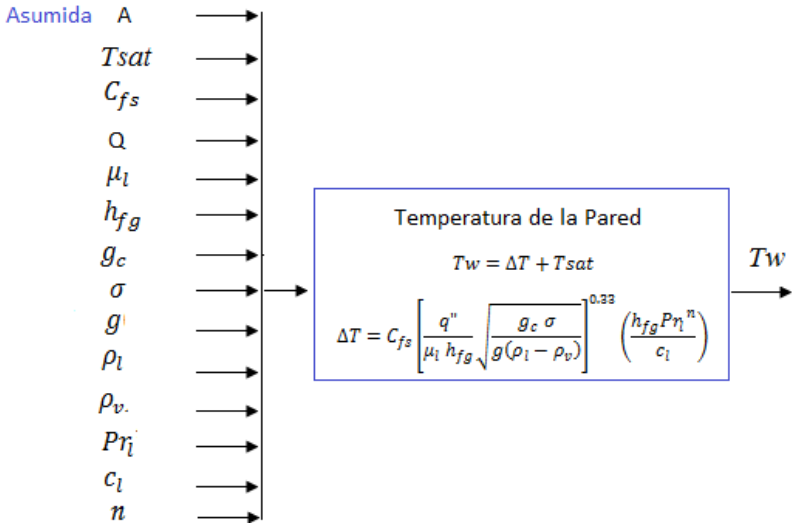


FIGURA 5.5 Bloque de cálculo de la temperatura de la pared.

Cálculo del coeficiente de transferencia de calor interno:

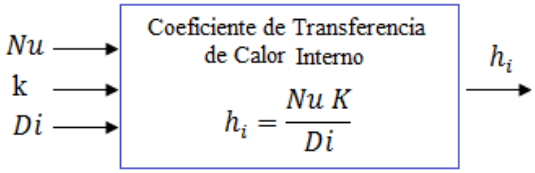


FIGURA 5.6 Bloque de cálculo del coeficiente de transferencia de calor interno.

Cálculo del coeficiente de transferencia de calor externo:

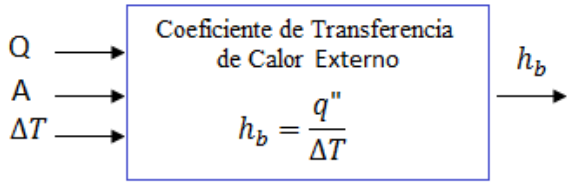


FIGURA 5.7 Bloque de cálculo del coeficiente de transferencia de calor externo.

Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor:

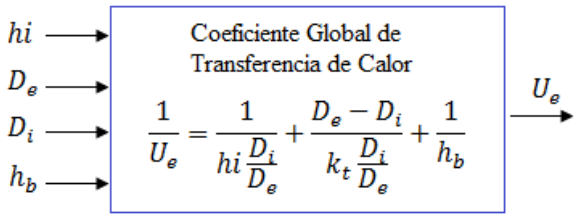


FIGURA 5.8 Bloque de cálculo del coeficiente global de transferencia de calor.

Cálculo del área de transferencia de calor real:

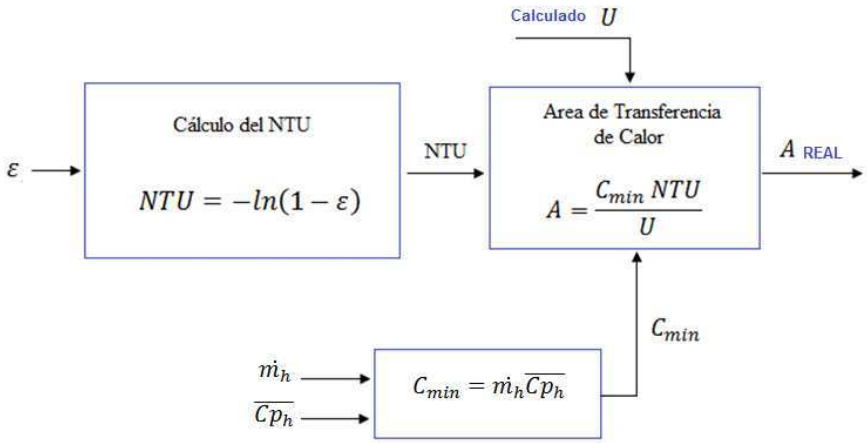


FIGURA 5.9 Bloque de cálculo del área de transferencia de calor real.

Siendo:

A = área de transferencia de calor

C_{fs} = constante empírica que depende de la naturaleza de la superficie de calentamiento-fluido, cuyo valor varia de un sistema a otro.

$\overline{Cp_h}$ = calor específico medio del fluido Caliente, $\left[\frac{Kcal}{Kg°C}\right]$

$\overline{Cp_c}$ = calor específico medio del fluido frío, $\left[\frac{Kcal}{Kg°C}\right]$

c_l = calor específico de líquido saturado, $\left[\frac{J}{Kg\ °C}\right]$

De = diámetro exterior de la tubería, $[m]$

Di = diámetro interior de la tubería, $[m]$

g = aceleración de la gravedad, $\left[\frac{m}{seg^2}\right]$

g_c = factor de conversión de unidades = 1 $\left[\frac{Kg\ m}{N\ seg^2}\right]$

h_{fg} = calor latente de vaporización, $\left[\frac{Kcal}{Kg}\right]$

h_i = coeficiente de convección interno

h_e = coeficiente de transferencia de calor externo

k = coeficiente de conductividad térmica del fluido caliente

k_t = coeficiente de conductividad térmica de la tubería

L = longitud de la tubería, [m]

$\dot{m}_h$ = flujo másico del fluido caliente, $\left[\frac{Kg}{h}\right]$

$\dot{m}_c$ = flujo másico del fluido frío, $\left[\frac{Kg}{h}\right]$

$Nu =$ número de Nusselt

$n =$ 1.0 para el agua, 1.7 para otros líquidos

$Pr =$ número de Prandtl

$Pr_l =$ número de Prandtl del líquido saturado

$Q_h =$ calor que cede el fluido caliente, $\left[\frac{Kcal}{Kg}\right]$

$Q_c =$ calor que recibe el fluido frío, $\left[\frac{Kcal}{Kg}\right]$

$q" =$ flujo calórico, $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

$Re =$ número de Reynolds

$T_{co} =$ temperatura de salida del fluido Caliente,$[°C]$

$T_{ci} =$ temperatura de entrada del fluido caliente,$[°C]$

$T_{ho} =$ temperatura de salida del fluido frío,$[°C]$

$T_{hi} =$ temperatura de entrada del fluido frío,$[°C]$

$U_e =$ coeficiente global de transferencia de calor, $\left[\frac{Kg}{m\ seg}\right]$

$\mu_l =$ viscosidad del líquido, $\left[\frac{Kg}{m\ seg}\right]$

$\rho_l =$ densidad de líquido saturado, $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

$\rho_v =$ densidad de vapor saturado, $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

$\sigma =$ tensión superficial en la interfaz líquido-vapor, $\left[\frac{N}{m}\right]$

$\mu =$ viscosidad de los gases de escape @ T_{mh}, $\left[\frac{Kg}{m\ h}\right]$

$\mu_w =$ viscosidad @ T_w, $\left[\frac{Kg}{m\ h}\right]$

Del análisis anterior se obtienen los parámetros fundamentales necesarios para el cálculo del recuperador de calor. Cabe señalar que varios de estos datos poseen fórmulas para su obtención, lo cual permite automatizar su cálculo en función de la temperatura a la que se está trabajando. En la tabla 5.1 se detallan las variables que pueden ser calculadas en función de la temperatura y que por tanto no se consideran como variables a ingresar.

TABLA 5.1 Variables calculables

Variable	**Rango de temperatura en el que la ecuación es válida [℃]**
Calor específico de los gases de escape	100 - 1200
Viscosidad de los gases de escape	100 - 1200
Conductividad térmica de los gases de escape	0 - 1927
Densidad de los gases de escape	0 - 2000

Otros valores correspondientes a constantes físicas y otros parámetros que para el cálculo se consideraron como constantes son:

$C_{fs} =$ constante empírica que depende de la naturaleza de la superficie de calentamiento-fluido, cuyo valor varia de un sistema a otro.

$De =$ diámetro exterior de la tubería, $[m]$

$Di =$ diámetro interior de la tubería, $[m]$

$g =$ aceleración de la gravedad, $\left[\frac{m}{seg^2}\right]$

g_c = factor de conversión de unidades = $1\ \left[\frac{Kg\ m}{N\ seg^2}\right]$

k_t = coeficiente de conductividad térmica de la tubería

n = 1.0 para el agua, 1.7 para otros líquidos

Por tanto las variables de que necesitan ser ingresadas en el programa de cálculo son:

$\overline{Cp_c}$ = calor específico medio del fluido frío, $\left[\frac{Kcal}{Kg°C}\right]$

c_l = calor específico de líquido saturado, $\left[\frac{J}{Kg\ °C}\right]$

h_{fg} = calor latente de vaporización, $\left[\frac{Kcal}{Kg}\right]$

L = longitud de la tubería, [m]

$\dot{m}_h$ = flujo másico del fluido caliente, $\left[\frac{Kg}{h}\right]$

$\dot{m}_c$ = flujo másico del fluido frío, $\left[\frac{Kg}{h}\right]$

Pr_l = número de Prandtl del líquido saturado

T_{ci} = temperatura de entrada del fluido caliente, $[°C]$

T_{ho} = temperatura de salida del fluido frío, $[°C]$

T_{hi} = temperatura de entrada del fluido frío, $[°C]$

μ_l = viscosidad del líquido, $\left[\frac{Kg}{m\ seg}\right]$

ρ_l = densidad de líquido saturado, $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

ρ_v = densidad de vapor saturado, $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

σ = tensión superficial en la interfaz líquido-vapor, $\left[\frac{N}{m}\right]$

5.1.2 GENERACIÓN DEL PROGRAMA

Luego del análisis anterior se procede a la elaboración del programa de cálculo que permita encontrar todos los parámetros requeridos en el diseño.

Las líneas de programación se muestran en el Anexo 8, obteniendo como resultado el programa de cálculo cuya interfaz se muestra a continuación.

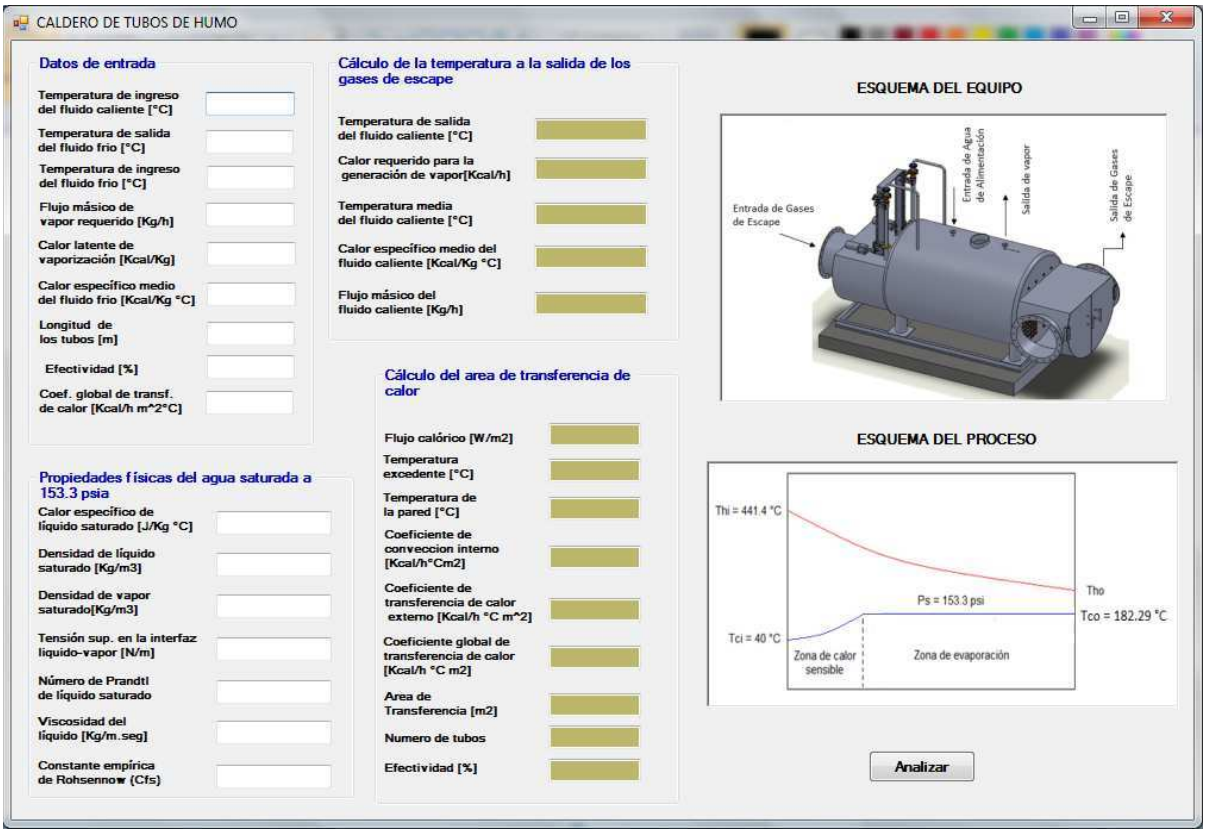


FIGURA 5.10 Interfaz del programa de cálculo.

CAPITULO 6
SELECCIÓN DE MATERIALES Y ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO

La parte más importante de un proyecto de esta envergadura es la de realizar un análisis económico, ya que el consumo de combustible de la caldera representa un gasto muy elevado, por tal razón se busca eliminar el mismo, justificando con este proyecto el beneficio que se obtiene al emplear los gases de combustión como una fuente de energía.

Tomando en cuenta que el equipo requiere una cantidad numerosa de materiales para su construcción, y que los mismos deben ser seleccionados de acuerdo a las propiedades necesitadas y también de acuerdo a la disponibilidad de los mismos en el mercado, en este capítulo se realiza un estudio de los materiales a utilizarse y el costo de los mismos.

Al aplicar ingeniería económica en el proyecto, se llega a demostrar cuan viable es el mismo, tomando en cuenta todas las etapas que se requiere para realizarlo como por ejemplo la construcción del equipo y sus respectivos materiales, obteniéndose al final el costo o inversión total.

6.1 SELECCIÓN DE MATERIALES

Los materiales que se deben utilizar en la construcción de cambiadores de calor se realizarán conjuntamente con el Ingeniero Mecánico (Diseñador del equipo) y el Ingeniero de Proceso. Los materiales que se elijan, deberán resistir los efectos de la corrosión y deberán tener la suficiente resistencia para soportar la temperatura y presión de diseño, teniendo además que conducir a un diseño práctico. Una buena selección de materiales, asegurará bajos costos de mantenimiento.

Las condiciones de operación y del medio en el que se encuentra el recuperador de calor, ya expuestas en el capítulo anterior, permite determinar

que los materiales a utilizarse para la construcción del equipo deben tener las siguientes características: buenas propiedades mecánicas a la temperatura de trabajo, dureza, tenacidad; buenas propiedades tecnológicas, como: maquinabilidad, soldabilidad, ductilidad, elasticidad; y, buenas propiedades físicas, como: conductividad térmica.

Por tales motivos los materiales que cumplen con los requerimientos expuestos anteriormente son los materiales ferrosos, aceros, acero inoxidables y diversas clases de hierros fundidos por tener muy buenas propiedades térmicas, además de tener alta resistencia a la corrosión.

Dependiendo de la temperatura de la pared y de la intensidad corrosiva se pueden utilizar los aceros al carbono, de baja aleación, de alta aleación e inclusive hasta los aceros inoxidables.

Los criterios fundamentales que determinan la selección de un tipo de acero son en primer lugar la compatibilidad de un acero barato y tecnológicamente satisfactorio con los fluidos, tanto el agua como los gases de escape, y en segundo lugar, las condiciones de trabajo y las exigencias en su elaboración.

Es importante tomar en cuenta que el fluido utilizado para producir el vapor es agua desmineralizada y tratada en la misma planta, por tal razón la corrosión y con esto el deterioro de las tuberías y del recuperador de calor se va a minimizar considerablemente, ya que al utilizar agua sin tratar en este tipo de equipos se disminuye ampliamente el tiempo de duración de los mismos por corrosión y acumulación de incrustaciones.

Para superficies con temperatura <350 ˚C se pueden usar el acero al carbono, cuando 350 ˚C< temperatura<420 ˚C se utiliza aceros de baja aleación. Cuando aumenta la temperatura hasta 520 ˚C < temperatura <530 ˚C se utiliza aceros con mayor porcentaje de carbono, lo cual aumenta la resistencia a la formación de óxido.

6.1.1 TUBERÍAS

En la selección del material de los tubos, se deberá atender con especial cuidado el ataque corrosivo a las condiciones de servicio (Presión y Temperatura) de cada fluido, ya que ambos están en contacto con ellos, uno por el interior y el otro por su exterior. Además, se deberá tomar en cuenta que comercialmente no se cuenta con espesores normalizados que proporcionen el material disponible para corrosión, por lo que está deberá resultar imperceptible.

Es de gran importancia aclarar la diferencia que existe entre los términos tubería y tubo, pues comúnmente son confundidos.

La tubería corresponde al conjunto conformado por el tubo, los accesorios, las válvulas, etc. Mientras que el tubo es aquel producto tubular con dimensiones ya definidas y de material de uso común.

La norma recomienda para tubería de calderos, acero de bajo carbono como A.S.T.M. A-106, A-53, o tubos de acero inoxidable. Ya que este tipo de materiales mantienen sus propiedades a elevadas temperaturas.

6.1.1.1 Tubos de acero de bajo carbono

Son tubos fabricados con acero al carbono de calidad estructural, es utilizado en la conducción de agua, gas, vapor, petróleo, aire presurizado y otros fluidos.

Cabe destacar que los aceros de bajo carbono no tienen ningún tipo de protección ante ambientes hostiles como son aguas duras, agua con cloro, agua con hierro, humos, etc. por lo que su tiempo de vida útil es corto; pero son más baratos comparados con los tubos de acero inoxidable.

En los aceros A.S.T.M. A-106 y A-53, la composición química de estos materiales es idéntica, ambos son sometidos a ensayos físicos especiales, pero los A-106 a más rigurosos. Por ejemplo los A-53 soportan presiones de hasta 42 $\left[\frac{Kg}{cm^2}\right]$, y

los A-106 soportan presiones que sobrepasan los 176 $\left[\frac{Kg}{cm^2}\right]$. Se fabrican en los grados A y B, a continuación tenemos la composición de cada grupo:

TABLA 6.1 Composición química de la colada (Max. %).

	C	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
GRADO A	0.25	0.95	0.05	0.045	0.40	0.40	0.40	0.15	0.08
GRADO B	0.30	1.25	0.05	0.045	0.40	0.40	0.40	0.15	0.08

Las propiedades mecánicas de cada uno de estos materiales son:

TABLA 6.2 Propiedades mecánicas.

	Resistencia Tracción [psi]	Límite de Fluencia [psi]
GRADO A	48000	30000
GRADO B	60000	35000

Por tal razón la tubería más adecuada para el transporte del vapor y del agua de alimentación que se ha seleccionado para la construcción de las tuberías del recuperador de calor es el acero A.S.T.M. A-53 de grado B ya que la presión que este material soporta es muy superior a la presión de trabajo, además de tener un bajo costo.

6.1.2 BANCO O HAZ DE TUBOS

Es importante considerar que para la construcción del banco de tubos se utilizara otro tipo de material de acuerdo a la norma el acero más adecuado para calderas con alta presión de servicio es el A.S.T.M. A-192, en el marcado nacional encontramos tubos lisos sin costura de acero al carbono adecuados para la construcción de este tipo de equipos.

TABLA 6.3 Composición química de la colada (Max. %).

	C	Mn	P	S	Si
COMPOSICIÓN %	0.06 - 0.18	0.27 – 0.63	0.035	0.035	0.25

Las propiedades mecánicas de cada uno de estos materiales son:

TABLA 6.4 Propiedades mecánicas.

Resistencia Tracción [psi]	Límite de Fluencia [psi]
26000	47000

Este material es el más adecuado debido a su costo y muy buenas características, ya que la cantidad de material que se requiere para un caldero es de 150 tubos de dimensiones 2.9x76.2x2880 mm, como se determino con el cálculo, tomando en cuenta que en el mercado nacional se cuenta con tubos de 6 [m] de longitud.

6.1.3 CORAZA

Es un cuerpo cilíndrico construido de una sola pieza que puede ser un tubo sin costura o una placa rolada que contendrá en su interior el banco de tubos y a través de los cuales circula el fluido que baña el exterior de los tubos de dicho haz, los materiales que recomienda la norma son los aceros A.S.T.M. 285 ó el acero A.S.T.M. A-131 la segunda opción se caracteriza por tener mejores propiedades.

El material seleccionado para la construcción de la coraza es el acero naval A.S.T.M. A-131 de dimensiones 12.7x1500x6000 mm, es adecuado por sus buenas propiedades mecánicas, alta resistencia a la corrosión y excelente soldabilidad, por tales razones es el adecuado para la construcción de calderos.

TABLA 6.5 Composición química de la colada (Max. %).

	C	Mn	P	S	Si
COMPOSICIÓN %	0.21	0.95	0.035	0.035	0.50

TABLA 6.6 Propiedades mecánicas.

Resistencia Tracción [psi]	Límite de Fluencia [psi]
75000	35000

6.1.4 CÁMARAS DE ENTRADA Y SALIDA DE GASES

Estos elementos tienen la función de guiar el flujo de los gases de combustión hacia el interior del banco de tubos, así como la recolección de los gases una vez que han pasado por el interior del banco de tubos para de esta manera direccionar los gases a la salidas que se encuentran el cada una de las chimeneas con sus respectivos silenciadores.

El parámetro principal como las altas temperaturas a las que están operando, permite determinar la selección del material más adecuado para la construcción de estos dispositivos.

El material más adecuado para las cámaras de humo posterior y delantera es el mismo que se utiliza para le elaboración de la coraza, es decir plancha naval de acero A.S.T.M. A-131 de dimensiones 12x1500x6000 mm.

6.1.5 BARRAS TIRANTES

La función de estos elementos es la de soportar la presión que se produce contra las paredes laterales en el interior del cilindro para evitar que los tubos soporten toda la carga, por tal motivo el dispositivo debe ser reforzado para aumentar el factor de

seguridad, la barras tirantes se sueldan a las paredes laterales y su posición es paralela al banco de tubos, se los distribuye de manera que no afecte la disposición del banco de tubos, considerando que en el interior del caldero va a tener dos fases una liquida y otra gaseosa en la cual se debe tener una elevada resistencia a la presión que produce el vapor y donde vamos a tener un cierto número de barra tirantes que soporten dichas presiones.

El material que se ha seleccionado para este dispositivo es eje de Acero Bonificado A.I.S.I. 4340, este material es de buena templabilidad y resistencia a la fatiga. Posee una maquinabilidad relativamente moderada con las herramientas adecuadas, se suministra en esta bonificado. Ideal para la fabricación de piezas y herramientas expuestas, a flexión, torsión, tracción y que además estén expuestas a altos esfuerzos dinámicos y mecánicos.

TABLA 6.7 Composición química de la colada (Max. %).

	C	**Mn**	**P**	**S**	**Si**	**Ni**	**Mo**	**Cr**
COMPOSICIÓN %	0.38-0.43	0.6-0.8	0.035	0.04	0.15-0.3	2	0.3	0.9

TABLA 6.8 Propiedades mecánicas.

Resistencia Tracción [psi]	**Límite de Fluencia [psi]**
170000	110000

6.1.6 BRIDAS

Las Bridas son accesorios para conectar tuberías con equipos (Bombas, intercambiadores de calor, calderas, tanques, etc.) o accesorios (codos, válvulas, etc.). La unión se hace por medio de dos bridas, en la cual una de ellas pertenece a la tubería y la otra al equipo o accesorio a ser conectado. La ventaja de las

uniones bridadas radica en el hecho de que por estar unidas por espárragos, permite el rápido montaje y desmontaje a objeto de realizar reparaciones o mantenimiento.

Los materiales más recomendados para la elaboración de las bridas son los aceros forjados A.S.T.M. A-105 ó A.S.T.M. A-36, cuyas propiedades mecánicas y composición química son similares.

TABLA 6.9 Composición química de la colada (Max. %).

	C	**Mn**	**P**	**S**	**Si**
Acero A-36	0.25	1.2	0.04	0.05	0.40
Acero A-105	0.25	1	0.05	0.05	0.05

TABLA 6.10 Propiedades mecánicas.

	Resistencia Tracción [psi]	**Límite de Fluencia [psi]**
Acero A-36	80000	36000
Acero A-105	70000	36000

El material seleccionado para la fabricación de la bridas es el acero A-36 por la su disponibilidad en el mercado nacional y buen costo.

6.1.7 PERNOS, TUERCAS Y ARANDELAS

El material de tornillería, incluyendo las tuercas y arandelas, se deben comprar de acuerdo a la norma A.S.T.M. A-193, "Specification for Alloy-Steel and Stainless Steel Bolting Materials for High Temperature Service" Grado B.

Éste tipo de materiales presenta buena resistencia en ambiente corrosivo, además buena resistencia a las oxidación en caliente hasta la temperatura máx. de 650℃, buena soldabilidad.

TABLA 6.11 Propiedades mecánicas

	Resistencia Tracción [psi]	**Límite de Fluencia [psi]**
GRADO A	95000	70000
GRADO B	105000	80000
GRADO C	125000	105000

6.2 ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO

Con el análisis de costos se pretende determinar el monto económico para la realización del proyecto. El análisis de costos se lo realiza tomando en cuenta los costos directos y los costos indirectos.

Para determinar el Costo Total Directo se considera los costos parciales de:

- Materiales Directos
- Elementos Normalizados
- Costo de Maquinado
- Costos de montaje

De manera similar para determinar el Costo Total Indirecto se consideran los costos parciales de:

- Materiales Indirectos
- Costos de Ingeniería
- Gastos Imprevistos

Para determinar el Costo Total del recuperador de calor, se suma el total de los Costos Directos con los Costos Indirectos.

.

6.2.1 ANÁLISIS DE COSTOS DIRECTOS

6.2.1.1 Costos de materiales directos

Se denominan los Materiales Directos a la materia prima que se utiliza para construir los elementos que conforman la maquina. Los costos de materiales directos se presentan en la siguiente tabla:

TABLA 6.12 Costo de materiales directos

Ítem	Descripción de material para elementos principales	Unid.	Cant.	P /Unit.	Total $
1	Coraza - PL. NAVAL ASTM A-131 12x1500x6000 mm	PL	6	1162.0	6972.0
2	Base - UPN 160	UND	3	150.0	450.0
3	Manhole (agujero de hombre) ASTM A-36 15x1220x2440 mm	PL	0.25	463.0	115.8
4	Banco de Tubos liso ASTM A-192 76.2 x 2.9 x 6000 mm	TUB	76	56.0	4256.0
5	Barra tirante de Acero Bonificad. AISI 4340 Ø16 x 3000 mm	UND	12	154.7	1856.4
6	Cámara de humo delantera -Manhole ent. gas (1)- PL. NAVAL ASTM A-131 12x1500x6000 mm	PL	1	1162.0	1162.0
7	Bridas (1) de manhole entrada de gas- PL ASTM A-36 15x1220x2440 mm	PL	0.5	463.0	231.5
8	Cámara de humo trasera -manhole salida de gas (2)- PL ASTM A-131 12x1500x6000 mm	PL	1	1162.0	1162.0
9	Bridas(2) de manhole salida de gas- PL ASTM A-36 15x1220x2440 mm	PL	0.5	463.0	231.5
SUBTOTAL					16437.2

6.2.1.2 Costos de elementos normalizados

Son aquellos que son de libre comercialización en el mercado y no necesitan ser alterados para su uso. Los costos de los elementos directos se muestran en la siguiente tabla:

TABLA 6.13 Costos de elementos normalizados (Válvulas).

Ítem	Símbolo	Descripción de válvulas	Unid.	Cant.	P / Unit.	Total $
1	V-1	Válvula de cierre prin. vapor 2" x PN16, T / ángulo, Bridada	UND	1.0	450.0	400.0
2	V-2	Válvula check principal de vapor de 2"x PN16, Bridada	UND	1.0	430.0	430.0
3	V-3 / 4	Válvula seguridad No 1 -2 de 1" x 175 psi	UND	2.0	250.0	500.0
4	V-5	Válvula Raíz Válvula seguridad de 1 1/2" PN 16, Bridada	UND	1.0	250.0	250.0
5	V-6	Válvula seguridad principal de 1 1/2" X 175 psi, Bridada	UND	1.0	300.0	300.0
6	V-7	Válvula cierre agua de alimentación 2" X 250 psi	UND	1.0	242.9	242.9
7	V-8	Vál. Check agua alimentación 3/4" X 250 psi	UND	1.0	60.0	60.0
8	V-9	Válvula raíz de cierre de agua de alimentación 3/4"	UND	1.0	60.0	60.0
9	V-10/11	Válvula aviso de nivel bajo/alto 1 1/2 " x 250 psi, Mc#150	UND	2.0	158	316.0
10	V-12/13	Válvula aviso de nivel bajo/alto 1 1/2 " x 250 psi, Mc#150	UND	2.0	158	316.0
11	V-14/15	Válvula raíz regulador de agua alimentación 1 1/2 "X250 psi	UND	2.0	158	316.0
12	V-16/17	Válvula Purga 1 y 2 - 1 1/2 "X 250 psi	UND	2.0	1261	2522.0
13	V-18	Válvula toma muestras 3/4 " x 250 psi	UND	1.0	60	60.0
14	V-19/20/21	Válvula Raíz de regulador de agua alim. 1 1/2 " x 250 psi	UND	3.0	158	474.0
15	V-22/23/24	Válvula derivación del tanque de mezcla 1 1/2" x 250 psi	UND	3.0	158	474.0
16	V-25	Válvula de raíz para tanque de medición 1 1/2" x 250 psi	UND	1.0	158	158.0
17	V-26	Válvula drenaje del tanque de medición 3/4" x 250 psi	UND	1.0	60	60.0

Ítem	Símbolo	Descripción de válvulas	Unid.	Cant.	P / Unit.	Total $
18	V-27/28	Válvula de raíz para soplador de hollín 1 1/2 " x 250 psi	UND	2.0	158	316.0
19	V-29/30	Válvula de drenaje del visor nivel de agua 3/4 " x 250 psi	UND	2.0	60	120.0
20	V-31/32	Válvula drenaje de nivel bajo/alto 1'' x 250 psi, Mc#150	UND	2.0	85	170.0
21	V-33/34	Válvula drenaje de nivel bajo/alto 1'' x 250 psi, Mc#150	UND	2.0	85	170.0
22	V-35/36	Válvula de drenaje p/regulador de flujo de agua 1" x 250 psi	UND	2.0	85	170.0
23	V-37/38	Válvula raíz del visor nivel bajo / alto de agua 3/4 " 250 psi	UND	2.0	60	120.0
24	V-39	Válvula Drenaje visor nivel bajo /alto de agua 3/4 " 250 psi	UND	2.0	60	120.0
25	V-40	Válvula de raíz para manómetro 1/2” x 250 psi	UND	1.0	52	52.0
26	V-41	Válvula de respiradero de aire 3/4" x 250 psi	UND	1.0	60	60.0
SUBTOTAL						5076.9

TABLA 6.14 Costos de elementos normalizados (Accesorios auxiliares).

Ítem	Símbolo	Descripción del elemento	Unid.	Cant.	P / unit.	Total $
1	M-1	Indicador de nivel de agua 1/2” X 200 psi con válvulas	UND	2	111.0	222.0
2	M-2	Manómetro Ac. Inox. cart.8", 0 - 250 psi, toma 1/2"	UND	1	182.0	182.0
3	M-3/4	Switch de nivel alto / bajo (Mc. Donnell # 150)	UND	2	1200.0	2400.0
4		Tablero eléctrico de control y seguridades	UND	1	500.0	500.0
5		Control de entrada agua al recuperador de calor 1"	UND	1	2171.6	2171.6

Ítem	Símbolo	Descripción del elemento	Unid.	Cant.	P / unit.	Total $
6	M-5	Regulador de flujo de agua 2"	UND	1	2420.0	2420.0
7	M-6	Silenciador salida vapor 1 1/2”	UND	2	250.0	500.0
8	M-7	Tolva de medición de químicos - Toma 1" soldable	UND	1	150.0	150.0
9	M-8	Tanque de mezcla de químicos - Toma 1" soldable	UND	1	200.0	200.0
10		Motoreductor eje recto 0,90 kw, 60 Hz, Trifásico 220 V, 60 rpm, con acoples Ø32 mm	UND	2	1200.0	2400.0
11		Inversor de giro, Juego de 2 piñones cónicos, base - soportes - ejes y chumaceras, tornillo sin fin Ø30 mm con tuerca y apoyos.	UND	2	1500.0	3000.0
12		Soplador de vapor para limpieza de hollín, Soportes, tubos guías , cuerpos de prensaestopas (2), corredera de flauta de soplado, otros	UND	2	2000.0	4000.0
13		Switch de final de carrera alto / bajo del soplador de vapor	UND	4	150.0	600.0
14		Panel eléctrico del sistema de limpieza de hollín	UND	1	500.0	500.0
15	TUBERÍAS DE CONEXIÓN	Tuberías A53, C-40 y accesorios para: agua y vapor en ØS de 1/2 (1), 3/4 (3), 1 (2), 1 1/2 (3) ,y 2" (2).	LOT	1	1000.0	1000.0
16	AISLANTE. TÉRMICO	Plancha Ac. Inox. Brillante 0,5 X1220x2440 mm	PL	10	75.0	750.0
17		Lana de vidrio 2"x1x1 m², alambre, soportes, otros	m²	50	50.0	2500.0
18	PINTURA	Thermaline 4700 aluminio 649℃, alta temperatura, exteriores.	GLS	4	122.0	488.0
SUBTOTAL						23983.6

6.2.1.3 Costos de mano de obra

Este costo tiene que ver con el valor respecto a la mano de obra directa emplea en las maquinas y equipamiento eléctrico. Estos valores están directamente relacionados con la materia prima que se va a utilizar para la construcción del caldero y se calculan basándose en el tiempo requerido para la fabricación de los elementos y a continuación se presentan en la siguiente tabla:

TABLA 6.15 Costo de mano de obra para cada material

Ítem	Descripción de material para elementos principales	Unid.	Cant.	P /unit.	Total material	Mano de obra $
1	Coraza - PL. NAVAL ASTM A-131 12x1500x6000 mm	PL	6	1162.0	6972.0	10458.0
2	Base - UPN 160	UND	3	150.0	450.0	675.0
3	Manhole ASTM A-36 15x1220x2440 mm	PL	0.25	463.0	115.8	173.6
4	Tubo liso ASTM A-192 76.2 x 2.9 x 6000 mm	TUB	76	56.0	4256.0	6384.0
5	Barra tirante de Acero Bonificad. AISI 4340 Ø60 x 3000 mm	UND	12	154.7	1856.4	2784.6
6	Cámara de humo delantera -Manhole ent. gas (1)- PL. NAVAL ASTM A-131 12x1500x6000 mm	PL	1	1162.0	1162.0	1743.0
7	Bridas (1) de manhole entrada de gas- PL ASTM A-36 15x1220x2440 mm	PL	0.5	463.0	231.5	347.3
8	Cámara de humo trasera -manhole salida de gas (2)- PL ASTM A-131 12x1500x6000 mm	PL	1	1162.0	1162.0	1743.0
9	Bridas(2) de manhole salida de gas- PL ASTM A-36 15x1220x2440 mm	PL	0.5	463.0	231.5	347.3
SUBTOTAL						24655.7

6.2.1.4 Costos de montaje

Estos costos están relacionados con el personal necesario para el armado y ensamblado de cada una de las partes del recuperador de calor y el tiempo necesario para la instalación de una sola unidad.

TABLA 6.16 Costo de montaje

Ítem	Personal	Unid.	Cant.	P / unit.	Días	Total $
1	Operario de grúa	dia	1	60.0	3.0	180
2	Soldador	día	4	40.0	5.0	800
3	Pintor	día	2	30.0	2.0	120
4	Mecánico	día	5	35.0	5.0	875
5	Chofer	día	3	30.0	2.0	180
6	Ingeniero mecánico	día	2	120.0	5.0	120
SUBTOTAL						3355

6.2.1.5 Costos directo total

En la siguiente tabla se indica la cantidad total del costo directo para el recuperador de calor.

TABLA 6.17 Costo Directo Total

Rubro	Valor $
Costo de Materiales Directos	16437.2
Costo de Elementos Normalizados	29060.5
Costo de Mano de Obra	24655.7
Costo de Montaje	3355.0
SUBTOTAL	73508.4

6.2.2 ANÁLISIS DE COSTOS INDIRECTOS

6.2.2.1 Costos de materiales indirectos.

Los costos de materiales indirectos utilizados para el montaje se muestran en la siguiente tabla.

TABLA 6.18 Costo de materiales indirectos

Material	Unid.	Cant.	P/Unit.	Total $
Electrodo 6011-1/8"	Kg	10	2.5	25
Electrodo 6013-1/8"	Kg	5	2.3	11.5
Electrodo 7018-1/8"	Kg	12	2.8	33.6
Lija para hierro	m2	2	8	16
Thinner	Lt	5	1.2	6
Disco de Desbaste	und	4	7	28
Disco de Corte	und	3	7	21
Guaype	und	20	0.1	2
SUBTOTAL				143.1

6.2.2.2 Costos de ingeniería

Este rubro corresponde al valor que los ingenieros cobran para el diseño del equipo. Así como los materiales de oficina, transporte y uno de los aspectos más importantes son las pruebas hidrostáticas para verificar que en el equipo de existan fugas de ninguna clase y también los ensayos destructivos para verificar la calidad de las soldaduras de esta manera se garantizara que el equipo tenga una vida útil considerable.

TABLA 6.19 Costo de ingeniería

Ítem	Cant.	Unid.	Descripción	Total $
1	1		Ingeniero	5000
2	1	GLB	Costos indirectos (transporte, material oficina ,etc)	1950.73
3	1	GLB	Ensayos no destructivos y pruebas hidrostáticas	10000
SUBTOTAL				16950.73

6.2.2.3 Costo total indirecto

La tabla 6.20 muestra el monto del costo total indirecto.

TABLA 6.20 Costo Indirecto Total

Rubro	Valor $
Costo de Materiales Indirectos	143.1
Costo de Ingeniería	16950.71
SUBTOTAL	17093.81

6.2.3 COSTO TOTAL DEL EQUIPO

De la suma costo total directo e indirecto resulta el costo total del recuperador de calor con todos sus accesorios y sistemas. Con este análisis se demuestra que el costo del equipo es mucho menor al construirlo utilizando materiales existentes en el mercado nacional, este costo se indica en la siguiente tabla.

TABLA 6.21 Costo Indirecto Total

Rubro	Valor $
Costo Directos	73508.4
Costo Indirectos	17093.81
SUBTOTAL	90602.21

IVA	12%
TOTAL	101474.47

6.3 CONSUMO DE COMBUSTIBLES

Satisfacer la necesidad de vapor de la planta se requieren grandes cantidades de diesel para la operación las calderas, lo que representa un rubro muy grande para la empresa

En la siguiente tabla se enlista el consumo total de diesel de las calderas en el periodo del año 2009 (datos tomados del resumen de producción y consumo de mes).

TABLA 6.22 Consumo mensual de combustible de las calderas.

MES	**CONSUMO (gal)**
Enero	18693
Febrero	19091
Marzo	18693
Abril	19110
Mayo	18693
Junio	19110
Julio	19319
Agosto	19130
Septiembre	19110
Octubre	19663
Noviembre	19110
Diciembre	19110
PROMEDIO	19069
TOTAL	228828 GALONES/AÑO

Tomando en cuenta que el precio de un galón de diesel tiene un costo de 1.04 USD, en la siguiente tabla se tiene el costo total en combustible para un año de operación de las calderas.

TABLA 6.23 Gasto anual de combustible por las calderas.

Costo de diesel	USD/Gal	1.04
Consumo total de diesel	Gal/Año	228828
Costo total	USD/Año	237981.12

Datos tomados del reporte de consumo anual de combustible diesel de la planta. (ANEXO 9)

Este valor se lo tomará como ingreso para el análisis económico del proyecto, con el fin de saber en qué tiempo se recupera el dinero invertido en el recuperador de calor.

6.4 ESTUDIO ECONÓMICO FINANCIERO

El presente análisis económico se lo realizara en periodos largos de tiempo, años, ya que el tiempo de vida del recuperador de calor se lo considera 10 años. Pero es importante tomar en cuenta que el recuperador no necesita de una continua inspección, debido a que el equipo trabaja con agua tratada, es decir que no se va a tener incrustaciones en el interior del caldero la cual da como resultado una considerable vida útil del equipo.

6.4.1 VALOR DE SALVAMENTO (VS)

El valor de salvamento, es el valor que tiene o representa un bien al terminar su vida útil, es decir el valor que representaría el suprimirlo de su servicio para el que fue elaborado. En el proyecto es igual a 10000 USD.

6.4.2 INGRESOS (I)

Los ingresos están determinados por el ahorro que se tiene de no utilizar diesel como combustible.

I = 237981.12 [USD/Anuales]

6.4.3 COSTOS O EGRESOS (E)

En los costos, solo se toma en cuenta el costo de construcción y transporte del recuperador de calor. El valor total se lo divide para diez años, ya que es el tiempo de vida del recuperador y se necesita saber el precio por año:

E = 10147.447 [USD/Anuales]

6.4.4 ANÁLISIS FINANCIERO

En el análisis financiero del proyecto, se procederá a emplear el método tomando en cuenta el valor del dinero en el tiempo y pueden ser:

- Valor presente [VP]
- Tasa interna de rendimiento [TIR]

$$VP = -Y + \sum_{j=1}^{N} (I_j - E_j) * \left(\frac{P}{A} i, j\right) + Vs\left(\frac{P}{A} i, j\right)$$

$$VP = -Y + \sum_{j=1}^{N} (I_j - E_j) * \left(\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}\right)$$

Donde:

$Y =$ Costo del proyecto.

I_j= Ingresos.

E_j =Egresos.

n =Vida Útil.

$i =$ Interés

6.4.4.1 Valor presente (VP)

El VP compara a todos los ingresos y egresos del proyecto en un solo momento del tiempo.

Criterio de selección:

- VP > 0: se invierte
- VP < 0: no se invierte

Para determinar el valor presente es necesario realizar el cálculo para diferentes valores de tasa mínima de rendimiento con el objetivo de determinar con cual el TMAR es rentable para el proyecto.

Donde:

$n =$10 años

$$VP = -98376.89 + (237981.12 + 10000 - 9837.689)\left(\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}\right)$$

TABLA 6.24 Valores del valor presente.

i %	VP (USD)	Criterio
8	265493.4	Conviene Invertir
10	75444.8	Conviene Invertir
12	3866.9	Conviene Invertir
14	-30414.6	No Conviene Invertir
16	-49507.2	No Conviene Invertir

De los resultados obtenidos, un TMAR del 12% o menor produce valores presentes positivos siendo de esta manera rentable el proyecto. Por lo tanto, para el análisis, se establece un TMAR del 12%.

6.4.4.2 Tasa interna de retorno (TIR)

Para el análisis del proyecto se considera VP = 0

$$VP = -101474.47 + (237981.12 + 10000 - 10147.447)\left(\frac{(1+Tir)^n - 1}{Tir(1+Tir)^n}\right)$$

El valor de VP = 0 se obtiene cuando i = 12.17 %. Cuando el valor presente se lo iguala a cero el interés (i) se convierte en TIR. Como el TIR es mayor al TMAR establecido de 12 % el proyecto es recomendable.

6.4.4.3 Costo-Beneficio

Es necesaria la instalación de tres calderas para cubrir toda la demanda de vapor que esta necesita, tomando en cuenta que el costo de un caldero es de 101474.47 USD tenemos:

TABLA 6.25 Tiempo de recuperación.

Costo de un recuperador	101474.47	USD
Costo de dos recuperadores	202948.95	USD
Costo de combustible	237981.21	USD/Año
RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN	0.85	Años

De la tabla 6.25 se determina que el tiempo de recuperación de la inversión es de 11 meses en conclusión el proyecto es rentable.

CAPITULO 7
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

Las condiciones actuales de trabajo de los calderos de la planta no satisfacen las necesidades de vapor que exige el proceso de precalentamiento de los combustibles que consumen los motores de los generadores, además de tener gastos considerables de dinero por consumo de diesel para el funcionamiento de los equipos, provocando otra fuente de contaminación para el medio ambiente ya que los gases de combustión de los calderos son altamente contaminantes.

Con la implantación de este recuperador de calor se garantiza una producción de vapor suficiente para el precalentamiento de los combustibles de las unidades generadoras, aprovechando un poder calorífico de los gases de escape que eran enviados al ambiente desperdiciando una cantidad de energía térmica significativa, el vapor alcanza la temperatura requerida por el departamento de producción para que el proceso de precalentamiento sea optimo y de esta manera aumentar la eficiencia de los motores.

Con la implantación del recuperador de calor se eliminaría la necesidad de utilizar los calderos que actualmente tienen un desempeño deficiente, con lo cual el combustible que es consumido en estos equipos se lo puede utilizar en otra parte del proceso de generación de energía, por ejemplo para el consumo de los motores, reduciendo los costos considerablemente.

El calor entregado al agua a través del recuperador de calor para producir el vapor alcanza la temperatura requerida por el departamento de producción y se elimina el consumo de diesel, con lo que se cumple uno de los objetivos propuestos en este proyecto.

Al canalizar los gases de escape a los recuperadores en la generación de vapor para la planta se elimina el consumo de diesel minimizando los costos de producción de energía, concluyendo que es rentable y necesaria la implantación del recuperador de calor.

Se puede producir mayor cantidad de vapor empleando el 100 % del flujo de gases, más, las dimensiones de la caldera serian considerablemente superiores a las establecidas, siendo imposible su montaje en el espacio físico disponible. Ver la figura 2.3.

En el diseño de calderos se tiene un gran número de alternativas en lo referente a formulas y graficas de datos, la mayoría de diseños están basados en la experiencia del diseñador, por tal razón se debe buscar la alternativa más adecuada de diseño de acuerdo a las condiciones de operación que se desea obtener en el equipo.

Utilizando los conocimientos adquiridos durante la vida académica, Manual Del Ingeniero Químico de Perry, Código ASME y Norma ALPEMA, se logra alcanzar el objetivo principal que es el diseño de un recuperador de calor para aprovechar la disponibilidad de los gases de combustión y calentar el colchón de agua del tanque de lavado de petróleo.

7.2 RECOMENDACIONES

Del cálculo de la caldera recuperadora de calor se obtiene que su capacidad de producción de vapor es 1760 kg/h considerando un exceso del 10 % por motivos de pérdidas a 10 kg/cm² de presión, por lo que se recomienda la construcción de dos calderas recuperadoras, una unidad principal y la segunda como auxiliar, la misma que entre en funcionamiento cuando se requiera realizar el mantenimiento del equipo principal.

Por lo general el agua de servicio de este tipo de equipos contiene calcio (Ca). Magnesio (Mg), y varias otras impurezas en suspensión o también en estado disuelto. Contiene oxigeno disuelto y anhídrido carbónico. De hacer uso de agua

semejante, sin tratarla, como agua de alimentación del recuperador ocasionaran varios problemas. Hay que eliminar las impurezas dañinas y el gas disuelto por medio del método apropiado o cambiarlos en substancias inocuas. Este proceso se denomina "Tratamiento del agua del recuperador". El agua de reemplazo deberá ser de buenas condiciones. Caso contrario, el recuperador quedara sujeto a corrosión, formación de incrustaciones, etc. sin obtener un funcionamiento seguro y eficiente. Por esta razón de recomienda instalar un equipo de tratamiento de agua.

La distribución de los 150 tubos dentro de la caldera recuperadora debe ser en forma cuadrada, pues es el arreglo que proporciona mayor facilidad para el normal funcionamiento del sistema de limpieza que se va a utilizar en el equipo.

APÉNDICES

APENDICE A
ANÁLISIS DE GASES DE COMBUSTIÓN PARA UNA UNIDAD

El diseño de las instalaciones para el recuperador de calor se ve regido por las condiciones y características que presentan los gases de escape, por lo que se hace imperativo realizar un análisis de los mismos con la finalidad de conocer su calor específico y su flujo másico.

Los datos del flujo de gases secos, húmedos y él porcentaje de agua contenida son tomados de los análisis realizados por el personal técnico de CESAQ-PUCE, los mismos que se encuentran ilustrados en la TABLA A1.

TABLA A.1 Datos de flujo de gases secos y humedad del gas.

PARÁMETRO	UNIDADES	RESULTADO	NORMA
Flujo volumétrico de gases secos $(\dot{v}_{gsf})$	m^3/h	24210.1	NA
Humedad del gas (X)	%	4.54	NA

Utilizando la formula de flujo de gases húmedos

$$\dot{\boldsymbol{v}}_{ghf} = \dot{\boldsymbol{v}}_{gsf} + x\,\dot{\boldsymbol{v}}_{gsf} \qquad (A.1)$$

Se tiene:

$$\dot{\boldsymbol{v}}_{ghf} = 25309.24\ \frac{m^3}{h}$$

Donde:

$\dot{\boldsymbol{v}}_{ghf}$ = Flujo volumetrico de gases humedos

$\dot{v}_{gsf}$ = Flujo volumetrico de gases secos

x = Huedad del gas

TABLA A.2 Resultado del análisis de los gases de combustión.

PARÁMETRO	MÉTODO ANALÍTICO	UNIDADES	RESULTADO	NORMA
Óxidos de nitrógeno (NO_X)	CP-PEE-E001	ppm	2016	NA
Monóxido de carbono (CO)	CP-PEE-E001	ppm	202	500
Oxido de azufre (SO_2)	CP-PEE-E001	ppm	235	2500
Dióxido de Carbono (CO_2)	CP-PEE-E001	%	7	NA
Oxigeno (O_2)	EPA 3A	%	11.6	NA
Agua (H_2O)		%	4.54	NA
N_2 OTROS				

A.1 CONVERSIÓN DE UNIDADES.

La determinación del flujo y porcentaje volumétrico de los gases de combustión se lo realiza a partir de la información otorgada por el personal técnico de CESAQ-PUCE.

Con los datos de la TABLA A2 de la composición del gas, se calcula el porcentaje volumétrico de cada componente, dividiendo para 100, 1000000 y el cálculo del N_2 (otros) utilizando la formula:

$$\%\ de\ N_2(otros) = 100\% - \sum \%\ Componentes\ del\ gas \qquad (A.2)$$

$$N_2(otros) = 1 - \ 0.2339 = 0.7661$$

TABLA A.3 Porcentaje volumétrico de los gases de combustión.

ELEMENTO	DIVIDIMOS	PORCENTAJE
NO_x	1000000	0.0020
CO	1000000	0.0002
SO_2	1000000	0.0002
CO_2	100	0.0700
O_2	100	0.1160
H_2O	100	0.0454
N_2 OTROS		0.7661
TOTAL		1

Con los valores de:

TABLA A.4 Datos de los gases de escape antes de los silenciadores.

Temperatura de los gases:	428,2 ℃
Presión de los gases:	572.25 mm Hg

Calculamos:

$$PM = P_{atómico}\ x\ \%_{Elemento} \qquad (A.3)$$

PM = Peso molecular, $\left[\frac{g}{gmol}\right]$

$\%_{Elemento}$= Cantidad de cada elemento en porcentaje volumétrico

$P_{atómico}$ = Peso atómico del elemento

Cálculo de la densidad de cada elemento que se encuentra en el gas:

$$\rho_{Elemento} = \frac{P_{gases}\ x\ PM}{R\ T_{gases}}\ , \left[\frac{Kg}{m^3}\right] \qquad (A.4)$$

$\rho_{Elemento}$= Densidad de cada elemento , $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

P_{gases}= Presión de los gases de escape, $[Atm]$

R = Constante universal de los gases ideales, $\left[\frac{Atm\ .\ Lt}{mol\ .\ °K}\right]$

PM = Peso molecular de cada elemento, $\left[\frac{g}{gmol}\right]$

Agua (H_2O)

$$\rho_{H_2O} = \frac{P_{gas}\ x\ PM_{H_2O}}{RT_{gas}} = \frac{\frac{572.25}{760} Atm\ x\ 18 \frac{g}{gmol}}{0.08205\ x\ (428.2℃ + 273)°K} = 0.4835 \left[\frac{Kg}{m^3}\right]$$

Monóxido de carbono (CO)

$$\rho_{CO} = \frac{P_{gas}\ x\ PM_{CO}}{RT_{gas}} = \frac{\frac{572.25}{760} Atm\ x\ 28 \frac{g}{gmol}}{0.08205\ x\ (428.2℃ + 273)°K} = 0.3667 \left[\frac{Kg}{m^3}\right]$$

Dióxido de Carbono (CO_2)

$$\rho_{CO_2} = \frac{P_{gas}\ x\ PM_{CO_2}}{RT_{gas}} = \frac{\frac{572.25}{760} Atm\ x\ 44 \frac{g}{gmol}}{0.08205\ x\ (428.2℃ + 273)°K} = 0.5762 \left[\frac{Kg}{m^3}\right]$$

Óxido de azufre (SO_2)

$$\rho_{SO_2} = \frac{P_{gas}\ x\ PM_{SO_2}}{RT_{gas}} = \frac{\frac{572.25}{760} Atm\ x\ 64 \frac{g}{gmol}}{0.08205\ x\ (428.2℃ + 273)°K} = 0.8381 \left[\frac{Kg}{m^3}\right]$$

Óxidos de nitrógeno (NO_x)

$$\rho_{NO_x} = \frac{P_{gas}\ x\ PM_{NOx}}{RT_{gas}} = \frac{\frac{572.25}{760} Atm\ x\ 37 \frac{g}{gmol}}{0.08205\ x\ (428.2°C + 273)°K} = 0.2357 \left[\frac{Kg}{m^3}\right]$$

Oxígeno (O_2)

$$\rho_{O_2} = \frac{P_{gas}\ x\ PM_{O_2}}{RT_{gas}} = \frac{\frac{572.25}{760} Atm\ x\ 36 \frac{g}{gmol}}{0.08205\ x\ (428.2°C + 273)°K} = 0.4191 \left[\frac{Kg}{m^3}\right]$$

N_2 (otros)

$$\rho_{N_2} = \frac{P_{gas}\ x\ PM_{N_2(otros)}}{RT_{gas}} = \frac{\frac{572.25}{760} Atm\ x\ 28 \frac{g}{gmol}}{0.08205\ x\ (428.2°C + 273)°K} = 0.3667 \left[\frac{Kg}{m^3}\right]$$

Los valores calculados se ilustran en la TABLA A5.

TABLA A.5 Resumen del porcentaje de gases y densidad.

Elemento	Peso Molecular (g/mol)	Densidad (kg/m³)	% Volumétrico
H_2O	18	0.2357	0.0454
CO	28	0.3667	0.0002
CO_2	44	0.5762	0.0700
SO_2	64	0.8381	0.0002
NO_x	37	0.4845	0.0020
O_2	32	0.4191	0.1160
N_2 (otros)	28	0.3667	0.7661

Con los datos de la TABLA A5 y utilizando las formulas se calcula la densidad inicial total del gas (ρ_{hi}), la densidad final total de gas (ρ_{hf}) y el flujo másico del gas $\dot{m}_{hf}$:

$$\rho_i = \sum \left(\%_i \; x \; \frac{P_{gas} \; x \; PM_i}{RT_{gas}} \right) \qquad (A.5)$$

$$\rho_i = 0.3818 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

Donde:

$\rho_i =$ Densidad inicial total del gas, $\left[\frac{Kg}{m^3} \right]$

$\%_i$= Porcentaje Volumétrico

TABLA A.6 Datos de los gases de escape después de las chimeneas.

Temperatura:	25 °C
Presión:	760 mm Hg

Con los valores de la TABLA A6:

El cálculo de la densidad final del gas ($\boldsymbol{\rho_{hf}}$) a la salida de la chimenea se ve regido por la siguiente expresión:

$$\frac{\rho_i}{\rho_f} = \frac{V_f}{V_i} = \frac{P_i T_f}{P_f T_i} \qquad (A.6)$$

$$\rho_f = \rho_{i_{Total\ gas}} \frac{P_f T_i}{P_i T_f} \; , \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

$$\rho_f = 0.3818 \; x \; \frac{760 \; mm \; Hg \; x \; (428.2°C + 273)°K}{572.25 \; mm \; Hg \; x \; (25°C + 273)°K}$$

$$\rho_f = 1.1932 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

Con la densidad final del gas obtenemos el flujo másico real final del gas ($\dot{m}_f$):

$\dot{m}_f$ = Flujo másico real final del gas $\left[\frac{Kg}{h}\right]$

$$\dot{m}_f = \rho_f \; x \; \dot{v}_{ghf} \qquad (A.7)$$

$$\dot{m}_f = 1.1932 \left[\frac{Kg}{m^3}\right] \; x \; 25309.24 \left[\frac{m^3}{h}\right]$$

$$\dot{m}_f = 30198.98 \left[\frac{Kg}{h}\right]$$

Los valores calculados se encuentran descritos en la Tabla A7.

TABLA A.7 Parámetros de los gases de combustión.

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDAD
Densidad Total final (ρ_f)	1.1932	kg/m^3
Flujo másico final real del gas ($\dot{m}_f$)	30198.98	kg/h

TABLA A.8 Datos de los gases de escape antes de los silenciadores.

Temperatura:	428.2 ℃
Presión:	572.25 mm Hg

Con los valores de la TABLA A8 y el flujo de gases húmedos final ($\dot{v}_{ghf}$):

Se calcula el flujo volumétrico de gases húmedos inicial ($\dot{v}_{ghi}$) es decir antes de las chimeneas o silenciadores donde va conectado el recuperador de calor:

$$\frac{\dot{v}_{ghi}}{\dot{v}_{ghf}} = \frac{V_f}{V_i} = \frac{P_i T_f}{P_f T_i} \qquad (A.8)$$

$$\dot{v}_{ghi} = \dot{v}_{ghf} \frac{P_i T_f}{P_f T_i} \; , \left[\frac{m^3}{h}\right]$$

$$\dot{\boldsymbol{v}}_{ghi} = 25309.24x\ \frac{760\ mm\ Hg\ x\ (428.2°C + 273)°K}{572.25\ mm\ Hg\ x\ (25°C + 273)°K}$$

$$\dot{\boldsymbol{v}}_{ghi} = 79091.996\left[\frac{m^3}{h}\right]$$

Con el valor del flujo volumétrico inicial de los gases húmedos por la densidad inicial (ρ_{hi}) obtenemos el flujo másico real inicial del gas ($\dot{\boldsymbol{m}}_{\boldsymbol{hi}}$) :

$\dot{m}_i$ = Flujo másico real inicial del gas $\left[\frac{Kg}{h}\right]$

$$\dot{m}_i = \rho_i x\ \dot{\boldsymbol{v}}_{ghi} \qquad (A.9)$$

$$\dot{m}_i = 0.3818\left[\frac{Kg}{m^3}\right]\ x\ 79091.996\left[\frac{m^3}{h}\right]$$

$$\dot{m}_i = 30197.32\left[\frac{Kg}{h}\right]$$

Estos valores calculados se encuentran descritos en la tabla A9.

TABLA A.9 Parámetros de los gases de combustión.

PARÁMETRO	**RESULTADO**	**UNIDAD**
Densidad inicial ($\boldsymbol{\rho_i}$)	0.3818	kg/m3
Flujo másico inicial real del gas ($\dot{\boldsymbol{m}}_{\boldsymbol{i}}$)	30197.32	kg/h

A.2 ANÁLISIS DE GASES DE COMBUSTIÓN PROMEDIO

Para el diseño del recuperador de calor se emplearan los valores promedios de todos los parámetros que se ha determinado con el análisis de gases, el cálculo de los mismos se encuentran resumidos en la siguiente tabla.

TABLA A.10 Valores promedios considerados para el diseño.

|	Unidad	Generador 3	Generador 4	Generador 6	Promedio
Flujo volumétrico de gas seco $(\dot{v}_{gsf})$	m^3/h	23787,20	24210,10	24459,70	24152,3
Temperatura del gas (T_g)	℃	441,10	428,20	454,90	441,4
Presión barométrica (P)	mm Hg	572,25	572,25	567,45	570,7
Humedad del gas (H_g)	%	4,03	4,54	3,70	4,1
Monóxido de carbono (CO)	ppm	246,00	202,00	292,00	246,7
Dióxido de carbono (CO_2)	%	7,00	7,00	7,00	7,0
Óxido de azufre (SO_2)	ppm	271,00	235,00	424,00	310,0
Óxidos de nitrógeno (NO_X)	ppm	2013,00	2016,00	1734,00	1921,0
Oxígeno (O_2)	%	10,70	11,60	10,90	11,1

Con los valores de la TABLA A10 obtenemos los valores promedios del flujo volumétrico de gas húmedo inicial $(\dot{v}_{ghi})$, antes de las chimeneas y flujo de gas húmedo final $(\dot{v}_{ghf})$, en la salida de las chimeneas.

TABLA A.11 Valores promedios del flujo de gases secos y húmedos.

Flujo gas seco $(\dot{v}_{gsf})$	24152 m3/h	
Humedad gas (H_g)	4 .1 %	
Flujo gas húmedo final $(\dot{v}_{ghf})$	P = 760 mm Hg	T = 25 ℃
	25182 m^3/h	
Flujo gas húmedo inicial $(\dot{v}_{ghi})$	P = 571 mm Hg	T = 441.1 ℃
	80402 m^3/h	

En la siguiente tabla se tiene el cálculo promedio la composición de los gases utilizando los valores de la TABLA A10.

TABLA A.12 Valores promedios de la composición de los Gases.

Elemento	% Volumen	Xn	Peso molecular [kg/kgmol]	Densidad [kg/m3]	Calor específico [Kcal/kgmol ℃]
H_2O	4,09	0,0409	18,00	0,2307	8,9324
CO	0,02	0,0002	28,00	0,3589	7,4076
CO_2	7,00	0,0700	44,00	0,5640	11,7524
SO_2	0,03	0,0003	64,00	0,8203	10,8910
NO_x	0,19	0,0019	35,33	0,4529	7,8617
O_2	11,07	0,1107	32,00	0,4102	8,0292
N_2	77,60	0,7760	28,00	0,3589	7,1730
TOTAL	100,00	1,0000			

El porcentaje de nitrógeno se calcula como la diferencia para completar el 100 % de la composición volumétrica.

El peso molecular se obtiene de la sumatoria de los pesos atómicos indicados en la tabla periódica de los elementos químicos.

Densidad inicial del gas $(\rho_{gi}) = \sum (X_n \, x \, \rho)$

$$\rho_i = 0.3740 \left[\frac{Kg}{m^3}\right]$$

Peso molecular inicial del gas $(PM_g) = \sum (Xn \, x \, PM)$

$$PM_g = 29.1789 \left[\frac{Kg}{Kgmol}\right]$$

Flujo másico disponible de gas $(F_{mg}) = \dot{v}_{ghi} \, x \, \rho_i$

$$\dot{m}_{hd} = 30070 \left[\frac{Kg}{h}\right]$$

Con la fracción molar $(\boldsymbol{Xn})$ de cada uno de los elementos y su respectivo calor específico $(\boldsymbol{Cp})$ obtenemos el calor específico total del gas$(\boldsymbol{Cp_T})$:

Calor especifico total del gas @ $44.1°C\ y\ 571\ mm\ Hg$:

$$(\ Cp_T\ ) = \frac{\sum(X_n\ x\ C_P)}{PM_g}$$

$$Cp_T = 0.2645 \left[\frac{Kcal}{Kg\ °C}\right]$$

TABLA A.13 Valores promedio de las especificaciones de los gases de combustión

Densidad gas $(\ \boldsymbol{\rho_i})$	0.3740	kg/m3
Flujo másico gas disponible $(\boldsymbol{\dot{m}_{hd}})$	30070	kg/h
Peso molecular gas $(\boldsymbol{PM_g})$	29.1789	kg/kgmol
Calor específico gas $\boldsymbol{Cp})$	0.2645	kcal/kg ℃

BIBLIOGRAFÍA

1. **ASME HANBOOK**; “Metals Properties”; McGraw-Hill; New York, 1954.
2. **AWS;** “Manual de Soldadura”; McGraw-Hill; México; 2000.
3. **CENGEL, Y. A.;** “Termodinámica”; Tomo II; Segunda Edición; McGraw-Hill; México; 1996.
4. **CÓDIGO ASME,** Sección VIII; “Boiler and Pressure Vessel Code”; USA; 1998.
5. Colección **ASHRAE**
6. **FOX, ROBERT, W.;** “Introducción a la Mecánica de Fluidos”; Segunda Edición; McGraw-Hill; México; 1996.
7. **HÉCTOR IZURIETA;** “Transferencia de Calor I”; a.e.p.i.q.; Ecuador; 1990.
8. **INCROPERA, F.;** “Fundamentos de Transferencia de Calor”; Prentice Hall; México; 1999.
9. **KREITH, Bohn**; “Principios de Transferencia de calor”; sexta edición; International Thomson editores; México; 2002
10. **MARKS;** “Manual de Ingeniero Mecánico”; McGraw-Hill; México; 1981.
11. **PERRY;** “Manual del Ingeniero Químico; Sexta Edición; McGraw-Hill; México; 1990.
12. **REPRESENTACIONES Y SERVICIOS DE INGENIERÍA;** “Tablas de Vapor”; México; 1970.
13. **SHIGLEY-MISCHKE**; “Diseño en Ingeniería Mecánica”; 5ª Ed; McGraw-Hill; México; 1989.
14. **DONALD Q**. **KERN**; “Procesos de Transferencia de Calor”; 1ª Ed; McGraw-Hill; México; 1965.
15. **NORMAS TEMA, “**Tubular Exchanger Manufacturers Association”;8ª Ed; Tarrytown, New York; 1999

ANEXOS

ANEXO 1

PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DEL AGUA A PRESIÓN DE SATURACIÓN

Temperatura, T			Densidad, ρ (kg/m³)	Coeficiente de expansión térmica, $\beta \times 10^4$ (1/°K)	Calor específico, c_p (J/kg °K)	Conductancia térmica, k (W/m °K)	Difusividad térmica, $\alpha \times 10^6$ (m²/s)	Viscosidad absoluta, $\mu \times 10^6$ (N s/m²)	Viscosidad cinemática, $\upsilon \times 10^6$ (m²/s)	Número de Prandtl, Pr	$\frac{g\beta}{\nu^2} \times 10^{-9}$ (1/°K m³)
°F	°K	°C	$\times 6.243 \times 10^{-2}$ = (lb$_m$/ft³)	$\times 0.5556$ = (1/R)	$\times 2.388 \times 10^{-4}$ = (Btu/lb$_m$ °F)	$\times 0.5777$ = (Btu/hr ft °F)	$\times 3.874 \times 10^4$ = (ft²/hr)	$\times 0.6720$ = (lb$_m$/ft s)	$\times 3.874 \times 10^4$ = (ft²/hr)		$\times 1.573 \times 10^{-2}$ = (1/R ft³)
32	273	0	999.9	−0.7	4226	0.558	0.131	1794	1.789	13.7	—
41	278	5	1000	—	4206	0.568	0.135	1535	1.535	11.4	—
50	283	10	999.7	0.95	4195	0.577	0.137	1296	1.300	9.5	0.551
59	288	15	999.1	—	4187	0.585	0.141	1136	1.146	8.1	—
68	293	20	998.2	2.1	4182	0.597	0.143	993	1.006	7.0	2.035
77	298	25	997.1	—	4178	0.606	0.146	880.6	0.884	6.1	—
86	303	30	995.7	3.0	4176	0.615	0.149	792.4	0.805	5.4	4.540
95	308	35	994.1	—	4175	0.624	0.150	719.8	0.725	4.8	—
104	313	40	992.2	3.9	4175	0.633	0.151	658.0	0.658	4.3	8.833
113	318	45	990.2	—	4176	0.640	0.155	605.1	0.611	3.9	—
122	323	50	988.1	4.6	4178	0.647	0.157	555.1	0.556	3.55	14.59
167	348	75	974.9	—	4190	0.671	0.164	376.6	0.366	2.23	—
212	373	100	958.4	7.5	4211	0.682	0.169	277.5	0.294	1.75	85.09
248	393	120	943.5	8.5	4232	0.685	0.171	235.4	0.244	1.43	140.0
284	413	140	926.3	9.7	4257	0.684	0.172	201.0	0.212	1.23	211.7
320	433	160	907.6	10.8	4285	0.680	0.173	171.6	0.191	1.10	290.3
356	453	180	886.6	12.1	4396	0.673	0.172	152.0	0.173	1.01	396.5
392	473	200	862.8	13.5	4501	0.665	0.170	139.3	0.160	0.95	517.2
428	493	220	837.0	15.2	4605	0.652	0.167	124.5	0.149	0.90	671.4
464	513	240	809.0	17.2	4731	0.634	0.162	113.8	0.141	0.86	848.5
500	533	260	779.0	20.0	4982	0.613	0.156	104.9	0.135	0.86	1076
536	553	280	750.0	23.8	5234	0.588	0.147	98.07	0.131	0.89	1360
572	573	300	712.5	29.5	5694	0.564	0.132	92.18	0.128	0.98	1766

ANEXO 2

PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DEL AGUA

Línea de Saturación; Intervalo de presión: 0.10 lbf/pulg² a 3208.24 lbf/pulg²

Presión absoluta lbf/pulg² p_s	Temperatura °F t_s	°R T_s	°C	Entalpía específica Btu/lb h_f	h_{fg}	h_g	Entropía específica Btu/lb°R s_f	s_{fg}	s_g	Volumen específico pies³/lb v_f	v_g	Presión absoluta lbf/pulg² p_s
0.10	35.02	494.7	1.7	3.0	1073.8	1076.8	0.0061	2.1705	2.1766	0.01602	2945.5	0.10
0.15	45.44	505.1	7.5	13.5	1067.9	1081.4	0.0271	2.1140	2.1411	0.01602	2004.7	0.15
0.20	53.15	512.8	11.7	21.2	1063.5	1084.7	0.0422	2.0738	2.1160	0.01603	1526.2	0.20
0.25	59.31	519.0	15.2	27.4	1060.1	1087.4	0.0542	2.0425	2.0967	0.01603	1235.5	0.25
0.30	64.48	524.1	18.0	32.5	1057.2	1089.7	0.0641	2.0168	2.0809	0.01604	1039.7	0.30
0.35	68.93	528.6	20.5	37.0	1054.6	1091.6	0.0725	1.9951	2.0676	0.01605	898.64	0.35
0.40	72.87	532.5	22.7	40.9	1052.4	1093.3	0.0799	1.9762	2.0562	0.01606	792.06	0.40
0.45	76.39	536.1	24.7	44.4	1050.4	1094.9	0.0865	1.9595	2.0461	0.01606	708.63	0.45
0.50	79.58	539.3	26.4	47.6	1048.6	1096.3	0.0925	1.9446	2.0370	0.01607	641.50	0.50
0.55	82.51	542.2	28.1	50.5	1047.0	1097.5	0.0979	1.9310	2.0289	0.01608	586.29	0.55
0.60	85.22	544.9	29.6	53.2	1045.5	1098.7	0.1028	1.9186	2.0215	0.01609	540.05	0.60
0.65	87.73	547.4	31.0	55.8	1044.0	1099.8	0.1074	1.9072	2.0146	0.01609	500.76	0.65
0.70	90.09	549.8	32.3	58.1	1042.7	1100.8	0.1117	1.8966	2.0083	0.01610	466.95	0.70
0.75	92.30	552.0	33.5	60.3	1041.4	1101.8	0.1157	1.8868	2.0025	0.01611	437.58	0.75
0.80	94.38	554.1	34.7	62.4	1040.3	1102.7	0.1195	1.8775	1.9970	0.01611	411.69	0.80
0.85	96.36	556.0	35.8	64.4	1039.1	1103.5	0.1230	1.8688	1.9919	0.01612	388.82	0.85
0.90	98.24	557.9	36.8	66.2	1038.1	1104.3	0.1264	1.8606	1.9870	0.01612	368.43	0.90
0.95	100.03	559.7	37.8	68.0	1037.0	1105.1	0.1296	1.8529	1.9825	0.01613	350.12	0.95
1.0	101.74	561.4	38.7	69.7	1036.1	1105.8	0.1326	1.8455	1.9781	0.01614	333.61	1.0
1.1	104.95	564.6	40.5	72.9	1034.2	1107.2	0.1363	1.8318	1.9701	0.01615	304.96	1.1
1.2	107.92	567.6	42.2	75.9	1032.6	1108.5	0.1436	1.8192	1.9628	0.01616	280.97	1.2
1.3	110.68	570.3	43.7	78.7	1031.0	1109.6	0.1484	1.8076	1.9560	0.01617	260.57	1.3
1.4	113.26	572.9	45.1	81.2	1029.5	1110.7	0.1529	1.7969	1.9498	0.01618	243.02	1.4
1.5	115.69	575.4	46.5	83.7	1028.1	1111.8	0.1571	1.7869	1.9440	0.01619	227.74	1.5
1.6	117.98	577.7	47.8	86.0	1026.8	1112.7	0.1611	1.7775	1.9386	0.01620	214.33	1.6
1.7	120.16	579.8	49.0	88.1	1025.5	1113.7	0.1649	1.7687	1.9336	0.01620	202.45	1.7
1.8	122.22	581.9	50.1	90.2	1024.3	1114.5	0.1684	1.7604	1.9288	0.01621	191.85	1.8
1.9	124.19	583.9	51.2	92.2	1023.2	1115.4	0.1718	1.7525	1.9243	0.01622	182.35	1.9
2.0	126.08	585.7	52.3	94.0	1022.1	1116.2	0.1750	1.7450	1.9200	0.01623	173.76	2.0
2.2	129.62	589.3	54.2	97.6	1020.1	1117.6	0.1810	1.7310	1.9121	0.01625	158.88	2.2
2.4	132.89	592.6	56.0	100.8	1018.2	1119.0	0.1866	1.7183	1.9048	0.01626	146.41	2.4
2.6	135.93	595.6	57.7	103.9	1016.4	1120.3	0.1917	1.7065	1.8982	0.01627	135.80	2.6
2.8	138.79	598.5	59.3	106.7	1014.7	1121.5	0.1965	1.6956	1.8921	0.01629	126.67	2.8
3.0	141.47	601.1	60.8	109.4	1013.2	1122.6	0.2009	1.6854	1.8864	0.01630	118.73	3.0
3.2	144.01	603.7	62.2	112.0	1011.7	1123.6	0.2051	1.6759	1.8810	0.01631	111.75	3.2
3.4	146.41	606.1	63.6	114.4	1010.3	1124.6	0.2091	1.6669	1.8760	0.01632	105.57	3.4
3.6	148.70	608.4	64.8	116.6	1008.9	1125.6	0.2129	1.6584	1.8713	0.01634	100.06	3.6
3.8	150.88	610.5	66.0	118.8	1007.6	1126.5	0.2165	1.6504	1.8669	0.01635	95.110	3.8
4.0	152.97	612.6	67.2	120.9	1006.4	1127.3	0.2199	1.6428	1.8626	0.01636	90.643	4.0
4.2	154.97	614.6	68.3	122.9	1005.2	1128.1	0.2231	1.6355	1.8586	0.01637	86.589	4.2
4.4	156.89	616.6	69.4	124.8	1004.1	1128.9	0.2262	1.6286	1.8548	0.01638	82.893	4.4
4.6	158.73	618.4	70.4	126.7	1003.0	1129.7	0.2292	1.6219	1.8512	0.01639	79.509	4.6
4.8	160.52	620.2	71.4	128.5	1001.9	1130.4	0.2321	1.6155	1.8477	0.01640	76.400	4.8
5.0	162.24	621.9	72.4	130.2	1000.9	1131.1	0.2349	1.6094	1.8443	0.01641	73.532	5.0
5.5	166.30	626.0	74.6	134.3	998.5	1132.7	0.2414	1.5951	1.8365	0.01643	67.249	5.5
6.0	170.05	629.7	76.7	138.0	996.2	1134.2	0.2474	1.5820	1.8294	0.01645	61.984	6.0
6.5	173.56	633.2	78.6	141.5	994.1	1135.6	0.2530	1.5699	1.8229	0.01647	57.507	6.5
7.0	176.84	636.5	80.5	144.8	992.1	1136.9	0.2581	1.5587	1.8168	0.01649	53.651	7.0
7.5	179.94	639.6	82.2	147.9	990.2	1138.2	0.2630	1.5482	1.8112	0.01651	50.294	7.5
8.0	182.86	642.5	83.8	150.9	988.4	1139.3	0.2676	1.5384	1.8060	0.01653	47.345	8.0
8.5	185.64	645.3	85.4	153.7	986.8	1140.4	0.2719	1.5292	1.8011	0.01654	44.733	8.5
9.0	188.28	647.9	86.8	156.3	985.1	1141.4	0.2760	1.5204	1.7964	0.01656	42.402	9.0
9.5	190.80	650.5	88.2	158.8	983.6	1142.4	0.2799	1.5121	1.7920	0.01658	40.310	9.5
10	193.21	652.9	89.6	161.3	982.1	1142.3	0.2836	1.5043	1.7879	0.01659	38.420	10
11	197.75	657.4	92.1	165.8	979.3	1145.1	0.2906	1.4896	1.7802	0.01662	35.142	11
12	201.96	661.6	94.4	170.1	976.6	1146.7	0.2970	1.4762	1.7731	0.01665	32.394	12
13	205.88	665.6	96.6	174.0	974.2	1148.2	0.3029	1.4638	1.7667	0.01668	30.057	13
14	209.57	669.2	98.6	177.7	971.9	1149.6	0.3085	1.4522	1.7607	0.01670	28.043	14
14.696	212.00	671.7	100.0	180.2	970.3	1150.5	0.3121	1.4447	1.7568	0.01672	26.799	14.69
15	213.04	672.7	100.6	181.2	969.7	1150.9	0.3137	1.4415	1.7552	0.01673	26.291	15
16	216.32	676.0	102.4	184.5	967.6	1152.1	0.3186	1.4314	1.7500	0.01675	24.750	16
17	219.44	679.1	104.1	187.7	965.6	1153.2	0.3232	1.4218	1.7451	0.01677	23.385	17
18	222.41	682.1	105.8	190.7	963.6	1154.3	0.3276	1.4129	1.7405	0.01679	22.168	18
19	225.25	684.9	107.4	193.5	961.8	1155.3	0.3318	1.4043	1.7361	0.01681	21.074	19
20	227.97	687.6	108.9	196.3	960.0	1156.3	0.3358	1.3962	1.7320	0.01683	20.087	20

ANEXO 3

VALORES DEL COEFICIENTE C_{sf} PARA VARIAS COMBINACIONES DE LÍQUIDO-SUPERFICIE

Combinaciones fluido-superficie de calentamiento	C_{sf}
Agua sobre cobre rayado [16][a]	0.0068
Agua sobre cobre lijado [16]	0.0128
Agua-cobre [21]	0.0130
Agua sobre cobre lijado, tratado con parafina [16]	0.0147
Agua-latón [23]	0.0060
Agua sobre acero inoxidable recubierto con latón [16]	0.0058
Agua sobre acero inoxidable desbastado y pulido [16]	0.0080
Agua sobre acero inoxidable químicamente atacado [16]	0.0133
Agua sobre acero inoxidable mecánicamente pulido [16]	0.0132
Agua-platino [17]	0.0130
n-Pentano sobre cobre pulido [16]	0.0049
n-Pentano sobre cobre lijado [16]	0.0074
n-Pentano sobre cobre pulido [16]	0.0154
n-Pentano sobre níquel pulido [16]	0.0127
n Pentano-cromo [22]	0.0150
Alcohol isopropílico-cobre [21]	0.00225
Alcohol *n*-butílico-cobre [21]	0.00305
Alcohol etílico-cromo [22]	0.0027
Tetracloruro de carbono sobre cobre lijado [16]	0.0070
Tetracloruro de carbono-cobre [21]	0.0130
Benceno-cromo [22]	0.0100
K_2CO_3-Cobre al 50% [21]	0.00275
K_2CO_3-Cobre al 35% [21]	0.0054

ANEXO 4
TENSIÓN SUPERFICIAL ENTRE LÍQUIDO Y VAPOR EN AGUA

TABLA 10.2 Tensión superficial entre líquido y vapor en agua

Tensión superficial $\sigma(\times 10^3$ N/m)	Temperatura de saturación °C
75.5	0
72.9	20
69.5	40
66.1	60
62.7	80
58.9	100
48.7	150
37.8	200
26.1	250
14.3	300
3.6	350

Fuente: N.B. Vargaftik, *Tables on the Thermophysical Properties of Liquids and Gases*, 2a. ed., Hemisphere, Washington, D.C., 1975, pág. 53.

ANEXO 5

CARACTERÍSTICAS DE LA TUBERÍA

TUVAL

Llama ahora: (33) 36.66.06.46
ventas@tuval.com.mx

MILL TEST CERTIFICATE (EN 10204-3.1)

Page 1/1
INVOICE No 09TDS806 ORDER No 943
CERTIFICATE NUMBER 0982974-0885

Product SEAMLESS BOILER TUBE
Specification DIN 17175 material ST35 8/I

Total	2233 Pcs	30 Bundles	46,040 KG	Packing in Bundles

No	Grade	Heat No	Batch No	Size MM	PCS	Bundles	Weight KG	Chemical Composition % C	Mn	S	P	Si	Cr	Ni	Cu
1	ST35.8	92505527	XQ-0909-469	63.5*2.9*5900	893	15	22,218	0.09	0.52	0.006	0.006	0.21	0.05	0.03	0.11
2	ST35.8	09-110567	XQ-0909-565	50.8*2.6*5900	1340	15	23,822	0.11	0.51	0.005	0.005	0.22	0.05	0.03	0.12
3	ST35.8	09-110568	XQ-0909-642	76.2*2.9*5900	1260	15	22,359	0.10	0.50	0.005	0.005	0.21	0.05	0.03	0.12

No	Mechanical Properties: Yeld Point	Tensil Point	Elongation	Hardness	Technological Properties: Flattening Test		Flaring Test	Nondestructive Test: ET	UT	Surface Quality: IN	OUT	Dimens. Tolerance: OD	WT
1	275/270	415/410	42/42	/	GOOD	GOOD	GOOD	GOOD	/	GOOD	GOOD	GOOD	GOOD
2	280/275	420/410	43/40	/	GOOD	GOOD	GOOD	GOOD	/	GOOD	GOOD	GOOD	GOOD
3	280/275	415/410	42/40	/	GOOD	GOOD	GOOD	GOOD	/	GOOD	GOOD	GOOD	GOOD

Remarks

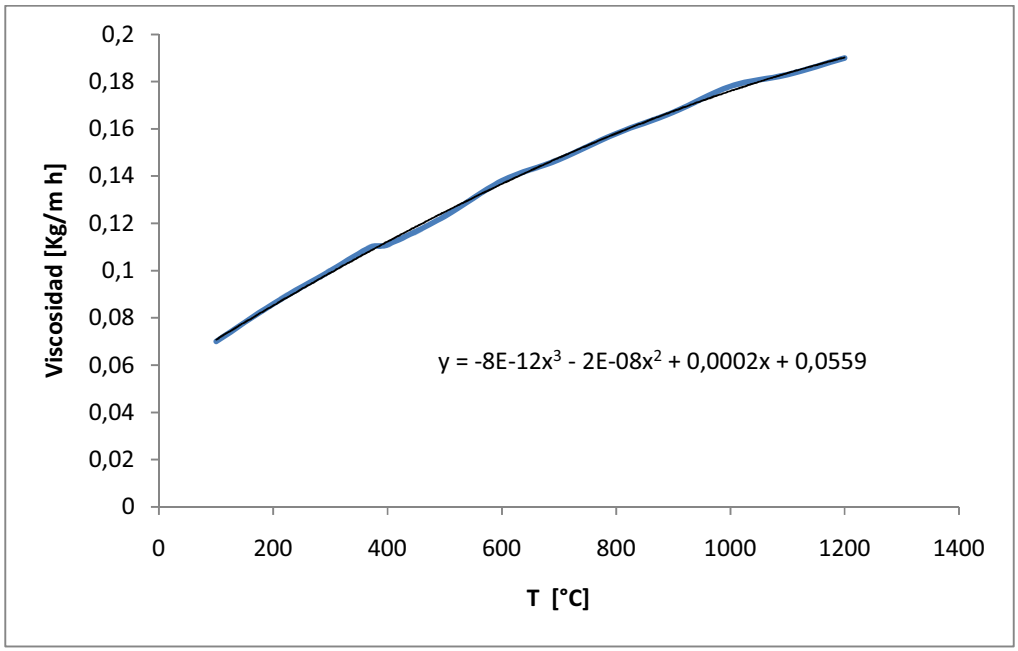
TUVAL
TUBERÍAS DEL ECUADOR
STAMPER

Prepared by	Shaipeng Ruai
Checked by	Roughui Zhou
Date	28-jul-10

ANEXO 6

PROPIEDADES DE LOS GASES DE ESCAPE

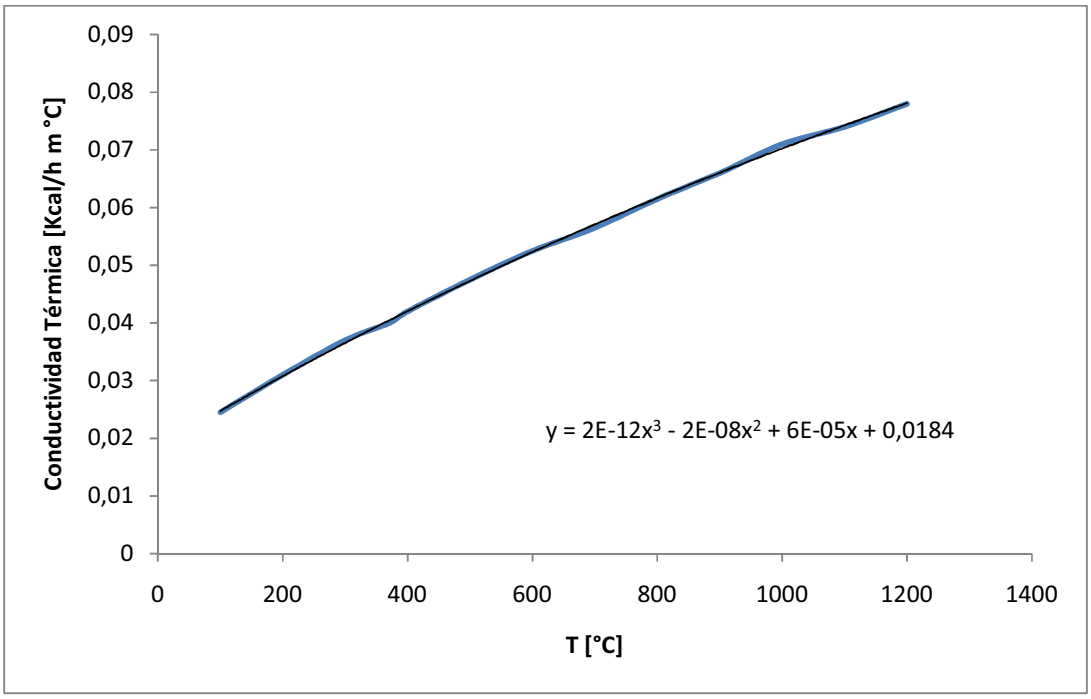
VISCOSIDAD VS. TEMPERATURA



ANEXO 7

PROPIEDADES DE LOS GASES DE ESCAPE

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA VS. TEMPERATURA



ANEXO 8

LÍNEAS DE PROGRAMACIÓN

```
Public Class Form1
    Dim at, a, b, c, d, f, g, m, o, ñ, efectividad, tubos, tubos1,
tubos2, densidad, cpx, cc, ch, caudal, qs, qev, LMT1, LMT2, LMTF, ti,
tmi, cp1, cp2, deltat1s, deltat2s, deltat1e, deltat2e, qmax, qmax1, cmax,
cmin, cmin1, tmh, area, calor, calor1, deltat, tpared, hi, cp,
viscocidad, viscocidadp, k, re, pr, v, de, di, nu, hb, U, LMT, deltat1,
deltat2, hfg, NTU, mh, mht

    Private Sub Label2_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
    System.EventArgs)

    End Sub

    Private Sub Label4_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
    System.EventArgs)

    End Sub

    Private Sub TextBox3_TextChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal
    e As System.EventArgs) Handles TextBox3.TextChanged

    End Sub

    Private Sub Button1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
    System.EventArgs) Handles Button1.Click
        'CALOR REQUERIDO PARA LA GENERACION DE VAPOR'
        ñ = (Val(TextBox7.Text) * Val(TextBox9.Text)) *
         (Val(TextBox5.Text) - Val(TextBox6.Text)) + (Val(TextBox7.Text) *
         Val(TextBox8.Text))
        TextBox4.Text = Format(CDbl(ñ), "0.00")
        'CALCULO DE LA TEMPERATURA A LA SALIDA DE LOS GASES DE ESCAPE'
        b = 50
        a = (Val(TextBox1.Text) + b) * 0.5
        tmh = a + 273
        f = ((1704646875000 * tmh ^ 4) + (30189820614583071 * tmh ^ 3) +
         (2199500.6927083028 * 10 ^ 14 * tmh ^ 2) - (65851.205104162756 *
         10 ^ 19)) / (911.8410625 * 10 ^ 18 * tmh ^ 2)
        qmax = ñ / Val(TextBox29.Text)
        cmin = qmax / (Val(TextBox1.Text) - Val(TextBox6.Text))
        mh = cmin / f
        d = Val(TextBox1.Text) - Val((TextBox4.Text) / (mh * f))
        Do While (d - b) ^ 2 > 0.000001
            c = (d + b) / 2
            b = c
            a = (Val(TextBox1.Text) + b) * 0.5
            tmh = a + 273
            f = ((1704646875000 * tmh ^ 4) + (30189820614583071 * tmh ^
            3) + (2199500.6927083028 * 10 ^ 14 * tmh ^ 2) -
```

```
    (65851.205104162756 * 10 ^ 19)) / (911.8410625 * 10 ^ 18 *
    tmh ^ 2)
    mh = cmin / f
    d = Val(TextBox1.Text) - (Val(TextBox4.Text) / (mh * f))
Loop

'CALCULO DEL AREA DE TRANSFERENCIA DE CALOR'
NTU = (Math.Log(1 - Val(TextBox29.Text))) * (-1)
area = (cmin * NTU) / Val(TextBox30.Text)

'CALCULO DEL NUMERO DE TUBOS'
di = 0.0704
de = 0.0762
tubos = area / (Math.PI * de * Val(TextBox13.Text))
tubos1 = tubos + 0.5
tubos2 = Math.Round(tubos1)

'CALCULO DE LA TEMPERATURA DE LA PARED'
hfg = Val(TextBox8.Text) * 4186
calor = Val(TextBox4.Text) / area
calor1 = calor * 1.162999
g = (calor1 / (Val(TextBox18.Text) * hfg))
m = (Val(TextBox16.Text) / (9.8 * (Val(TextBox14.Text) -
Val(TextBox15.Text)))) ^ 0.5
o = (hfg * Val(TextBox17.Text)) / Val(TextBox12.Text)
deltat = Val(TextBox19.Text) * o * (g * m) ^ 0.33
tpared = deltat + Val(TextBox5.Text)

'CALCULO DEL COEFICIENTE DE CONVECCION INTERNO'
mht = mh / tubos2
cp = f
densidad = 2.0817791763708047 * 10 ^ 21 / (779475 * 10 ^ 13 *
tmh)
viscocidad = (0.000000000126419 * a ^ 3) - (0.000000000000051983
* a ^ 4) - (0.000000138184 * a ^ 2) + (0.000187678 * a) +
0.052745037
viscocidadp = (0.000000000126419 * tpared ^ 3) -
(0.000000000000051983 * tpared ^ 4) - (0.000000138184 * tpared ^
2) + (0.000187678 * tpared) + 0.052745037
k = (0.0000000000484158 * a ^ 3) - (0.0000000000000179051 * a ^
4) - (0.0000000545148 * a ^ 2) + (0.0000771193 * a) + 0.0173243
caudal = mht / densidad
at = (Math.PI * di ^ 2) / 4
v = caudal / (at * 3600)
re = ((densidad * v * di) / viscocidad) * 3600
pr = (viscocidad * cp) / k
nu = (0.027 * re ^ 0.8) * (pr ^ (1 / 3)) * (viscocidad /
viscocidadp) ^ 0.14
hi = (nu * k) / di

'COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR EXTERNO'
hb = calor / deltat

'COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR'
U = 1 / ((1 / (hi * (di / de))) + ((de - di) / (50.6 * (di /
de))) + (1 / hb))
```

```
        'EFECTIVIDAD'
        cmin1 = mh * f
        qmax1 = cmin1 * (Val(TextBox1.Text) - Val(TextBox6.Text))
        efectividad = ñ / qmax1

        'SALIDA DE RESULTADOS'
        TextBox4.Text = Format(CDbl(ñ), "0.00")
        TextBox3.Text = Format(CDbl(d), "0.00")
        TextBox11.Text = Format(CDbl(f), "0.0000")
        TextBox10.Text = Format(CDbl(a), "0.00")
        TextBox2.Text = Format(CDbl(mh), "0.00")
        TextBox20.Text = Format(CDbl(calor1), "0.00")
        TextBox21.Text = Format(CDbl(deltat), "0.00")
        TextBox22.Text = Format(CDbl(tpared), "0.00")
        TextBox23.Text = Format(CDbl(hi), "0.00")
        TextBox24.Text = Format(CDbl(hb), "0.00")
        TextBox25.Text = Format(CDbl(U), "0.00")
        TextBox26.Text = Format(CDbl(area), "0.00")
        TextBox27.Text = Format(CDbl(tubos2), "0")
        TextBox28.Text = Format(CDbl(efectividad), "0.00")

    End Sub

    Private Sub TextBox1_Validated(ByVal sender As Object, ByVal e As
    System.EventArgs) Handles TextBox1.Validated
        If Val(TextBox1.Text) < 100 Or Val(TextBox1.Text) > 1200 Then
            MsgBox("FAVOR INGRESAR VALOR ENTRE 100 Y 1200")
        End If
    End Sub

    Private Sub TextBox29_Validated(ByVal sender As Object, ByVal e As
    System.EventArgs) Handles TextBox29.Validated
        If Val(TextBox29.Text) < 0 Or Val(TextBox29.Text) > 1 Then
            MsgBox("FAVOR INGRESAR VALOR ENTRE 0 Y 1")
        End If
    End Sub
    Private Sub TextBox1_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As
     System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) _
Handles TextBox1.KeyPress
        If e.KeyChar = Convert.ToChar(13) Then
            Me.Button1.Focus()
        ElseIf e.KeyChar = Convert.ToChar(8) Then ' se pulsó Retroceso
            e.Handled = False
        ElseIf (e.KeyChar = ","c) Then ' no permite el punto
            e.Handled = True ' Handled = True, no permite; = False, si
        permite...
        ElseIf (e.KeyChar = "."c) Then
            Dim ctrl As TextBox = DirectCast(sender, TextBox)
            If (ctrl.Text.IndexOf("."c) <> -1) Then ' sólo puede haber un
        punto
                e.Handled = True
            End If
        ElseIf (e.KeyChar < "0"c Or e.KeyChar > "9"c) Then
            ' desechar los caracteres que no son dígitos
            e.Handled = True
```

```
        End If
    End Sub

    Private Sub TextBox5_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As
    System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) _
Handles TextBox5.KeyPress
        If e.KeyChar = Convert.ToChar(13) Then
            Me.Button1.Focus()
        ElseIf e.KeyChar = Convert.ToChar(8) Then ' se pulsó Retroceso
            e.Handled = False
        ElseIf (e.KeyChar = ","c) Then ' no permite el punto
            e.Handled = True ' Handled = True, no permite; = False, si
        permite...
        ElseIf (e.KeyChar = "."c) Then
            Dim ctrl As TextBox = DirectCast(sender, TextBox)
            If (ctrl.Text.IndexOf("."c) <> -1) Then ' sólo puede haber un
        punto
                e.Handled = True
            End If
        ElseIf (e.KeyChar < "0"c Or e.KeyChar > "9"c) Then
            ' desechar los caracteres que no son dígitos
            e.Handled = True
        End If
    End Sub
    Private Sub TextBox6_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As
     System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) _
Handles TextBox6.KeyPress
        If e.KeyChar = Convert.ToChar(13) Then
            Me.Button1.Focus()
        ElseIf e.KeyChar = Convert.ToChar(8) Then ' se pulsó Retroceso
            e.Handled = False
        ElseIf (e.KeyChar = ","c) Then ' no permite el punto
            e.Handled = True ' Handled = True, no permite; = False, si
        permite...
        ElseIf (e.KeyChar = "."c) Then
            Dim ctrl As TextBox = DirectCast(sender, TextBox)
            If (ctrl.Text.IndexOf("."c) <> -1) Then ' sólo puede haber un
        punto
                e.Handled = True
            End If
        ElseIf (e.KeyChar < "0"c Or e.KeyChar > "9"c) Then
            ' desechar los caracteres que no son dígitos
            e.Handled = True
        End If
    End Sub
    Private Sub TextBox7_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As
     System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) _
Handles TextBox7.KeyPress
        If e.KeyChar = Convert.ToChar(13) Then
            Me.Button1.Focus()
        ElseIf e.KeyChar = Convert.ToChar(8) Then ' se pulsó Retroceso
            e.Handled = False
        ElseIf (e.KeyChar = ","c) Then ' no permite el punto
            e.Handled = True ' Handled = True, no permite; = False, si
        permite...
        ElseIf (e.KeyChar = "."c) Then
```

```
            Dim ctrl As TextBox = DirectCast(sender, TextBox)
            If (ctrl.Text.IndexOf("."c) <> -1) Then ' sólo puede haber un
        punto
                e.Handled = True
            End If
        ElseIf (e.KeyChar < "0"c Or e.KeyChar > "9"c) Then
            ' desechar los caracteres que no son dígitos
            e.Handled = True
        End If
    End Sub
    Private Sub TextBox8_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As
     System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) _
Handles TextBox8.KeyPress
        If e.KeyChar = Convert.ToChar(13) Then
            Me.Button1.Focus()
        ElseIf e.KeyChar = Convert.ToChar(8) Then ' se pulsó Retroceso
            e.Handled = False
        ElseIf (e.KeyChar = ","c) Then ' no permite el punto
            e.Handled = True ' Handled = True, no permite; = False, si
        permite...
        ElseIf (e.KeyChar = "."c) Then
            Dim ctrl As TextBox = DirectCast(sender, TextBox)
            If (ctrl.Text.IndexOf("."c) <> -1) Then ' sólo puede haber un
        punto
                e.Handled = True
            End If
        ElseIf (e.KeyChar < "0"c Or e.KeyChar > "9"c) Then
            ' desechar los caracteres que no son dígitos
            e.Handled = True
        End If
    End Sub
    Private Sub TextBox9_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As
     System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) _
Handles TextBox9.KeyPress
        If e.KeyChar = Convert.ToChar(13) Then
            Me.Button1.Focus()
        ElseIf e.KeyChar = Convert.ToChar(8) Then ' se pulsó Retroceso
            e.Handled = False
        ElseIf (e.KeyChar = ","c) Then ' no permite el punto
            e.Handled = True ' Handled = True, no permite; = False, si
     permite...
        ElseIf (e.KeyChar = "."c) Then
            Dim ctrl As TextBox = DirectCast(sender, TextBox)
            If (ctrl.Text.IndexOf("."c) <> -1) Then ' sólo puede haber un
     punto
                e.Handled = True
            End If
        ElseIf (e.KeyChar < "0"c Or e.KeyChar > "9"c) Then
            ' desechar los caracteres que no son dígitos
            e.Handled = True
        End If
    End Sub
    Private Sub TextBox13_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As
     System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) _
Handles TextBox13.KeyPress
        If e.KeyChar = Convert.ToChar(13) Then
```

```
            Me.Button1.Focus()
        ElseIf e.KeyChar = Convert.ToChar(8) Then ' se pulsó Retroceso
            e.Handled = False
        ElseIf (e.KeyChar = ","c) Then ' no permite el punto
            e.Handled = True ' Handled = True, no permite; = False, si
        permite...
        ElseIf (e.KeyChar = "."c) Then
            Dim ctrl As TextBox = DirectCast(sender, TextBox)
            If (ctrl.Text.IndexOf("."c) <> -1) Then ' sólo puede haber un
        punto
                e.Handled = True
            End If
        ElseIf (e.KeyChar < "0"c Or e.KeyChar > "9"c) Then
            ' desechar los caracteres que no son dígitos
            e.Handled = True
        End If
    End Sub
    Private Sub TextBox29_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As
     System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) _
Handles TextBox29.KeyPress
        If e.KeyChar = Convert.ToChar(13) Then
            Me.Button1.Focus()
        ElseIf e.KeyChar = Convert.ToChar(8) Then ' se pulsó Retroceso
            e.Handled = False
        ElseIf (e.KeyChar = ","c) Then ' no permite el punto
            e.Handled = True ' Handled = True, no permite; = False, si
        permite...
        ElseIf (e.KeyChar = "."c) Then
            Dim ctrl As TextBox = DirectCast(sender, TextBox)
            If (ctrl.Text.IndexOf("."c) <> -1) Then ' sólo puede haber un
        punto
                e.Handled = True
            End If
        ElseIf (e.KeyChar < "0"c Or e.KeyChar > "9"c) Then
            ' desechar los caracteres que no son dígitos
            e.Handled = True
        End If
    End Sub
    Private Sub TextBox30_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As
     System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) _
Handles TextBox30.KeyPress
        If e.KeyChar = Convert.ToChar(13) Then
            Me.Button1.Focus()
        ElseIf e.KeyChar = Convert.ToChar(8) Then ' se pulsó Retroceso
            e.Handled = False
        ElseIf (e.KeyChar = ","c) Then ' no permite el punto
            e.Handled = True ' Handled = True, no permite; = False, si
        permite...
        ElseIf (e.KeyChar = "."c) Then
            Dim ctrl As TextBox = DirectCast(sender, TextBox)
            If (ctrl.Text.IndexOf("."c) <> -1) Then ' sólo puede haber un
        punto
                e.Handled = True
            End If
        ElseIf (e.KeyChar < "0"c Or e.KeyChar > "9"c) Then
            ' desechar los caracteres que no son dígitos
```

```
            e.Handled = True
        End If
    End Sub
    Private Sub TextBox12_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As
        System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) _
Handles TextBox12.KeyPress
        If e.KeyChar = Convert.ToChar(13) Then
            Me.Button1.Focus()
        ElseIf e.KeyChar = Convert.ToChar(8) Then ' se pulsó Retroceso
            e.Handled = False
        ElseIf (e.KeyChar = ","c) Then ' no permite el punto
            e.Handled = True ' Handled = True, no permite; = False, si
        permite...
        ElseIf (e.KeyChar = "."c) Then
            Dim ctrl As TextBox = DirectCast(sender, TextBox)
            If (ctrl.Text.IndexOf("."c) <> -1) Then ' sólo puede haber un
        punto
                e.Handled = True
            End If
        ElseIf (e.KeyChar < "0"c Or e.KeyChar > "9"c) Then
            ' desechar los caracteres que no son dígitos
            e.Handled = True
        End If
    End Sub
    Private Sub TextBox14_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As
     System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) _
Handles TextBox14.KeyPress
        If e.KeyChar = Convert.ToChar(13) Then
            Me.Button1.Focus()
        ElseIf e.KeyChar = Convert.ToChar(8) Then ' se pulsó Retroceso
            e.Handled = False
        ElseIf (e.KeyChar = ","c) Then ' no permite el punto
            e.Handled = True ' Handled = True, no permite; = False, si
        permite...
        ElseIf (e.KeyChar = "."c) Then
            Dim ctrl As TextBox = DirectCast(sender, TextBox)
            If (ctrl.Text.IndexOf("."c) <> -1) Then ' sólo puede haber un
        punto
                e.Handled = True
            End If
        ElseIf (e.KeyChar < "0"c Or e.KeyChar > "9"c) Then
            ' desechar los caracteres que no son dígitos
            e.Handled = True
        End If
    End Sub
    Private Sub TextBox15_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As
     System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) _
Handles TextBox15.KeyPress
        If e.KeyChar = Convert.ToChar(13) Then
            Me.Button1.Focus()
        ElseIf e.KeyChar = Convert.ToChar(8) Then ' se pulsó Retroceso
            e.Handled = False
        ElseIf (e.KeyChar = ","c) Then ' no permite el punto
            e.Handled = True ' Handled = True, no permite; = False, si
        permite...
        ElseIf (e.KeyChar = "."c) Then
```

```
            Dim ctrl As TextBox = DirectCast(sender, TextBox)
            If (ctrl.Text.IndexOf("."c) <> -1) Then ' sólo puede haber un
        punto
                e.Handled = True
            End If
        ElseIf (e.KeyChar < "0"c Or e.KeyChar > "9"c) Then
            ' desechar los caracteres que no son dígitos
            e.Handled = True
        End If
    End Sub
    Private Sub TextBox16_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As
     System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) _
Handles TextBox16.KeyPress
        If e.KeyChar = Convert.ToChar(13) Then
            Me.Button1.Focus()
        ElseIf e.KeyChar = Convert.ToChar(8) Then ' se pulsó Retroceso
            e.Handled = False
        ElseIf (e.KeyChar = ","c) Then ' no permite el punto
            e.Handled = True ' Handled = True, no permite; = False, si
        permite...
        ElseIf (e.KeyChar = "."c) Then
            Dim ctrl As TextBox = DirectCast(sender, TextBox)
            If (ctrl.Text.IndexOf("."c) <> -1) Then ' sólo puede haber un
        punto
                e.Handled = True
            End If
        ElseIf (e.KeyChar < "0"c Or e.KeyChar > "9"c) Then
            ' desechar los caracteres que no son dígitos
            e.Handled = True
        End If
    End Sub
    Private Sub TextBox17_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As
     System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) _
Handles TextBox17.KeyPress
        If e.KeyChar = Convert.ToChar(13) Then
            Me.Button1.Focus()
        ElseIf e.KeyChar = Convert.ToChar(8) Then ' se pulsó Retroceso
            e.Handled = False
        ElseIf (e.KeyChar = ","c) Then ' no permite el punto
            e.Handled = True ' Handled = True, no permite; = False, si
        permite...
        ElseIf (e.KeyChar = "."c) Then
            Dim ctrl As TextBox = DirectCast(sender, TextBox)
            If (ctrl.Text.IndexOf("."c) <> -1) Then ' sólo puede haber un
        punto
                e.Handled = True
            End If
        ElseIf (e.KeyChar < "0"c Or e.KeyChar > "9"c) Then
            ' desechar los caracteres que no son dígitos
            e.Handled = True
        End If
    End Sub
    Private Sub TextBox18_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As
     System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) _
Handles TextBox18.KeyPress
        If e.KeyChar = Convert.ToChar(13) Then
```

```
            Me.Button1.Focus()
        ElseIf e.KeyChar = Convert.ToChar(8) Then ' se pulsó Retroceso
            e.Handled = False
        ElseIf (e.KeyChar = ","c) Then ' no permite el punto
            e.Handled = True ' Handled = True, no permite; = False, si
        permite...
        ElseIf (e.KeyChar = "."c) Then
            Dim ctrl As TextBox = DirectCast(sender, TextBox)
            If (ctrl.Text.IndexOf("."c) <> -1) Then ' sólo puede haber un
        punto
                e.Handled = True
            End If
        ElseIf (e.KeyChar < "0"c Or e.KeyChar > "9"c) Then
            ' desechar los caracteres que no son dígitos
            e.Handled = True
        End If
    End Sub
    Private Sub TextBox19_KeyPress(ByVal sender As Object, ByVal e As
     System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) _
Handles TextBox19.KeyPress
        If e.KeyChar = Convert.ToChar(13) Then
            Me.Button1.Focus()
        ElseIf e.KeyChar = Convert.ToChar(8) Then ' se pulsó Retroceso
            e.Handled = False
        ElseIf (e.KeyChar = ","c) Then ' no permite el punto
            e.Handled = True ' Handled = True, no permite; = False, si
        permite...
        ElseIf (e.KeyChar = "."c) Then
            Dim ctrl As TextBox = DirectCast(sender, TextBox)
            If (ctrl.Text.IndexOf("."c) <> -1) Then ' sólo puede haber un
        punto
                e.Handled = True
            End If
        ElseIf (e.KeyChar < "0"c Or e.KeyChar > "9"c) Then
            ' desechar los caracteres que no son dígitos
            e.Handled = True
        End If
    End Sub
End Class
```

ANEXO 9

CONSUMO DE COMBUSTIBLE

EMPRESA ELÉCTRICA QUITO S.A.

DETALLE MENSUAL DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE DIESEL CORRESPONDIENTE AL AÑO 2009

(Datos tomados del Reporte de Producción y Consumo Mensual)

MES	COMSUMO
ENERO	18693
FEBRERO	19091
MARZO	18693
ABRIL	19110
MAYO	18693
JUNIO	19110
JULIO	19319
AGOSTO	19130
SEPTIEMBRE	19110
OCTUBRE	19663
NOVIEMBRE	19110
DICIEMBRE	19110
PROMEDIO	19069
TOTAL	228828 GALONES/AÑO

CONSUMO ANUAL DE DIESEL

ANEXO 10

ANÁLISIS DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN

Unidad N° 3.

EMPRESA ELÉCTRICA QUITO S.A.

ACREDITACION

ENSAYOS
Nº OAE LE2 C 04-001

INFORME CESAQ-PUCE No. 5760-2
Página 1 de 3

CESAQ - PUCE
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
CENTRO DE SERVICIOS AMBIENTALES Y QUÍMICOS
INFORME DE ANÁLISIS No. 5760-2

Datos generales:
Cliente: EMPRESA ELÉCTRICA - CENTRAL TERMOELÉCTRICA GUALBERTO HERNÁNDEZ
Dirección: Guangopolo
Telefono: 3964-700 ext. 2338
Tipo de muestra: FUENTE FIJA GENERADOR

Toma de Muestra:(No cubierta por las acreditaciones)
FECHA DE MUESTREO: 20/04/2009
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA: C.T. GUALBERTO HERNÁNDEZ. FUENTE 2 GENERADOR 3
MUESTREADO POR: PPERSONAL TÉCNICO CESAQ-PUCE
FECHA RECEPCIÓN 27/04/2009

Norma de Comparación: RES.0002.DMA2008.TABLA4.LÍMIT.MÁX.PLANT.TERMOELÉCTR.C.E.BASE SECA 25°C Y11%O2.GENERAD.CAP.MAYOR 750KW Y CRUD.LIVIAN

Parámetros analizados:

AA	PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDADES	RESULTADO	NORMA	OBSERVACIONES
	RUIDO Y EMISIONES					
*	Material particulado (MP) (mg/Nm3)	EPA 5	mg/Nm3	51,80	150,00	CUMPLE
*	Flujo de gas seco (m3/h)		m3/h	23787,20	NA	
*	Velocidad promedio (m/s)		m/s	55,61	NA	
*	Humedad del gas (%)		%	4,03	NA	
	Volumen del muestreo seco a CN(m3)		m3	0,7669	NA	
*	Tiempo del muestreo (min)		min	72	NA	
*	Peso del particulado (mg)		mg	40,90	NA	
*	Temperatura chimenea		°C	441,1	NA	
*	Presion Barométrica		mmHg	572,25	NA	
*	Presion Estatica		mmHg		NA	
*	Presion Dinámica		mmHg	6,26	NA	
*	Diametro interno boquilla de succión		mm	4,00	NA	
2	Monoxido de carbono (CO) (ppm)	CP-PEE-E001	ppm	246	NA	
*	Dioxido de carbono (CO2)	CP-PEE-E001	%	7	NA	
2	Oxido de azufre (SO2) (ppm)	CP-PEE-E001	ppm	271	NA	

Fecha de Realización del Ensayo
La muestra ingresa al CESAQ-PUCE el dia, 27 de abril del 2009. Los análisis fueron realizados en el periodo comprendido entre el 22 de abril del 2009 y el 4 de mayo del 2009.

EMPRESA ELECTRICA QUITO S.A.

ACREDITACION

ENSAYOS
Nº OAE LE2 C 04-001

INFORME CESAQ-PUCE No. 5760-2
Página 2 de 3

CESAQ - PUCE
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
CENTRO DE SERVICIOS AMBIENTALES Y QUÍMICOS
INFORME DE ANÁLISIS No. 5760-2

Datos generales:

Toma de Muestra (No cubierta por las acreditaciones)

FECHA DE MUESTREO: 20/04/2009
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA: C.T. GUALBERTO HERNÁNDEZ. FUENTE 2 GENERADOR 3
MUESTREADO POR: PPERSONAL TÉCNICO CESAQ-PUCE
FECHA RECEPCION 27/04/2009

Norma de Comparación RES.0002.DMA2008,TABLA4.LÍMIT.MÁX.PLANT.TERMOELÉCTR.C.E.BASE SECA 25°C Y11%O2.GENERAD.CAP.MAYOR 750KW Y CRUD.LIVIAN

Parámetros analizados:

AA	PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDADES	RESULTADO	NORMA	OBSERVACIONES
2	Oxidos de nitrógeno (NOX) (ppm)	CP-PEE-E001	ppm	2013	NA	
2	Monoxido de carbono (CO) (mg/Nm3)	CP-PEE-E001	mg/Nm3	275	500	CUMPLE
2	Oxido de azufre (SO2) (mg/Nm3)	CP-PEE-E001	mg/Nm3	689	2500	CUMPLE
2	Oxidos de nitrógeno (NOX) (mg/Nm3)	CP-PEE-E001	mg/Nm3	3673	1900	NO CUMPLE
*	Oxigeno	EPA 3A	%	10,7	NA	
*	Tipo de Fuente			GENERADOR	NA	
*	Potencia (hp, kw, BTU)		MW	6	NA	
*	Marca			MEIDEN	NA	
*	Número de Serie			568659R3	NA	
*	Comoustible			CRUDO REDUCIDO	NA	
*	Tiempo de funcionamiento (horas/día)		horas/día	16 HORAS	NA	
*	Altura chimenea		m	2,25	NA	
*	Diametro chimenea		m	0,76	NA	
*	Ultima Perturbacion chimenea		m	1,69	NA	
*	Siguiente Perturbacion chimenea		m	0,56	NA	
*	Número de puntos muestreados (Transecto)			24	NA	

Fecha de Realización del Ensayo

La muestra ingresa al CESAQ-PUCE el día, 27 de abril del 2009. Los análisis fueron realizados en el periodo comprendido entre el 22 de abril del 2009 y el 4 de mayo del 2009.

EMPRESA ELECTRICA QUITO S.A.

ACREDITACION

ENSAYOS
Nº OAE LE2 C 04-001

INFORME CESAQ-PUCE No. 5760-2
Página 3 de 3

NOTAS

U	Incertidumbre	NV	No Viable
N.E.	No. Evaluable	NA	No Aplica
N.D.	No. Detectado	A.N.R.	Analisis No Realizado
< =	Menor a	La identificación de la muestra es dada por el cliente	

Los análisis microbiológicos son realizados en Diserlab - PUCE

ACREDITACIONES

AA	ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
1	ENAC No. 415/LE 929
2	OAE LE2 C 04-001
*	Los ensayos marcados no están incuidos en el alcance de acreditación OAE LE2 C 04-001
(*)	Los ensayos marcados no están incuidos en el alcance de acreditación ENAC 415/LE 929

OBSERVACIONES ANALITICAS

CORREGIDO AL 11% DE OXIGENO A CONDICIONES ESTANDAR

Responsable

Mtr. Alexandra Hidalgo
DIRECTORA TECNICA CESAQ-PUCE

Quito, 6 de mayo del 2009

UNIDAD N° 4.

ACREDITACION

ENSAYOS
Nº OAE LE2 C 04-001

INFORME CESAQ-PUCE No. 5760-3
Página 1 de 3

CESAQ - PUCE
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
CENTRO DE SERVICIOS AMBIENTALES Y QUÍMICOS
INFORME DE ANÁLISIS No. 5760-3

Datos generales:
Cliente: EMPRESA ELÉCTRICA - CENTRAL TERMOELÉCTRICA GUALBERTO HERNÁNDEZ
Dirección: Guangopolo
Telefono: 3964-700 ext. 2335
Tipo de muestra: FUENTE FIJA GENERADOR

Toma de Muestra: (No cubierta por las acreditaciones)
FECHA DE MUESTREO: 20/04/2009
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA: C.T. GUALBERTO HERNÁNDEZ. FUENTE 3 GENERADOR 4
MUESTREADO POR: PPERSONAL TECNICO CESAQ-PUCE
FECHA RECEPCION: 27/04/2009

Norma de Comparación: RES 0002,DMA2009,TABLA4.LÍMIT.MÁX.PLANT.TERMOELÉCTR.C.E.BASE SECA 25°C Y11%O2 GENERAD CAP.MAYOR 750KW Y CRUD.LIVIAN

Parámetros analizados:

AA	PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDADES	RESULTADO	NORMA	OBSERVACIONES
*	RUIDO Y EMISIONES Material particulado (MP) (mg/Nm3)	EPA 5	mg/Nm3	46,70	150,00	CUMPLE
*	Flujo de gas seco (m3/h)		m3/h	24210,10	NA	
*	Velocidad promedio (m/s)		m/s	55,71	NA	
*	Humedad del gas (%)		%	4,54	NA	
	Volumen del muestreo seco a CN(m3) (25°C) (1atm)		m3	0,7906	NA	
*	Tiempo del muestreo (min)		min	72	NA	
*	Peso de particulado (mg)		mg	36,29	NA	
*	Temperatura chimenea		°C	428,2	NA	
*	Presion Barometrica		mmHg	572,25	NA	
*	Presion Estatica		mmHg		NA	
*	Presion Dinamica		mmHg	8,40	NA	
*	Diametro interno boquilla de succión		mm	4,00	NA	
2	Monóxido de carbono (CO) (ppm)	CP-PEE-E001	ppm	202	NA	
*	Dióxido de carbono (CO2)	CP-PEE-E001	%	7	NA	
2	Oxido de azufre (SO2) (ppm)	CP-PEE-E001	ppm	235	NA	

Fecha de Realización del Ensayo
La muestra ingresa al CESAQ-PUCE el día, 27 de abril del 2009. Los análisis fueron realizados en el periodo comprendido entre el 22 de abril del 2009 y el 4 de mayo del 2009.

ACREDITACION

ENSAYOS
Nº OAE LE2 C 04-001

INFORME CESAQ-PUCE No. 5760-3
Página 2 de 3

CESAQ - PUCE
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
CENTRO DE SERVICIOS AMBIENTALES Y QUÍMICOS
INFORME DE ANÁLISIS No. 5760-3

Datos generales:

Toma de Muestra:(No cubierta por las acreditaciones)
FECHA DE MUESTREO: 20/04/2009
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA: C.T. GUALBERTO HERNÁNDEZ. FUENTE 3 GENERADOR 4
MUESTREADO POR: PPERSONAL TÉCNICO CESAQ-PUCE
FECHA RECEPCIÓN 27/04/2009

Norma de Comparación RES.0002,DMA2008,TABLA4.LÍMIT.MÁX.PLANT.TERMOELÉCTR.C.E.BASE SECA 25°C Y11%O2.GENERAD.CAP.MAYOR 750KW Y CRUD.LIVIAN

Parámetros analizados:

AA	PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDADES	RESULTADO	NORMA	OBSERVACIONES
2	Oxidos de nitrógeno (NOX) (ppm)	CP-PEE-E001	ppm	2016	NA	
2	Monoxido de carbono (CO) (mg/Nm3)	CP-PEE-E001	mg/Nm3	247	500	CUMPLE
2	Oxido de azufre (SO2) (mg/Nm3)	CP-PEE-E001	mg/Nm3	655	2500	CUMPLE
2	Oxidos de nitrógeno (NOX) (mg/Nm3)	CP-PEE-E001	mg/Nm3	4035	1900	NO CUMPLE
*	Oxigeno	EPA 3A	%	11.6	NA	
*	Tipo de Fuente			GENERADOR	NA	
*	Potencia (hp kw BTU)		MW	6	NA	
*	Marca			MEIDEN	NA	
*	Numero de Serie			368660R1	NA	
*	Combustible			CRUDO REDUCIDO	NA	
*	Tiempo de funcionamiento (horas/día)		horas/día	18 HORAS	NA	
*	Altura chimenea		m	2.25	NA	
*	Diametro chimenea		m	0.76	NA	
*	Ultima Perturbacion chimenea		m	1.69	NA	
*	Siguiente Perturbacion chimenea		m	0.56	NA	
*	Numero de puntos muestreados (Transecto)			24	NA	

Fecha de Realización del Ensayo

La muestra ingresa al CESAQ-PUCE el día, 27 de abril del 2009. Los análisis fueron realizados en el periodo comprendido entre el 22 de abril del 2009 y el 4 de mayo del 2009.

EMPRESA ELECTRICA QUITO S.A.

ACREDITACION

ENSAYOS
Nº OAE LE2 C 04-001

INFORME CESAQ-PUCE No. 5760-3
Página 3 de 3

NOTAS

U	Incertidumbre	Nv	No Viable
N.E.	No. Evaluable	NA	No Aplica
N.D.	No. Detectado	A.N.R.	Analisis No Realizado
< =	Menor a	La identificación de la muestra es dada por el cliente	
Los análisis microbiológicos son realizados en Diserlab - PUCE			

ACREDITACIONES

AA	ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
1	ENAC No 415/LE 929
2	OAE LE2 C 04-001
*	Los ensayos marcados no están incuidos en el alcance de acreditación OAE LE2 C 04-001
(*)	Los ensayos marcados no están incuidos en el alcance de acreditación ENAC 415/LE 929

OBSERVACIONES ANALITICAS

CORRECCION AL 11% DDE OXIGENO A CONDICIONES ESTANDAR

Responsable

Mtr. Alexandra Hidalgo
DIRECTORA TECNICA CESAQ-PUCE

Quito, 6 de mayo del 2009

UNIDAD N° 6.

ACREDITACION

ENSAYOS
Nº OAE LE2 C 04-001

INFORME CESAQ-PUCE No. 5760-5
Página 1 de 3

CESAQ - PUCE
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
CENTRO DE SERVICIOS AMBIENTALES Y QUÍMICOS
INFORME DE ANÁLISIS No. 5760-5

Datos generales:
Cliente: EMPRESA ELECTRICA - CENTRAL TÉRMOELÉCTRICA GUALBERTO HERNÁNDEZ
Dirección: Guangopolo
Telefono: 3964-700 ext. 2338
Tipo de muestra: FUENTE FIJA GENERADOR

Toma de Muestra:(No cubierta por las acreditaciones)
FECHA DE MUESTREO: 20/04/2009
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA: C.T. GUALBERTO HERNÁNDEZ. FUENTE 5 GENERADOR 6
MUESTREADO POR: PPERSONAL TÉCNICO CESAQ-PUCE
FECHA RECEPCIÓN 27/04/2009

Norma de Comparacion RES 0002.DMA2008,TABLA4.LÍMIT.MÁX.PLANT.TERMOELÉCTR.C.E.BASE SECA 25°C Y11%O2.GENERAD.CAP MAYOR 750KW Y CRUD.LIVIAN

Parámetros analizados:

AA	PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDADES	RESULTADO	NORMA	OBSERVACIONES
*	RUIDO Y EMISIONES Material particulado (MP) (mg/Nm3)	EPA 5	mg/Nm3	49,30	150,00	CUMPLE
*	Flujo de gas seco (m3/h)		m3/h	24459,70	NA	
*	Velocidad promedio (m/s)		m/s	58,52	NA	
*	Humedad del gas (%)		%	3,70	NA	
	Volumen del muestreo seco a CN(m3)		m3	0,7906	NA	
*	Tiempo del muestreo (min)		min	72	NA	
*	Peso del particulado (mg)		mg	39,40	NA	
*	Temperatura chimenea		°C	454,9	NA	
*	Presion Barometrica		mmHg	567,45	NA	
*	Presion Estatica		mmHg	2,38	NA	
*	Presion Dinamica		mmHg	6,79	NA	
*	Diametro interno boquilla de succion		mm	4,00	NA	
2	Monoxido de carbono (CO) (ppm)	CP-PEE-E001	ppm	292	NA	
*	Dióxido de carbono (CO2)	CP-PEE-E001	%	7	NA	
2	Oxido de azufre (SO2) (ppm)	CP-PEE-E001	ppm	424	NA	

Fecha de Realización del Ensayo

La muestra ingresa al CESAQ-PUCE el día, 27 de abril del 2009. Los análisis fueron realizados en el periodo comprendido entre el 23 de abril del 2009 y el 4 de mayo del 2009.

ACREDITACION

ENSAYOS
Nº OAE LE2 C 04-001

INFORME CESAQ-PUCE No. 5760-5
Página 2 de 3

CESAQ - PUCE
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
CENTRO DE SERVICIOS AMBIENTALES Y QUÍMICOS
INFORME DE ANÁLISIS No. 5760-5

Datos generales:

Toma de Muestra:(No cubierta por las acreditaciones)
FECHA DE MUESTREO: 20/04/2009
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA: C.T. GUALBERTO HERNÁNDEZ. FUENTE 5 GENERADOR 6
MUESTREADO POR: PPERSONAL TÉCNICO CESAQ-PUCE
FECHA RECEPCIÓN 27/04/2009

Norma de Comparación: RES.0002.DMA2008.TABLA4.LÍMIT.MÁX.PLANT.TERMOELÉCTR.C.E.BASE SECA 25°C Y11%O2.GENERAD CAP.MAYOR 750KW Y CRUD.LIVIAN

Parámetros analizados:

AA	PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDADES	RESULTADO	NORMA	OBSERVACIONES
2	Oxidos de nitrogeno (NOX) (ppm)	CP-PEE-E001	ppm	1734	NA	
2	Monoxido de carbono (CO) (mg/Nm3)	CP-PEE-E001	mg/Nm3	332	500	CUMPLE
2	Oxido de azufre (SO2) (mg/Nm3)	CP-PEE-E001	mg/Nm3	1100	2500	CUMPLE
2	Oxidos de nitrogeno (NOX) (mg/Nm3)	CP-PEE-E001	mg/Nm3	3227	1900	NO CUMPLE
*	Oxigeno	EPA 3A	%	10,9	NA	
*	Tipo de Fuente			GENERADOR	NA	
*	Potencia (hp kw BTU)		MW	6	NA	
*	Marca			MEIDEN	NA	
*	Número de Serie			568660R3	NA	
*	Combustible			CRUDO REDUCIDO	NA	
*	Tiempo de funcionamiento (horas/día)		horas/d-a	18 HORAS	NA	
*	Altura chimenea		m	2,25	NA	
*	Diámetro chimenea		m	0,76	NA	
*	Ultima Perturbación chimenea		m	1,69	NA	
*	Siguiente Perturbación chimenea		m	0,56	NA	
*	Número de puntos muestreados (Transecto)			24	NA	

Fecha de Realización del Ensayo

La muestra ingresa al CESAQ-PUCE el día, 27 de abril del 2009. Los análisis fueron realizados en el período comprendido entre el 23 de abril del 2009 y el 4 de mayo del 2009.

CESAQ PUCE

ACREDITACION

ENSAYOS
Nº OAE LE2 C 04-001

INFORME CESAQ-PUCE No. 5760-5
Página 3 de 3

NOTAS

U	Incertidumbre	NV	No Viable
N.E.	No. Evaluable	NA	No Aplica
N.D.	No. Detectado	A.N.R.	Analisis No Realizado
< =	Menor a	La identificación de la muestra es dada por el cliente	
Los análisis microbiológicos son realizados en Diserlab - PUCE			

CREDITACIONES

AA	ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
1	ENAC No. 415/LE 929
2	OAE LE2 C 04-001
*	Los ensayos marcados no están incuidos en el alcance de acreditación OAE LE2 C 04-001
(*)	Los ensayos marcados no están incuidos en el alcance de acreditación ENAC 415/LE 929

OBSERVACIONES ANALITICAS

CORREGIDO AL 11% DE OXIGENO A CONDICIONES ESTANDAR

Responsable

Mtr. Alexandra Hidalgo
DIRECTORA TECNICA CESAQ-PUCE

Quito, 6 de mayo del 2009

ANEXO 11

DETALLE DEL CONTROL DE NIVEL

Control de Nivel Modelo 150C Electrodo (Mc Donnell)

Aplicación:

Controlador de Nivel alta/baja y alarma de bajo nivel con combinación electrónica, sistema electrodos.

Código	Modelo	Conexión	Presión.
11CNA014	150 Electrodo	1" NPT	150 psi

Caracteristicas:

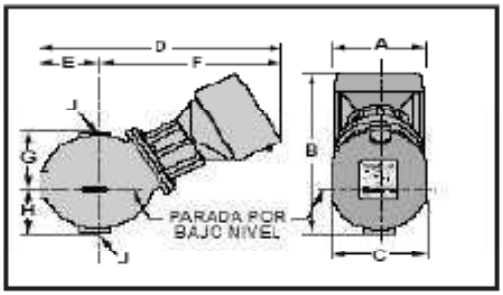
* Materiales: Cuerpo de fierro fundido.
* Presión máxima de trabajo: 150 PSI. (10.5kg/cm2).
* Control de Válvula motorizada , controla alto y bajo nivel de agua.
* Controla actuador de alarma para caldera , deposito y tanques.
* Puntos de ajuste y diferenciales constante en diferente presiones.
* Protección contra alta temperatura ambiente.
* LED interno que indica posición y condición del agua.
* LED externo que indican la actividad del control.
* Retardo ajustable hasta 60 segundos para apagar quemador.
* Rele de 1HP para quemador y bomba.
* Temperatura Máxima 57 °C.
* Temperatura Máxima de Probetas 185 °C.
* Conexión de 1" NPT.

Instalación:

* Posición horizontal
* **Se recomienda el uso de contactor**

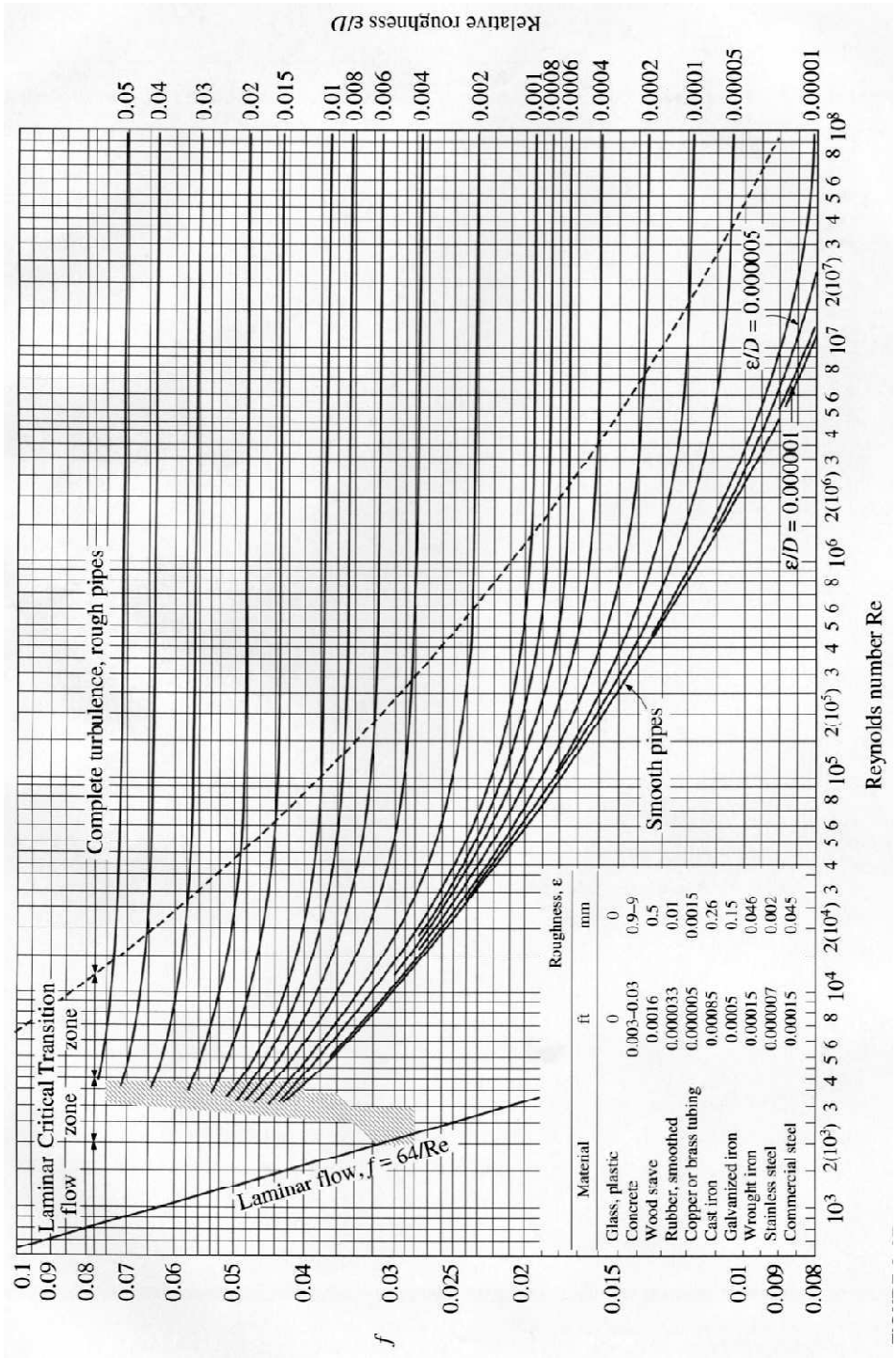
Dimensiones:

Detalle	pulg./mm.
A	169
B	286
C	162
D	359
E	84
F	275
G	105
H	87
J	1



ANEXO 12

DIAGRAMA DE MOODY PARA EL FACTOR DE FRICCIÓN



ANEXO 13

SOLDADURAS QUE SE APLICAN EN EL PROYECTO

WPS DP001 CORAZA - ESPEJOS

Nombre Compañía: EPN
PQR No.: ----------
Según norma : ASME IX – 2007

No. Identificación: DP001
Fecha: 11/04/2011
Realizado por: Pachacama - Calderón

Artículo I. Junta Utilizada
Tipo de junta: Junta de Esquina
Abertura raíz: 1.5 mm (+ 0.5, - 0.0 mm)
Talón: 2.0 mm (+ 0.5, - 0.5 mm)
Angulo de ranura: 60º (+ 5º, - 5º)
Placa de respaldo: si no ☒
Preparar bisel: si ☒ no
Método: Oxicorte, amolado o biseladora

Artículo II. Técnica de soldadura
Proceso de soldadura: SMAW
Tipo de Soldadura:
Manual ☒ Semiautomática Automática
Soldadura a: Un lado ☒ Dos lados
Cordón de respaldo: si no ☒
Limpieza:
Pase raíz : Amoladora
Pases siguientes : Cepillo metálico (grata)

Artículo III. Metal Base
Especificación: ASTM A-131 Gr. B
Espesor: 12 mm
Diámetro: 2880 mm

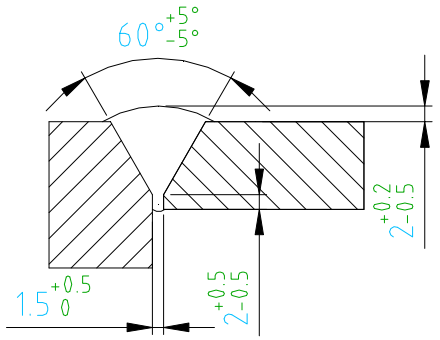
Artículo IV. Metal de Aporte
Diámetro: 3.2 y 4.0 mm
Denominación AWS: E 6010
Casa comercial: LINCOLN
Denominación comercial: 5P +

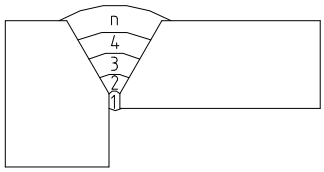
Artículo V. Posición de Soldadura
Posición de Soldadura: 6G
Progresión: Descendente
Técnica: Un pase Varios pases ☒

Precalentamiento N/A
Tiempo entre pases N/A

Artículo VI. Notas
- Verificar alineación de la junta
- Asegurar limpieza de las partes

Detalle de la Junta





No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad.	Intensidad (Amperios)			oscilado	recto
1	E 6010	3.2	DC^+	90-120	30-35	250-300		X
2	E 6010	3.2	DC^+	90-120	30-35	150-200	X	
3-n	E 6010	4.0	DC^+	120-150	25-30	250-300	X	

WPS DP002 ESPEJO - CÁMARA DE SALIDA DE GASES

Nombre Compañía: EPN
PQR No.: ----------
Según norma : ASME IX – 2007

No. Identificación: DP002
Fecha: 11/04/2011
Realizado por: Pachacama - Calderón

Artìculo I. Junta Utilizada
Tipo de junta: Junta de Esquina
Abertura raíz: 1.5 mm (+ 0.5, - 0.0 mm)
Talón: 2.0 mm (+ 0.5, - 0.5 mm)
Angulo de ranura: 45º (+ 5º, - 5º)
Placa de respaldo: si no ☒
Preparar bisel: si ☒ no
Método: Oxicorte, amolado o biseladora

Artículo II. Técnica de soldadura
Proceso de soldadura: SMAW
Tipo de Soldadura:
Manual ☒ Semiautomática Automática
Soldadura a: Un lado ☒ Dos lados
Cordón de respaldo: si no ☒
Limpieza:
Pase raíz : Amoladora
Pases siguientes : Cepillo metálico (grata)

Artículo III. Metal Base
Especificación: ASTM A-131 Gr. B
Espesor: 12 mm
Diámetro: 1395 mm

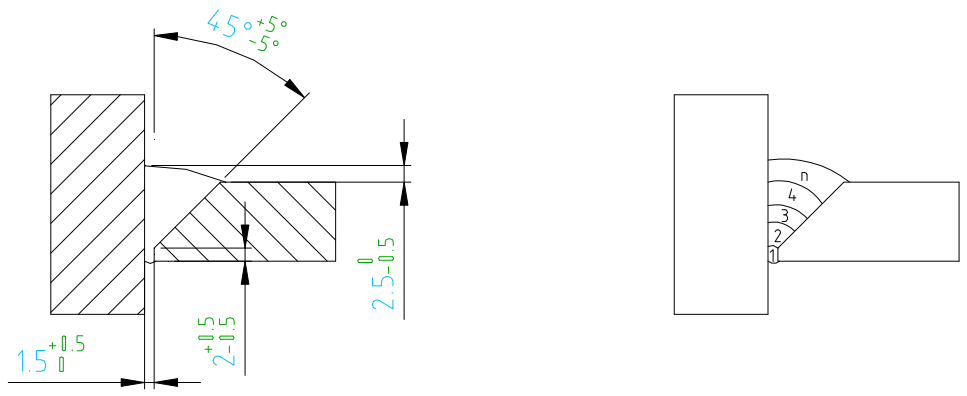
Artículo IV. Metal de Aporte
Diámetro: 3.2 y 4.0 mm
Denominación AWS: E 6010
Casa comercial: LINCOLN
Denominación comercial: 5P +

Artículo V. Posición de Soldadura
Posición de Soldadura: 6G
Progresión: Descendente
Técnica: Un pase Varios pases ☒

Precalentamiento N/A
Tiempo entre pases N/A

Artìculo VI. Notas
- Verificar alineación de la junta
- Asegurar limpieza de las partes

Detalle de la Junta



No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad.	Intensidad (Amperios)			oscilado	recto
1	E 6010	3.2	DC^+	90-120	30-35	250-300		X
2	E 6010	3.2	DC^+	90-120	30-35	150-200	X	
3-n	E 6010	4.0	DC^+	120-150	25-30	250-300	X	

WPS DP003 CORAZA – CÁMARA DE ENTRADA DE GASES

Nombre Compañía: EPN
PQR No.: ----------
Según norma : ASME IX – 2007

No. Identificación: DP003
Fecha: 11/04/2011
Realizado por: Pachacama - Calderón

Artículo I. Junta Utilizada

Tipo de junta: Junta de Esquina
Abertura raíz: 1.5 mm (+ 0.5, - 0.0 mm)
Talón: 2.0 mm (+ 0.5, - 0.5 mm)
Angulo de ranura: 60º (+ 5º, - 5º)
Placa de respaldo: si no ☒
Preparar bisel: si ☒ no
Método: Oxicorte, amolado o biseladora

Artículo II. Técnica de soldadura

Proceso de soldadura: SMAW
Tipo de Soldadura:
Manual ☒ Semiautomática Automática
Soldadura a: Un lado ☒ Dos lados
Cordón de respaldo: si no ☒
Limpieza:
Pase raíz : Amoladora
Pases siguientes : Cepillo metálico (grata)

Artículo III. Metal Base

Especificación: ASTM A-131 Gr. B
Espesor: 12 mm
Diámetro: 1395 mm

Artículo IV. Metal de Aporte

Diámetro: 3.2 y 4.0 mm
Denominación AWS: E 6010
Casa comercial: LINCOLN
Denominación comercial: 5P +

Artículo V. Posición de Soldadura

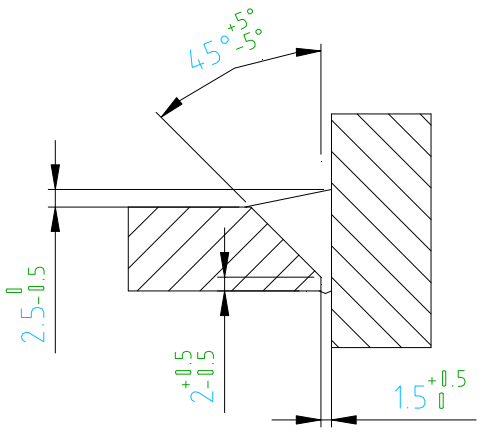
Posición de Soldadura: 6G
Progresión: Descendente
Técnica: Un pase Varios pases ☒

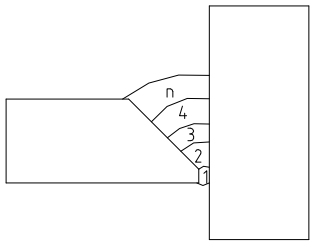
Precalentamiento N/A
Tiempo entre pases N/A

Artículo VI. Notas

- Verificar alineación de la junta
- Asegurar limpieza de las partes

Detalle de la Junta





No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad.	Intensidad (Amperios)			oscilado	recto
1	E 6010	3.2	DC^+	90-120	30-35	250-300		X
2	E 6010	3.2	DC^+	90-120	30-35	150-200	X	
3-n	E 6010	4.0	DC^+	120-150	25-30	250-300	X	

WPS DP004 TUBOS / BARRAS TIRANTES - CORAZA

Nombre Compañía: EPN
PQR No.: ----------
Según norma : ASME IX – 2007

No. Identificación: DP004
Fecha: 11/04/2011
Realizado por: Pachacama - Calderón

Artículo I. Junta Utilizada
Tipo de junta: Junta de Esquina
Abertura raíz: N/A
Talón: N/A
Angulo de ranura: 30º (+ 5º, - 5º)
Placa de respaldo: si no ☒
Preparar bisel: si ☒ no
Método: Oxicorte, amolado o biseladora

Artículo II. Técnica de soldadura
Proceso de soldadura: SMAW
Tipo de Soldadura:
Manual ☒ Semiautomática Automática
Soldadura a: Un lado ☒ Dos lados
Cordón de respaldo: si no ☒
Limpieza:
Pase raíz : Amoladora
Pases siguientes : Cepillo metálico (grata)

Artículo III. Metal Base
Especificación: ASTM A-192
Espesor: 3 mm
Diámetro: 76.2 mm

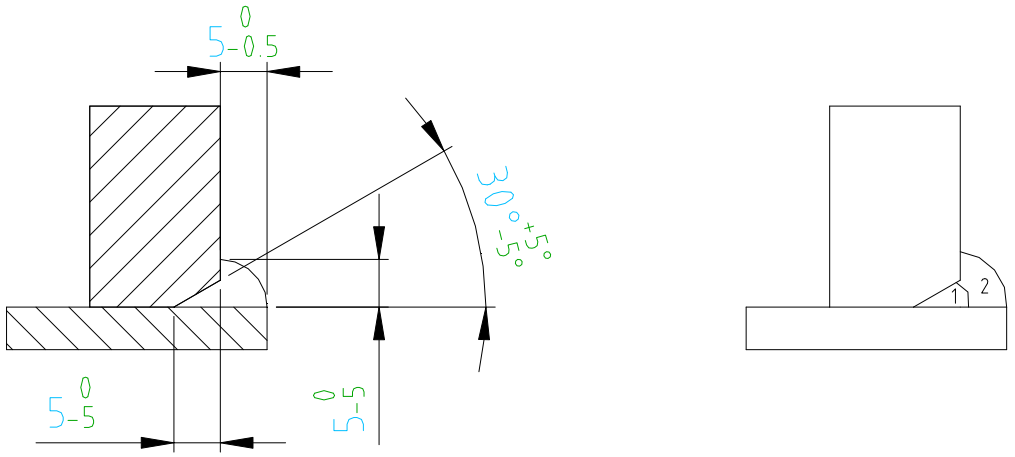
Artículo IV. Metal de Aporte
Diámetro: 3.2 mm
Denominación AWS: E 6010
Casa comercial: LINCOLN
Denominación comercial: 5P +

Artículo V. Posición de Soldadura
Posición de Soldadura: 5F
Progresión: Descendente
Técnica: Un pase Varios pases ☒

Precalentamiento N/A
Tiempo entre pases N/A

Artículo VI. Notas
- Verificar alineación de la junta
- Asegurar limpieza de las partes

Detalle de la Junta



No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad.	Intensidad (Amperios)			oscilado	recto
1	E 6010	3.2	DC^+	90-120	25-30	172-211		X
2	E 6010	3.2	DC^+	90-120	25-30	170-211	X	

WPS DP005 MANHOLE - CORAZA

Nombre Compañía: EPN
PQR No.: ----------
Según norma : ASME IX – 2007

No. Identificación: DP005
Fecha: 11/04/2011
Realizado por: Pachacama - Calderón

Artículo I. Junta Utilizada
Tipo de junta: Junta de Esquina
Abertura raíz: 1.5 mm (+ 0.5, - 0.0 mm)
Talón: 2.0 mm (+ 0.5, - 0.5 mm)
Angulo de ranura: 45º (+ 5º, - 5º)
Placa de respaldo: si no ☒
Preparar bisel: si ☒ no
Método: Oxicorte, amolado o biseladora

Artículo II. Técnica de soldadura
Proceso de soldadura: SMAW
Tipo de Soldadura:
Manual ☒ Semiautomática Automática
Soldadura a: Un lado ☒ Dos lados
Cordón de respaldo: si no ☒
Limpieza:
Pase raíz : Amoladora
Pases siguientes : Cepillo metálico (grata)

Artículo III. Metal Base
Especificación: ASTM A-131 Gr. B
Espesor: 12 mm
Diámetro: 474 mm

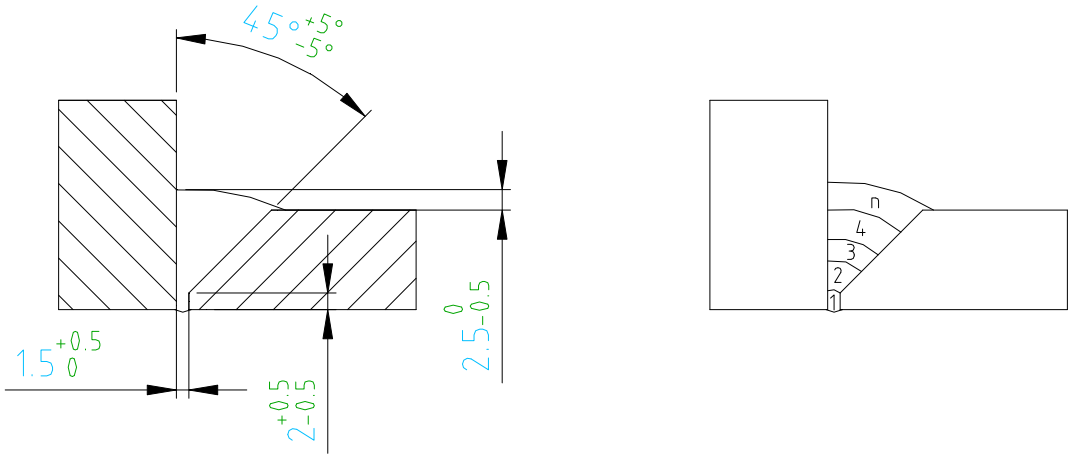
Artículo IV. Metal de Aporte
Diámetro: 3.2 y 4.0 mm
Denominación AWS: E 6010
Casa comercial: LINCOLN
Denominación comercial: 5P +

Artículo V. Posición de Soldadura
Posición de Soldadura: 2F
Progresión: Descendente
Técnica: Un pase Varios pases ☒

Precalentamiento N/A
Tiempo entre pases N/A

Artículo VI. Notas
- Verificar alineación de la junta
- Asegurar limpieza de las partes

Detalle de la Junta



No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad.	Intensidad (Amperios)			oscilado	recto
1	E 6010	3.2	DC^+	90-120	30-35	250-300		X
2	E 6010	3.2	DC^+	90-120	30-35	150-200	X	
3-n	E 6010	4.0	DC^+	120-150	25-30	250-300	X	

PLANOS