

# **ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO**

## **CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE DESTILACIÓN  
CON CAPACIDAD DE 110 GALONES DIARIOS PARA LA  
RECUPERACIÓN DE HIDROCARBUROS VOLÁTILES  
PRESENTES EN EFLUENTES LÍQUIDOS CONTAMINADOS  
PRODUCTO DEL PROCESO DE LAVADO DE TANQUES EN LA  
EMPRESA AV.CORP”**

**Previa la obtención del título de:**

**INGENIERO MECÁNICO**

**DAVID RICARDO DELGADO ACUÑA**

**DIRECTOR:           ING. ERNESTO SORIA**

**CODIRECTOR:      ING. OSWALDO MARIÑO**

**Sangolquí, Julio del 2010**

## **CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO**

El proyecto “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE DESTILACIÓN CON CAPACIDAD DE 110 GALONES DIARIOS PARA LA RECUPERACIÓN DE HIDROCARBUROS VOLÁTILES PRESENTES EN EFLUENTES LÍQUIDOS CONTAMINADOS PRODUCTO DEL PROCESO DE LAVADO DE TANQUES EN LA EMPRESA AV.CORP” fue ejecutado en su totalidad por el señor David Ricardo Delgado Acuña, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

---

Ing. Ernesto Soria  
Director del Proyecto

---

Ing. Oswaldo Mariño  
Codirector del Proyecto

Sangolquí, Julio del 2010

## **CERTIFICACIÓN DE LA EMPRESA AUSPICIANTE**

Por medio de la presente, AV.Corp, certifica que el proyecto “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE DESTILACIÓN CON CAPACIDAD DE 110 GALONES DIARIOS PARA LA RECUPERACIÓN DE HIDROCARBUROS VOLÁTILES PRESENTES EN EFLUENTES LÍQUIDOS CONTAMINADOS PRODUCTO DEL PROCESO DE LAVADO DE TANQUES EN LA EMPRESA AV.CORP” fue realizado en su totalidad por el señor David Ricardo Delgado Acuña a entera satisfacción de la Compañía.

El suscrito está autorizado para utilizar la presente como mejor convenga a sus intereses.

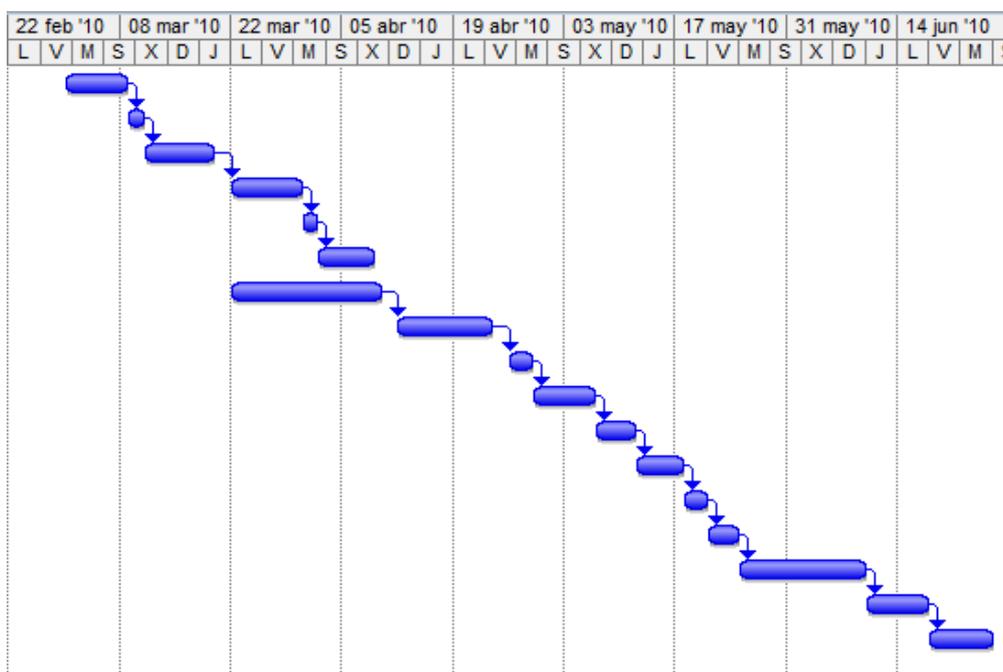
---

Ing. Alex Vera Abril

GERENTE AV.CORP

## ACTIVIDADES REALIZADAS POR EL TESISISTA DAVID RICARDO DELGADO ACUÑA EN LA EMPRESA AV.CORP

Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin
Diseño de esquemas de construcción	6 días	lun 01/03/10	lun 08/03/10
Selección mejor alternativa	2 días	mar 09/03/10	mié 10/03/10
Diseño del caldero	7 días	jue 11/03/10	vie 19/03/10
Diseño del condensador	7 días	lun 22/03/10	mar 30/03/10
Selección y compra tanque de recolección	2 días	mié 31/03/10	jue 01/04/10
Diseño sistema refrigeración	5 días	vie 02/04/10	jue 08/04/10
construcción caldero	15 días	lun 22/03/10	vie 09/04/10
Costrucción condensador	10 días	lun 12/04/10	vie 23/04/10
Selección tanque de propano	3 días	lun 26/04/10	mié 28/04/10
Costrucción sistema de refrigeración	6 días	jue 29/04/10	jue 06/05/10
Selección de instrumentos de medición	3 días	vie 07/05/10	mar 11/05/10
Instalación de instrumentos	4 días	mié 12/05/10	lun 17/05/10
Selección de accesorios	3 días	mar 18/05/10	jue 20/05/10
Instalación de todos los elementos	2 días	vie 21/05/10	lun 24/05/10
Realizar pruebas de funcionamiento	12 días	mar 25/05/10	mié 09/06/10
Realizar manual de funcionamiento	6 días	jue 10/06/10	jue 17/06/10
Analizar los resultados	6 días	vie 18/06/10	vie 25/06/10



Ing. Alex Vera Abril

GERENTE AV.CORP

## **LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO**

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE DESTILACIÓN CON CAPACIDAD DE 110 GALONES DIARIOS PARA LA RECUPERACIÓN DE HIDROCARBUROS VOLÁTILES PRESENTES EN EFLUENTES LÍQUIDOS CONTAMINADOS PRODUCTO DEL PROCESO DE LAVADO DE TANQUES EN LA EMPRESA AV.CORP”

ELABORADO POR:

---

Sr. David Ricardo Delgado Acuña

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

---

Ing. Emilio Tumipamba  
DIRECTOR DE CARRERA

Sangolquí, Julio 2010

## DEDICATORIA

Esta tesis de grado se lo dedico a Dios, mi señor y salvador, por poner en mí, la fuerza, inteligencia y voluntad para llevar a una feliz culminación este proyecto, sin su bendición en mis metas nada sería posible.

A mis Padres por su apoyo incondicional en todo momento de mi vida, se los dedico este proyecto como retribución al cariño, aliento y amor que me han dado durante toda mi vida

A mi novia por ser mi ayuda idónea en todo momento, por sus constantes palabras de aliento y cariño que me ayudaron día a día a trabajar y conseguir culminar con todas mis metas propuestas

**Salmos 18:2**

**Jehová, roca mía y castillo mío, y mi libertador; Dios mío, fortaleza mía, en él confiaré; Mi escudo, y la fuerza de mi salvación, mi alto refugio.**

*David*

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por sus fuerzas dadas para culminar el proyecto, a mis padres, Ricardo y Consuelo por su apoyo incondicional, a mi hermana Stephanie, familiares y a mis amigos, en especial, Ricardo, Geovanna y Sebastián, por su preocupación durante el desarrollo de la tesis.

Al Ingeniero Mecánico Alex Vera A. por su gran aporte científico y práctico en el proyecto, su experiencia y conocimiento del tratamiento de efluentes contaminados ayudó para la toma de decisiones conforme a las alternativas de diseño para la elaboración de este sistema.

A mis Directores y colaboradores que han puesto su conocimiento, experiencia y excelente predisposición en todas las etapas que se necesitó para la culminación de este proyecto.

*David*

## RESUMEN

Los efluentes contaminados son productos que toda empresa que maneje hidrocarburos obtiene tras un proceso de producción.

Datos obtenidos en la empresa AV.CORP nos informan que en un mes de producción normal, se obtienen 165 Glns de efluentes contaminados, estos elementos son transportados a los incineradores autorizados por el distrito. Si bien es un proceso que no causa daños en el suelo, el daño ambiental por las emisiones de CO<sub>2</sub> si es trascendental para el medio ambiente.

Investigaciones realizadas aportan que 2.3 toneladas de CO<sub>2</sub> son lanzadas al medio ambiente por la incineración de estos productos.

AV.Corp, empresa prestadora de servicios ambientales para la industria se ha visto en la necesidad de ejecutar soluciones para estos residuos, a fin de eliminar las emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente y también para crear una conciencia de reutilización de productos, esta ideología se la practica en la empresa a diario, debido a que parte de los productos que ofrece la empresa como los tanques de 55 glns son producto de un proceso de recuperación de estos elementos.

En este proceso de recuperación, es necesario retirar los efluentes contaminados de las paredes de los tanques, para este fin se utilizan solventes, específicamente el Thinner, este solvente, desprende las partículas adheridas a las paredes de los tanques, tras cumplir su trabajo, este producto se lo almacena junto con todos los residuos.

Al estar incursionando siempre en nuevos procesos, se ha pensado en la manera de tratar estos residuos, la destilación fraccionada es un proceso que luego de ser analizado, se seleccionó para poder recuperar estos efluentes.

El proceso de destilación fraccionada es un proceso físico utilizado en química para separar mezclas de líquidos mediante el calor, con un amplio intercambio

calórico y másico entre vapores y líquidos. Por esta razón usamos este proceso para separar compuestos de sustancias con puntos de ebullición distintos pero cercanos.

Este proceso principalmente somete al efluente a cambiar su estado, es decir de pasar de estado líquido a gas, a una temperatura que luego del diseño y estudios con el prototipo es de 65°C. A esta temperatura, solo se evaporan los efluentes con densidades iguales a 0.65 a 0.85 es decir el thinner y elementos volátiles como alcohol, gasolina entre otros. Productos como el aceite necesitan una mayor temperatura para cambiar de estado, estos elementos quedan como residuo del proceso de destilación fraccionada.

Al ser un proceso de destilación fraccionada, creamos una placa en la sección del gas, este elemento permite un mayor contacto entre los vapores que ascienden con el líquido condensado que desciende, lo que facilita el intercambio de calor entre los vapores (que ceden) y los líquidos (que reciben). Ese intercambio produce un intercambio de masa, donde los líquidos con menor punto de ebullición se convierten en vapor, y los vapores de sustancias con mayor punto de ebullición pasan al estado líquido.

El gas que consigue pasar por la placa es recibido en un condensador, el mismo que fue diseñado de Tubo y coraza, gracias a este proceso, el gas consigue cambiar su estado, a la salida de este elemento, el hidrocarburo es recogido en recipientes. El equipo cuenta con dos condensadores, el de efluentes livianos, que recibe el gas que consiguió atravesar la placa y el de efluentes pesados que recibe el gas que no consiguió atravesar la placa.

Observando el producto obtenido por los dos efluentes podemos notar que en el condensador de efluentes livianos, el producto tiene las mismas características del thinner mientras que en el de efluentes pesados se obtiene un producto blanco amarillento, que tiene casi iguales propiedades que el efluente liviano. Adentrándonos nuevamente en el proceso de producción, cuando los tanques tienen su primer proceso de lavado, es utilizado el

hidrocarburo obtenido por el efluente pesado, para el proceso final de lavado es usado el hidrocarburo obtenido por el condensador para efluente liviano. Los resultados son buenos ya que estos productos cumplen la funcionalidad de los diluyentes.

Los costos por la obtención del solvente en lugar de comprarlo generan a la empresa un ahorro de 550 \$ por mes, la rentabilidad es buena y gracias al diseño de este equipo, podrá prestar sus servicios sin sufrir averías ni contratiempos, sin embargo siempre hay que tomar en cuenta las recomendaciones para su uso y mantenimiento descritos en el manual de usuario.

Para terminar, es importante generar en la conciencia de los ingenieros el crear proyectos innovadores que permitan recuperar, re potenciar o reutilizar productos disponibles, ya que con el alto consumo de los recursos naturales y la generación de tantos residuos, el mundo que ahora conocemos cambiará en poco tiempo. Es nuestro trabajo el de preocuparnos por esto y dar a conocer al sector industrial que hay nuevas alternativas y muchas de ellas con gran rentabilidad como este proyecto.

*David Delgado*

## INDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN DEL PROFESOR DIRECTOR.....	II
CERTIFICACIÓN DE LA EMPRESA AUSPICIANTE.....	III
HOJA DE LEGALIZACIÓN DE FIRMAS.....	V
DEDICATORIA.....	VI
AGRADECIMIENTO.....	VII
RESUMEN.....	VIII
LISTADO DE TABLAS.....	XIV
LISTADO DE FIGURAS.....	XVI
LISTADO DE ECUACIONES.....	XX
NOMENCLATURA DE LAS ECUACIONES.....	XXV
CAPÍTULO 1 GENERALIDADES.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Antecedentes.....	3
1.3. Definición del problema.....	3
1.4. Objetivos.....	4
1.4.1 General.....	4
1.4.2 Específicos.....	4
1.5. Alcance.....	5
1.6. Justificación e importancia.....	5
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO.....	7
2.1 Hidrocarburos totales de petróleo (TPH).....	7
2.2 Tipos de Hidrocarburos totales de petróleo.....	8
2.2.1 Tipos de Hidrocarburos totales de petróleo.....	9
2.2.2 Propiedades de los Hidrocarburos totales de petróleo.....	15
2.2.3 Diluyentes.....	22
2.3 Recuperación de hidrocarburos en efluentes contaminados.....	24
2.3.1 Destilación fraccionada de hidrocarburos.....	24
2.3.2 Sistema ORS Small diameter filter scavenger (SDFS).....	26
2.4 Transferencia de calor.....	27
2.4.1 Transferencia de calor por conducción.....	29
2.4.2 Transferencia de calor por convección.....	36
2.4.3 Transferencia de calor por radiación.....	42
2.4.4 Condensación de vapores simples.....	44

2.5	Normativas ambientales.....	49
2.5.1	Gestión ambiental ecuatoriana.....	49
2.5.2	Normas para las emisiones de aire desde fuentes fijas de combustión.....	51
2.5.3	Sistema de manejo ambiental .....	57
2.5.4	Gestión de desechos peligrosos.....	58
CAPÍTULO 3 DISEÑO DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA.....		61
3.1.	Diseño del calentador.....	61
3.1.1	Parámetros de funcionamiento.....	61
3.1.2	Materiales requeridos para su elaboración .....	63
3.1.3	Dimensionamiento del calentador .....	63
3.1.4	Análisis termodinámico del calentador .....	72
3.2.	Diseño del sistema de condensación del efluente gaseoso.....	75
3.2.1	Parámetros de diseño .....	75
3.2.2	Materiales requeridos para su elaboración .....	76
3.2.3	Análisis termodinámico en el sistema de condensación .....	78
3.3.	Diseño del sistema de enfriamiento del agua para el proceso de condensación del efluente gaseoso.....	94
3.3.1	Diseño del intercambiador de calor Aire-Agua .....	95
3.3.2	Selección de la bomba de agua .....	103
3.3.3	Selección del tanque de reserva del efluente recuperado.....	107
3.3.4	Selección del sistema de alimentación de gas propano para el calentador de efluentes.....	108
CAPÍTULO 4 CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA.....		111
4.1	Calentador.....	111
4.4.1	Proceso de construcción .....	111
4.4.2	Instalación del calentador .....	116
4.4.3	Instalación de los sistemas de medición.....	119
4.4.4	Control de calidad en la manufactura e instalación del equipo...	120
4.2	Sistema de Condensación del efluente .....	121
4.2.1	Proceso de construcción .....	121
4.2.2	Instalación de la tubería para el gas hidrocarburo.....	122
4.2.3	Instalación de los condensadores.....	123
4.2.4	Control de calidad en los condensadores.....	126
4.3	Sistema de enfriamiento para el agua.....	127

4.3.1	Elementos que forman el sistema.....	127
4.3.2	Instalación del intercambiador de calor aire-agua .....	128
4.3.3	Instalación del tanque de reserva para el agua .....	129
4.3.4	Instalación de la bomba eléctrica.....	131
4.3.5	Instalación del sistema eléctrico .....	132
4.3.6	Instalación de las mangueras para circular el agua.....	133
4.3.7	Control de calidad en el sistema de enfriamiento .....	135
4.4	Sistema de alimentación de propano para el calentador.....	136
4.4.1	Elementos que forman el sistema.....	136
4.4.2	Instalación del cilindro para el gas propano.....	136
4.4.3	Instalación de las mangueras para el gas .....	137
4.4.4	Instalación de la válvula de seguridad .....	137
4.4.5	Instalación de las hornillas para el gas .....	137
CAPÍTULO 5 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO DE DESTILACIÓN DE EFLUENTES CONTAMINADOS .....		139
5.1	Parámetros de Funcionamiento .....	139
5.1.1	Calentador .....	139
5.1.2	Condensadores .....	140
5.1.3	Sistema de enfriamiento .....	140
5.2	Pruebas de funcionamiento.....	142
5.3	Análisis de resultados .....	160
CAPÍTULO 6 ANÁLISIS ECONÓMICO FINANCIERO.....		162
6.1	Introducción para el análisis.....	162
6.2	Análisis de costos.....	162
6.3	Análisis Financiero .....	163
CONCLUSIONES.....		173
RECOMENDACIONES .....		177
ANEXOS .....		179
ANEXO A .....		180
ANEXO B .....		197
MANUAL DEL USUARIO DEL EQUIPO DE DESTILACIÓN.....		197
ANEXO C .....		213
PLANOS DEL EQUIPO DISEÑADO .....		213
BIBLIOGRAFÍA .....		221

# LISTADO DE TABLAS

## CAPÍTULO 2

Tabla 2.1 Hidrocarburos aromáticos .....	11
Tabla 2.2 Riesgos para la salud .....	12
Tabla 2.3 Riesgos para la salud 2 .....	12
Tabla 2.4 Límites de explosividad y temperaturas de auto-inflamación de los hidrocarburos puros y de las fracciones comerciales .....	21
Tabla 2.5 Componentes químicos del thinner .....	23
Tabla 2.6 Propiedades físico químicas del thinner .....	24
Tabla 2.7 Límites máximos permisibles de emisiones al aire para fuentes fijas de combustión .....	52
Tabla 2.8 Límites máximos permisibles de emisiones al aire para fuentes fijas de combustión .....	53

## CAPÍTULO 3

Tabla 3.1 Valores para juntas a tope soldadas .....	67
Tabla 3.2 Propiedades de los materiales (Acero) .....	68
Tabla 3.3 Dimensiones internas, externas y espesor de la tubería de 1/2" .....	80
Tabla 3.4 Matriz de decisión para la selección del radiador .....	96
Tabla 3.5 Matriz de decisión para la selección del deflector .....	96
Tabla 3.4 Proceso de interpolación para el agua .....	98
Tabla 3.5. Características de la manguera seleccionada .....	109

## CAPÍTULO 5

Tabla 5.1 Pruebas realizadas en el equipo .....	146
Tabla 5.2 Propiedades de los hidrocarburos obtenidos .....	146-156
Tabla 5.11 Análisis químico realizado a los hidrocarburos recuperados.....	158

## CAPÍTULO 6

Tabla 6.1 Compra mensual de thinner .....	163
Tabla 6.2 Inversión para la construcción del equipo de destilación .....	164
Tabla 6.3 Costos variables .....	164

Tabla 6.4 Costos fijos .....	165
Tabla 6.5 Costo total .....	165
Tabla 6.6 Costo por la compra del thinner .....	166
Tabla 6.7 Costo por la recuperación del thinner .....	166
Tabla 6.8 Ahorro vs galones producidos .....	169
Tabla 6.9 Número de meses necesarios para recuperar la inversión .....	169
Tabla 6.10 Ahorro anual para una proyección de 10 años .....	171
Tabla 6.11 Valor del TIR y el VAN para este proyecto .....	171

# LISTADO DE FIGURAS

## CAPÍTULO 2

Figura 2.1 Estructura molecular de los alcanos .....	13
Figura 2.2 Estructura molecular de los alquenos .....	14
Figura 2.3 Estructura molecular de los alquinos .....	15
Figura 2.4 Proceso de destilación fraccionada .....	25
Figura 2.5 Estructura de un ORS sumergido en un pozo .....	27
Figura 2.6 Conducción a través de un sólido o fluido estacionario .....	28
Figura 2.7 Convección de una superficie a un fluido en movimiento .....	28
Figura 2.8 Intercambio de calor por radiación entre dos superficies .....	28
Figura 2.9 Transferencia de calor en un proceso estable .....	31
Figura 2.10 Flujo de calor a través de una pared compuesta .....	32
Figura 2.11 Flujo de calor a través de un tubo .....	33
Figura 2.12 Pérdida de calor en un tubo aislado .....	34
Figura 2.13 Flujo laminar .....	37
Figura 2.14 Flujo turbulento .....	37
Figura 2.15 Requisitos para ejecución de equipos permitidos para las emisiones al aire desde fuentes fijas .....	56
Figura 2.16 Número de puntos de medición de emisiones al aire desde fuentes fijas .....	57

## CAPÍTULO 3

Figura 3.1 Esquema calentador de hidrocarburos.....	62
Figura 3.1 Cabeza elipsoidal .....	70
Figura 3.2 Esquema del proceso de calentamiento .....	72
Figura 3.3 Esquema de calentamiento usando gas propano .....	74
Figura 3.4 Esquema de la coraza del intercambiador de calor .....	76
Figura 3.5 Esquema del intercambiador de calor de tubo y coraza .....	79
Figura 3.6 Dimensiones del diámetro interno y externo de la tubería de cobre de 1/2" .....	81
Figura 3.7 Esquema de pasos de la tubería de cobre de 1/2" .....	81
Figura 3.8 Tablas de entalpías de hidrocarburos .....	83

Figura 3.9 Factor de corrección F .....	86
Figura 3.10 Viscosidades para hidrocarburos .....	88
Figura 3.11 Curva de transferencia de calor para el lado de los tubos .....	89
Figura 3.12 Esquema circuito de enfriamiento .....	94
Figura 3.13 esquema funcionamiento intercambiador aire – agua .....	97
Figura 3.14 Factor de corrección para flujo cruzado .....	101
Figura 3.15 Parámetros de altura, caudal y eficiencia de la bomba a selección .....	103
Figura 3.16 Potencia en base a la altura y caudal para seleccionar la bomba .....	103
Figura 3.17 Bomba Pedrollo .....	104
Figura 3.18 Acoples hidráulicos .....	107
Figura 3.19 Esquema sistema de alimentación de gas .....	108
Figura 3.20 Hornilla seleccionada para el proceso de calentamiento .....	110

## **CAPÍTULO 4**

Figura 4.1 Dimensiones paredes del calentador .....	111
Figura 4.2 cordón de soldadura realizado en la pared del calentador .....	113
Figura 4.3 Cámara de calentamiento .....	113
Figura 4.4 Calentador .....	114
Figura 4.5 Termómetro .....	114
Figura 4.6 Manómetro .....	114
Figura 4. 7 Brida para mantenimiento .....	115
Figura 4. 8 Trabajos en la cabeza del calentador .....	115
8Figura 4. 9 Soldadura sección para la instalación de manómetro .....	116
Figura 4.10 Soldadura de la base del calentador a la base de todo el equipo de destilación .....	117
Figura 4.11 Instalación de las tapas para las bridas en el calentador .....	117
Figura 4. 12 Brida para ingreso de efluentes contaminados .....	118
Figura 4.13 Calentador con todos los equipos instalados .....	118
Figura 4. 14 Instalación del manómetro en el calentador .....	119

Figura 4. 15 Cabeza hemisférica y conexión con el condensador de efluentes livianos .....	122
Figura 4. 16 Condensador de efluentes pesados, válvula de paso de gas ...	123
Figura 4. 17 Condensadores junto a todos sus elementos .....	124
Figura 4. 18 Válvula de paso del condensado .....	125
Figura 4. 19 Manómetro para medir la presión de agua en condensador de efluentes livianos .....	126
Figura 4.20 Deflector para intercambiador aire-agua .....	128
Figura 4.21 Intercambiador aire-agua .....	129
Figura 4.22 Tanque de reserva de agua .....	130
Figura 4.23 tanque de reserva de agua 2 .....	130
Figura 4.24 Bomba eléctrica Pedrollo .....	121
Figura 4.25 Panel de control de la bomba y deflector.....	132
Figura 4.26 Panel de control de la bomba y deflector2.....	133
Figura 4.27 Mangueras para el circuito hidráulico.....	133
Figura 4.28 Mangueras para el circuito hidráulico2.....	134
Figura 4.29 Mangueras de alta presión a la entrada y salida del intercambiador de calor .....	134
Figura 4.30 Mangueras que transportan el hidrocarburo desde los condensadores a los tanques de recolección .....	135
Figura 4.31 Hornillas ubicadas bajo el calentador .....	138

## **CAPÍTULO 5**

Figura 5.1 Almacenamiento de residuos .....	143
Figura 5.2 Ajuste brida entrada de residuos .....	143
Figura 5.3 Temperatura del efluente líquido .....	144
Figura 5.4 Recolección hidrocarburo recuperado .....	145
Figura 5.5 Gráfica comportamiento del hidrocarburo líquido en el proceso de	

calentamiento .....	156
Figura 5.6 Gráfica comportamiento del hidrocarburo (gas) en el proceso de calentamiento .....	156
Figura 5.7 Porcentajes de recuperación de hidrocarburo .....	157
Figura 5.8 efluente recuperado entregado a los empleados de AV.Corp .....	158
Figura 5.9 Proceso de limpieza de tanques en AV.Corp .....	159
Figura 5.10 Limpieza de tanques en AV.Corp .....	159
Figura 5.11 Hidrocarburo recuperado usado en el proceso de limpieza de tanques en AV.Corp .....	160

## **CAPÍTULO 6**

Figura 6.1 Costos por compra vs costos por recuperación .....	167
---------------------------------------------------------------	-----

# LISTADO DE ECUACIONES

## CAPÍTULO 2

Ecuación 2.1	$K_{\text{sup}} = \frac{3\sqrt{T} (^{\circ}\text{R})}{\text{sp. gr.} \cdot 60/60}$	16
Ecuación 2.2	$d(L_n P) = -\frac{1}{R} d\left(\frac{1}{T}\right)$	17
Ecuación 2.3	$^{\circ}\text{Baumé} = \frac{140}{\text{densidad}} - 130$	18
Ecuación 2.4	$Q = K \frac{A}{L} \Delta T$	30
Ecuación 2.5	$k = k_0 + \gamma t$	30
Ecuación 2.6	$Q = \frac{\Delta t}{R} = \frac{t_0 - t_3}{\frac{L_a}{K_a A} + \frac{L_b}{K_b A} + \frac{L_c}{K_c A}}$	33
Ecuación 2.7	$q = \frac{2\pi k(t_i - t_o)}{2.3 \log \frac{r_o}{r_i}}$	34
Ecuación 2.8	$\frac{dQ}{dt} = h A_s (T_s - T_i)$	36
Ecuación 2.9	$\Delta P = \frac{\alpha G^2 L}{D \rho g} \left(\frac{DG}{\mu}\right)^{-d}$	39
Ecuación 2.10	$\frac{h_i D}{k} = \alpha \left(\frac{DG}{\mu}\right)^G \left(\frac{c\mu}{k}\right)^{1-f}$	40
Ecuación 2.11	$\frac{t_2 - t_1}{t_p - t_1} = 1 - 8\phi \frac{wc}{kL}$	40
Ecuación 2.12	$\frac{h_i D}{k} = \alpha \left[ \left(\frac{DG}{\mu}\right) \left(\frac{c\mu}{k}\right) \left(\frac{D}{L}\right) \right]^{d+1}$	40

### CAPITULO 3

Ecuación 3.1	Altura necesaria= altura de hidrocarburo (fase líquida) + altura hidrocarburo (fase gaseosa)	64
Ecuación 3.2	$Altura\ de\ hidrocarburo = V/\acute{a}rea$	64
Ecuación 3.3	$h_{gas} = h_{placa} + h_{ocupagas}$	64
Ecuación 3.4	$H = h_{hidrocarburo} + h_{gas}$	64
Ecuación 3.5	$S1 = \frac{P * D}{4t}$	65
Ecuación 3.6	$S2 = \frac{P * D}{2t}$	65
Ecuación 3.7	$Presi\acute{o}n\ hidrocarburo = \rho * g * h$	66
Ecuación 3.8	MAWP= 5 PSI + (presi\acute{o}n del hidrocarburo) + 30	67
Ecuación 3.9	$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$	68
Ecuación 3.10	$P = \frac{SEt}{R + 0.6t}$	69
Ecuación 3.11	$t = \frac{PD}{2SE - 0.2P}$	70
Ecuación 3.12	$P = \frac{2SEt}{D + 0.2t}$	71
Ecuación 3.13	$Qa = mcp(t2 - t1)$	72
Ecuación 3.14	$Qb = m\lambda vapor$	73
Ecuación 3.15	$Qt = Qa + Qb$	74
Ecuación 3.16	$q_{sobrec} := m_h \cdot c_p \cdot h \cdot (Th_i - Th_{sat})$	82
Ecuación 3.17	$q_{cond} := m_h \cdot (hi_h - ho_h)$	84
Ecuación 3.18	$Q_{total} := q_{sobrec} + q_{cond}$	84
Ecuación 3.19	$DMLT := \frac{\Delta T1 - \Delta T2}{\ln\left(\frac{\Delta T1}{\Delta T2}\right)}$	85

Ecuación 3.20 
$$As := \pi \cdot \frac{Di}{12} \cdot Np \cdot Nt \cdot L$$
 87

Ecuación 3.21 
$$tm\_h := \frac{Th\_i + Th\_o}{2}$$
 87

Ecuación 3.22 
$$at\_h := \frac{\pi \cdot \left(\frac{Di}{12}\right)^2}{4}$$
 88

Ecuación 3.23 
$$Gi := \frac{m\_h}{(at\_h)}$$
 89

Ecuación 3.24 
$$Re := \frac{Di \cdot Gi}{\mu}$$
 89

Ecuación 3.25 
$$\left(\frac{cp\_h \cdot \mu}{k\_h}\right)^{\frac{1}{3}}$$
 90

Ecuación 3.26 
$$hi := jH \cdot \frac{k\_h}{\frac{Di}{12}} \cdot \left(\frac{cp\_h \cdot \mu}{k\_h}\right)^{\frac{1}{3}}$$
 89

Ecuación 3.27 
$$Aext := \pi \cdot De \cdot L$$
 90

Ecuación 3.28 
$$Aint := \pi \cdot Di \cdot L$$
 90

Ecuación 3.29 
$$e = 0.109$$
 90

Ecuación 3.30 
$$k\_cu := 224$$
 90

Ecuación 3.31 
$$Aml := \frac{Aext - Aint}{\ln\left(\frac{Aext}{Aint}\right)}$$
 91

Ecuación 3.32 
$$\frac{he^* \cdot Dec}{K\_c} = 0,36 \left[ \left(\frac{G_s \cdot De}{\mu\_c}\right)_{Tm}^{0,55} \left(\frac{Cp\_c \cdot \mu\_c}{k\_c}\right)_{Tm}^{1,13} \right]$$
 91

Ecuación 3.33 
$$Tmed\_c := \frac{Tc\_i + Tc\_o}{2}$$
 91

Ecuación 3.34 
$$at_c := \frac{\pi \cdot \left(\frac{De}{12}\right)^2}{4}$$
 92

Ecuación 3.35 
$$Gc := \frac{mc}{at_c}$$
 92

Ecuación 3.36 
$$he := 0.36 \cdot \left[ \left( \frac{Gc \cdot De}{\mu_c} \right)^{0.55} \cdot \left( \frac{cp_c \cdot \mu_c}{k_c} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \cdot \frac{k_c}{De}$$
 92

Ecuación 3.37 
$$U := \frac{1}{\frac{1}{hi} + \frac{Aext \cdot e}{k_{cu} \cdot Aml} + \frac{1}{he}}$$
 92

Ecuación 3.38 
$$As1 := \frac{Qtotal}{U \cdot DMLT}$$
 93

Ecuación 3.39 
$$Tm_{agua} := \frac{Ti_{agua} + To_{agua}}{2}$$
 98

Ecuación 3.40 
$$Q := m_{agua} \cdot cp_{agua} \cdot (Ti_{agua} - To_{agua})$$
 99

Ecuación 3.41 
$$Ai := Nt \cdot Di \cdot L$$
 99

Ecuación 3.42 
$$Q := m_{aire} \cdot cp_{aire} \cdot (To_{aire} - Ti_{aire})^{\blacksquare}$$
 99

Ecuación 3.43 
$$To_{aire} := \frac{Q}{\frac{m_{aire1}}{3600} \cdot cp_{aire}} + Ti_{aire}$$
 100

Ecuación 3.44 
$$Q := U \cdot A \cdot F \cdot DMLTc^{\blacksquare}$$
 100

Ecuación 3.45 
$$DMLT$$
 101

## CAPÍTULO 6

Ecuación 6.1 
$$VAN = VAN_0 + VAN_1 + VAN_2 + \dots + VAN_n$$
 170

Ecuación 6.2 
$$VAN = \frac{FE_0}{(1+k)^0} + \frac{FE_1}{(1+k)^1} + \frac{FE_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{FE_n}{(1+k)^n}$$
 170

Ecuación 6.3 
$$VAN = 0 = \frac{FE_0}{(1+TIR)^0} + \frac{FE_1}{(1+TIR)^1} + \frac{FE_2}{(1+TIR)^2} + \dots + \frac{FE_n}{(1+TIR)^n}$$
 171

## NOMENCLATURA DE LAS ECUACIONES

$\rho$	Densidad
$\Lambda_{\text{vapor}}$	Calor latente de vaporización
$\mu$	Viscosidad cinemática
$A_{\text{ml}}$	Área transferencia tubería cobre
$A_{\text{s}}$	Área de transferencia de calor por la tubería
$A_{\text{s1}}$	Área de transferencia
$a_{\text{t\_h}}$	área equivalente hidrocarburo
$A_{\text{ext}}$	Área externa del tubo de cobre
$A_{\text{int}}$	Área interior tubo de cobre
$c_{\text{p}}$	capacidad calorífica
$D$	Diámetro interno
$D_{\text{MLT}}$	Diferencia media de temperatura logarítmica
$D_{\text{i}}$	Diámetro interno
$e$	Espesor
$G_{\text{i}}$	Gasto másico
$g$	Gravedad
$H$	Altura del tanque
$h$	altura hidrocarburo
$h_{\text{gas}}$	Altura que ocupa el gas en el calentador
$h_{\text{i\_h}}$	entalpía de entrada hidrocarburo
$h_{\text{o\_h}}$	entalpía salida hidrocarburo
$h_{\text{e}}$	Coefficiente de convección externo
$j_{\text{H}}$	Número de Jacob para el hidrocarburo
$k_{\text{h}}$	Conductividad del hidrocarburo
$k_{\text{cu}}$	Conductividad del cobre
$L$	Longitud tubería interna condensador
$m$	masa
$m_{\text{h}}$	caudal másico del hidrocarburo

Np	Número de pasos
Nt	Número de tubos
P	Presión
Qa	Calor necesario para pasar la temperatura del hidrocarburo de 20 a 65°C
Qb	Calor necesario para cambiar de estado del hidrocarburo
Qt	Calor total
q_sobrec	Calor de sobrecalentamiento
q_cond	Calor de condensación
Re	Número de Reynolds
S1	Esfuerzo longitudinal
S2	Esfuerzo Circunferencial
TIR	Taza interna de retorno
Th_i	Temperatura de entrada del hidrocarburo
Th_sat	Temperatura de saturación
tm_h	Temperatura media de hidrocarburo
Tmed_c	Temperatura media agua
t	Espesor
Tc_i	Temperatura de entrada del agua
Tc_o	Temperatura de salida del agua
VAN	Valor actual neto
U	Coeficiente global de transferencia de calor
V	Volumen

# CAPÍTULO 1 GENERALIDADES

## 1.1. Introducción

En el Ecuador, el crecimiento hidrocarburífero ha ocasionado que cada vez encontremos más contaminación, no solo en el área en donde se extrae el hidrocarburo sino también en todos los lugares en los que se trabaja con este elemento. Hasta el momento, las normas ambientales no son tan exigentes como para combatir este problema, pues intenta regularizar las emisiones contaminantes sin embargo no enfatiza el proceso de manejo de desechos de hidrocarburos generados por todas las empresas que usan este solvente. Si no se toman medidas correctivas en la norma ambiental vigente, continuará la peligrosa manipulación de estos residuos lo que afectará directamente a las personas expuestas a los mismos.

Ciudades como Quito y Guayaquil han arrojado datos de alta contaminación debido al mal manejo de residuos hidrocarburíferos, en su mayoría, éstos son producto de los procesos de producción de muchas empresas y compañías que luego de ser usados, son almacenados para luego enviarlos a los incineradores calificados por el distrito. Mucha de esta energía potencial que poseen los hidrocarburos podría ser reutilizada en un proceso de la empresa pero la falta de investigación, los costos de desarrollo y el bajo precio de compra de hidrocarburos genera que las empresas no se preocupen mucho por el aspecto ambiental. Siendo, el hidrocarburo barato, es más rentable para la empresa adquirir derivados que intentar reutilizar los que están destinados a la quema.

En la mayoría de los países industrializados, principalmente en la Unión Europea, hay conciencia de esta realidad. Sin embargo, cambiar patrones de consumo no es fácil. Grandes industrias que utilizan derivados de petróleo en sus procesos de producción han realizando progresivamente, estudios para

reducir los residuos de hidrocarburos que sus procesos generan. La alternativa de mayor potencial inmediato es la energía nuclear, sin embargo, ésta es costosa y los intereses de la industria petrolera se han encargado de desviar su atención.

Cada vez que un kilómetro cuadrado de selva es reemplazado por un campo de cultivo, el área de hojas verdes que reciclan CO<sub>2</sub> se reduce a menos de una milésima. Es importante que los habitantes de las grandes ciudades tomen conciencia de que el ambiente ecológico es una necesidad primaria. Se debería legislar sobre las sustancias que pueden ir a la atmósfera y la concentración que no debe superarse.

El aire contaminado nos afecta en nuestro diario vivir, manifestándose de diferentes formas en nuestro organismo, como la irritación de los ojos y trastornos en las membranas conjuntivas, irritación en las vías respiratorias, agravación de las enfermedades broncos pulmonares, entre otras.

Confiamos que en la medida que se van dando hechos que han dado paso a alteraciones en el medio ambiente, tales como la aparición de tornados, huracanes, terremotos; además del calentamiento de la tierra, la escasez del agua, la deforestación de selva vírgenes y desaparición de especies animales, también se lleguen a acuerdos, compromisos y alianzas eficaces que den paso a Programas, convenios y acciones que ayuden a preservar el medio ambiente de este planeta.

## **1.2. Antecedentes**

Para efectos de realización del proyecto de tesis actual, se ha elegido a la empresa AV.CORP, la cual cuenta con 10 años de experiencia en la oferta de servicios logísticos y la re utilización de residuos ambientales industriales. El enfoque de la empresa está orientado al área hidrocarburífera.

Dentro de sus actividades, AV.CORP recibe tanques de reserva de hidrocarburos para darles un tratamiento de lavado, rectificado y pintado, logrando de esta manera la valorización de residuos que normalmente son vertidos de manera incontrolada en el Distrito Amazónico.

AV.CORP recibe actualmente alrededor de 300 tanques de almacenamiento con una capacidad de 55 galones por día para su correspondiente gestión.

En su gran mayoría, estos tanques tienen un alto contenido de hidrocarburos tales como aceite quemado, diesel, gasolina, entre otros, los mismos que en la actualidad son almacenados y enviados para su incineración, con los aspectos e impactos ambientales negativos que esto genera.

En la actualidad, el cuidado del medio ambiente es una responsabilidad mundial y más aún en AV.CORP, cuya función social es la de colaborar con el cuidado ambiental generando en el sector industrial una mayor conciencia de reciclaje y reutilización de pasivos ambientales.

## **1.3. Definición del problema**

El sector industrial siempre ha tenido una visión conforme a su rentabilidad, sin importarle el daño que se pueda causar el ambiente, por esta razón AV.Corp

ofrece el servicio de recolección de desechos productos de un proceso de producción a fin de recuperar los tanques que estos son desechados. Como parte del proceso de recuperación, es necesario realizar la limpieza de los tanques, al estar muchos de ellos sucios en su interior al contener aceites, naftas, entre otros, el producto necesario para removerlos es el Thinner, luego de este proceso todo este efluente contaminado se lo vuelve a recuperar y posteriormente enviado a incineradores.

Como parte de una ideología de soluciones ambientales, AV.CORP se ha visto en la necesidad de darle una utilidad a estos efluentes contaminados, es por esta razón que se ha estudiado la posibilidad de recuperar estos efluentes mediante un proceso de destilación fraccionada.

Esto no solamente generará una reducción en costos de producción sino también el de crear conciencia en el sector industrial para el aprovechamiento de los recursos que se tiene.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1 General**

Diseñar y construir un equipo de destilación con capacidad de 110 galones diarios para la recuperación de hidrocarburos volátiles presentes en efluentes líquidos contaminados, producto del proceso de lavado de tanques en la empresa AV.CORP

### **1.4.2 Específicos**

1. Diseñar y construir el calentador y el sistema de refrigeración para el equipo de destilación.
2. Realizar estudios de transferencia de calor en hidrocarburos para aprovechar al máximo la energía destinada al calentamiento del caldero.

3. Efectuar un análisis del aprovechamiento del hidrocarburo versus la cantidad de efluentes líquidos contaminados introducidos.
4. Realizar un manual del usuario para el equipo.

## **1.5. Alcance**

Diseñar y construir un equipo de destilación con capacidad de 110 galones diarios con el fin de recuperar hidrocarburos volátiles presentes en efluentes líquidos contaminados, producto del proceso de lavado de tanques en la empresa AV.CORP. El fin principal es el que este hidrocarburo limpio reingrese en el proceso sistemático de la empresa en el área de limpieza de los tanques de almacenamiento, a fin de reducir el rubro por concepto de compra de hidrocarburos dentro de los costos de producción, además de aportar directamente con la conservación del medio ambiente, evitando la quema innecesaria de hidrocarburos en las plantas que manejan estos elementos.

## **1.6. Justificación e importancia**

AV.CORP al encargarse de la reutilización de tanques de almacenamiento, ha diseñado un proceso sistemático y ordenado para lograr su objetivo.

El primer proceso es el de clasificación de los tanques, el cual se realiza de forma manual mediante un proceso visual por parte de los operadores. Se los clasifica en tres grupos, los de fase uno que no presentan daños mayores, los de fase dos, que tienen golpes o rayones menores y los de fase tres que presentan daños en su forma y que solo podrán ser reutilizados una vez más.

Luego de la clasificación, los tanques son sometidos a un proceso de limpieza exhaustiva, en este proceso se limpia toda la superficie interior de residuos tales como diesel, aceite, gasolina, y fibras contaminadas por este hidrocarburo. En este proceso de limpieza se utiliza thinner, el cual es un

derivado del petróleo, este elemento ayuda a los operadores a retirar la suciedad de los tanques.

Según los datos obtenidos en el departamento financiero, AV.CORP gasta alrededor de 1500 USD mensuales en la compra de solventes. Este valor que la empresa gasta mensualmente podría disminuir si se desarrolla un proceso de recuperación de sólidos volátiles que permita obtener un hidrocarburo semejante al thinner, con el cual se pueda limpiar los tanques de almacenamiento. Basado en éste antecedente y posible oportunidad competitiva para la empresa, se plantea el proyecto de tesis que busca el diseño de un sistema que facilite la obtención de un hidrocarburo con base en el calentamiento de estos residuos sólidos.

## **CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Hidrocarburos totales de petróleo (TPH)**

Los hidrocarburos totales de petróleo (abreviados TPH en inglés) se usan para describir una gran familia de varios cientos de compuestos químicos originados de petróleo crudo. El petróleo crudo es usado para manufacturar productos de petróleo, los que pueden contaminar el ambiente. Debido a que hay muchos productos químicos diferentes en el petróleo crudo y en otros productos de petróleo, no es práctico medir cada uno en forma separada. Sin embargo, es útil medir la cantidad total de TPH en una muestra.

Los TPH son una mezcla de productos químicos compuestos principalmente de hidrógeno y carbono, llamados hidrocarburos. Los científicos han dividido a los TPH en grupos de hidrocarburos de petróleo que se comportan en forma similar en el suelo o el agua. Estos grupos se llaman fracciones de hidrocarburos de petróleo. Cada fracción contiene muchos productos químicos individuales.

Algunas sustancias químicas que pueden encontrarse en los TPH incluyen a hexano, combustibles de aviones de reacción, aceites minerales, benceno, tolueno, xilenos, naftalina, y fluoreno; como también otros productos de petróleo y componentes de gasolina. Sin embargo, es probable que muestras de TPH contengan solamente algunas, o una mezcla de estas sustancias químicas.

Algunos de los compuestos de los TPH pueden afectar al sistema nervioso. Un compuesto en altos niveles de concentración en el aire, puede producir dolores de cabeza y mareo. Otro compuesto puede causar una afección a los nervios llamada "neuropatía periferal" que consiste en adormecimiento de los pies y las

piernas. Otros compuestos de los TPH pueden producir efectos a la sangre, al sistema inmunitario, los pulmones, la piel y los ojos.

Estudios en animales han demostrado efectos a los pulmones, el sistema nervioso central, el hígado y los riñones a causa de la exposición a compuestos de los TPH. También se ha demostrado que ciertos compuestos de los TPH pueden afectar la reproducción y el feto en animales<sup>1</sup>.

## **2.2 Tipos de Hidrocarburos totales de petróleo**

El petróleo crudo y las fracciones que provienen de él están conformados de moléculas denominadas hidrocarburos y por una combinación de átomos de carbono tetravalentes con átomos de hidrógeno monovalentes. Sin embargo, en el petróleo crudo no existen determinados tipos de estructuras moleculares; mientras que en las formas olefínicas inestables, las estructuras moleculares se transforman de manera total e íntegra en moléculas estables dentro de los propios yacimientos durante el transcurso de los siglos.

Mediante la realización de distintos tratamientos sobre el petróleo crudo, el refinador puede hacer reaparecer estas combinaciones moleculares inexistentes.

Por otro lado, el petróleo crudo contiene, azufre, oxígeno y nitrógeno bajo la forma de compuestos tales como sulfuro de hidrógeno, mercaptanos R-SH, disulfuros y polisulfuros (RS-S-R)<sub>n</sub>, ácidos nafténicos, entre otros.

---

<sup>1</sup> Reporte anual de la agencia para sustancias tóxicas del departamento de salud de los EEUU.

Finalmente, dentro del proceso de decantación prolongada, se observan en el petróleo crudo, sedimentos y agua salada provenientes del yacimiento o del transporte en buques petroleros.

### **2.2.1 Tipos de Hidrocarburos totales de petróleo**

- **Hidrocarburos aromáticos.-** Son aquellos hidrocarburos que poseen las propiedades especiales asociadas con el núcleo o anillo del benceno, en el cual hay seis grupos de carbono-hidrógeno unidos a cada uno de los vértices de un hexágono. Los enlaces que unen estos seis grupos al anillo presentan características intermedias, respecto a su comportamiento, entre los enlaces simples y los dobles. Así, aunque el benceno puede reaccionar para formar productos de adición, como el ciclohexano, la reacción característica del benceno no es una reacción de adición, sino de sustitución, en la cual el hidrógeno es reemplazado por otro sustituto, ya sea un elemento univalente o un grupo.

Las principales fuentes de hidrocarburos aromáticos son la destilación de la hulla y una serie de procesos petroquímicos, en particular la destilación catalítica, la destilación del petróleo crudo y la alquilación de hidrocarburos aromáticos de las series más bajas. Los aceites esenciales, que contienen terpenos y p-cimeno, también pueden obtenerse de los pinos, los eucaliptos y las plantas aromáticas y son un subproducto de las industrias papeleras que utilizan pulpa de pino. Los hidrocarburos policíclicos se encuentran en las atmósferas urbanas.

En la actualidad, los principales usos de los compuestos aromáticos como productos puros son: la síntesis química de plásticos, caucho sintético, pinturas, pigmentos, explosivos, pesticidas, detergentes, perfumes y fármacos. También se utilizan, principalmente en forma de mezclas, como disolventes y como constituyentes.

La absorción de los hidrocarburos aromáticos tiene lugar por inhalación, ingestión y, en cantidades pequeñas, por vía cutánea.

En general, los derivados monoalquilados del benceno son más tóxicos que los dialquilados, y los derivados de cadena ramificada son más tóxicos que los de cadena simple. Los hidrocarburos aromáticos se metabolizan mediante la bioxidación del anillo. Si existen cadenas laterales, preferiblemente de grupos metilo, éstas se oxidan y el anillo permanece sin modificar. En gran parte se convierten en compuestos hidrosolubles y posteriormente se conjugan con glicina, ácido glucurónico o ácido sulfúrico y se eliminan en la orina.

Los hidrocarburos aromáticos pueden causar efectos agudos y crónicos en el sistema nervioso central. La intoxicación aguda por estos compuestos produce cefalea, náuseas, mareo, desorientación, confusión e inquietud. La exposición aguda a dosis altas puede incluso provocar pérdida de consciencia y depresión respiratoria.

Uno de los efectos agudos más conocidos es la irritación respiratoria (tos y dolor de garganta). También se han observado síntomas cardiovasculares, como palpitaciones y mareos. Los síntomas neurológicos de la exposición crónica pueden ser: Cambios de conducta, depresión, alteraciones del estado de ánimo y cambios de la personalidad y de la función intelectual.

También se sabe que la exposición crónica produce o contribuye a producir neuropatía distal en algunos pacientes. El tolueno se ha asociado con un síndrome persistente de ataxia cerebelar. Otros efectos crónicos son sequedad, irritación y agrietamiento de la piel y dermatitis.

La exposición, sobre todo a los compuestos clorados de este grupo, puede causar hepatotoxicidad. El benceno es un carcinógeno humano

demostrado que favorece el desarrollo de todo tipo de leucemias y en particular, de la leucemia no linfocítica aguda. También puede causar anemia aplásica y pancitopenia reversible.

Los hidrocarburos aromáticos, en conjunto, entrañan un riesgo considerable de ignición. La National Fire Prevention Association (NFPA) de Estados Unidos ha clasificado a la mayoría de los compuestos de este grupo con un código de inflamabilidad de 3 (donde 4 representa un riesgo grave)<sup>2</sup>. Con estas sustancias deben adoptarse las medidas necesarias para evitar la acumulación de vapores en los lugares de trabajo y para atacar rápidamente las fugas y los derrames. En presencia de vapores se deben evitar las fuentes de calor extremo.

### Tablas de Hidrocarburos aromáticos:

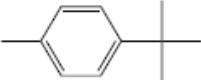
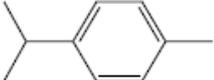
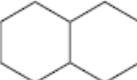
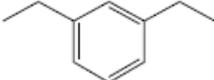
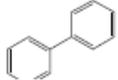
Producto químico	Número CAS	Fórmula estructural
BENCENO	71-43-2	
<i>p</i> - <i>tert</i> -BUTILTOLUENO	98-51-1	
<i>p</i> -CIMENO	olueno; 99-87-6	
CUMENO	98-82-8	
DECAHIDRONAFTALENO	91-17-8	
DIETILBENCENO	25340-17-4	
DIFENILO	92-52-4	

Tabla 2.1 Hidrocarburos aromáticos<sup>3</sup>

<sup>2</sup> Reporte de la (NFPA), 2009.

<sup>3</sup> KLIFOR; Andrew, Enciclopedia de la salud y seguridad en el trabajo.

## Riesgos para la salud

Denominación química Número CAS	Periodo corto de exposición	Periodo largo de exposición	Vías de exposición
BENCENO 71-43-2	piel; tract resp; pulmones; SNC	piel; sangre; hígado; sistema inmune	Inhalación Piel Ingestión
<i>p-terc</i> -BUTILTOLUENO 98-51-1			
<i>p</i> -CIMENO 99-87-6	ojos; piel		Inhalación
CUMENO 98-82-8			
DIETILBENCENO 25340-17-4	ojos; piel; tract resp; pulmones; SNC	piel; riñones; hígado	Inhalación Piel Ojos Ingestión

Tabla 2.2 Riesgos para la salud<sup>4</sup>

Denominación química Número CAS	Síntomas	Organos afectados Vías de entrada	Síntomas
BENCENO 71-43-2	Mareo, sopor, cefalea, náuseas, disnea, convulsiones, inconsciencia Puede absorberse, sequedad de piel Dolor abdominal, dolor de garganta, vómitos	sangre; SNC; piel; médula ósea; ojos; sis resp inh, abs, ing, con	Irrit ojos, piel, nariz, sis resp; mar; cef, nau, andar vacitante; ftg, anor, las; dermat; depres médula ósea; [carc]
<i>p-terc</i> -BUTILTOLUENO 98-51-1		SCV; SNC; piel; médula ósea; ojos; sis resp sup; hígado; riñones inh, ing, con	Irrit ojos y piel; sequedad de nariz y garganta; cef; TA baja, taqui, estres SCV anor; SNC, depres hemato; sabor metálico; les hepáticas y renales
<i>p</i> -CIMENO 99-87-6	Mareo, sopor, vómitos, inhalación		
CUMENO 98-82-8		ojos; sis resp sup; piel; SNC inh, abs, ing, con	Irrit ojos, piel, muc; dermat; cef, narco, coma
DIETILBENCENO 25340-17-4	Mareo, embotamiento, cefalea, náuseas Sequedad de piel, enrojecimiento Enrojecimiento, dolor Espasmos abdominales, mareo, embotamiento, cefalea, náuseas		

Tabla 2.3 Riesgos para la salud 2<sup>5</sup>

<sup>4</sup> KLIFOR; Enciclopedia de la salud y seguridad en el trabajo

- **Hidrocarburos alifáticos.-** Son compuestos orgánicos constituidos por carbono e hidrógeno, en los cuales los átomos de carbono forman cadenas abiertas. Los hidrocarburos alifáticos de cadena abierta se clasifican en alcanos, alcanos o alquenos y alcinos o alquinos.

Una cadena alifática alcano es una agrupación hidrocarbonada lineal con la fórmula:



Los hidrocarburos alifáticos son compuestos frecuentemente utilizados como disolventes de aceites, grasas, caucho, resinas, etc., en las industrias de obtención y recuperación de aceites, fabricación de pinturas, tintas, colas, adhesivos, así como, materia prima de síntesis orgánica. Por esta razón, resulta de interés disponer de un método ensayado y validado para la determinación de vapores de hidrocarburos alifáticos en aire, con el fin de poder evaluar la exposición laboral a este tipo de compuestos.

- **Alcanos.-** son compuestos con fórmula molecular  $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ . El hidrocarburo más simple es el metano  $\text{CH}_4$  ( $n=1$ ). Los hidrocarburos de cadena lineal se denominan hidrocarburos normales. Los cuatro primeros miembros de la familia de hidrocarburos lineales son los siguientes:

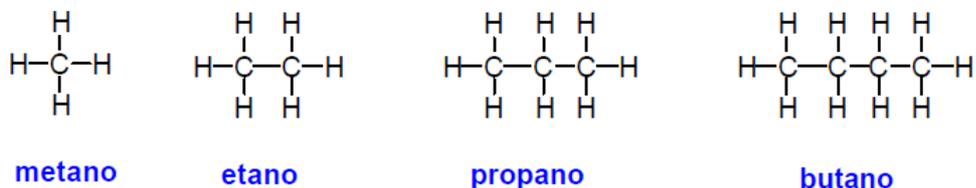


Figura 2.1 Estructura molecular de los alcanos<sup>6</sup>

<sup>5</sup> KLIFOR; Enciclopedia de la salud y seguridad en el trabajo

<sup>6</sup> [www.sinorg.uji.es](http://www.sinorg.uji.es)

El alcano más simple es el metano CH<sub>4</sub>. Desde el siglo pasado se había demostrado mediante hechos experimentales que la estructura del metano tenía una forma tetraédrica. Sin embargo, la justificación de esta estructura no pudo hallarse hasta el desarrollo de la teoría mecanocuántica entre los años 1920 y 1930.

- **Alquenos.-** son hidrocarburos con enlaces dobles carbono-carbono. Se les denomina también olefinas. El alqueno más simple es el etileno cuya fórmula molecular es C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>. El doble enlace se representa, en una estructura de Lewis, mediante dos pares de electrones entre los átomos de carbono. La longitud del enlace C=C en el etileno es de 1.33 Å, mucho más corto que el enlace simple C-C del etano que es de 1.54 Å. La longitud del enlace C-H en el etileno es de 1.08 Å, ligeramente menor que el enlace C-H en el etano que es de 1.09 Å. Los ángulos de enlace de C-CH y H-C-H son de 121.7° y 116.6° respectivamente.

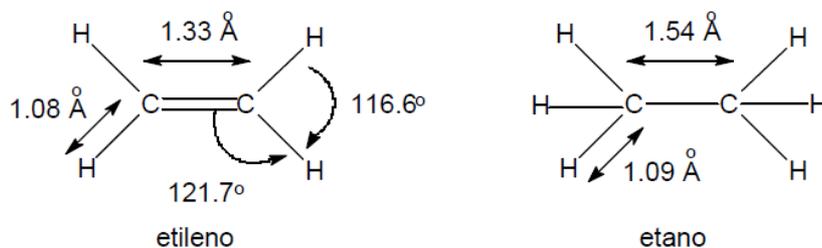


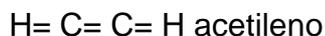
Figura 2.2 Estructura molecular de los alquenos<sup>7</sup>

- **Alquinos.-** son hidrocarburos que contienen un triple enlace C-C. Se les denomina también hidrocarburos acetilénicos porque derivan

---

<sup>7</sup> <http://usuarios.multimania.es>

del alquino más simple que se llama acetileno. La estructura de Lewis del acetileno muestra tres pares de electrones en la región entre los núcleos de carbono.



El acetileno tiene una estructura lineal que se explica admitiendo una hibridación  $sp$  en cada uno de los átomos de carbono. El solapamiento de dos orbitales  $sp$  entre sí genera el enlace  $\sigma$  C-C. Por otra parte, el solapamiento del orbital  $sp$  con el orbital  $1s$  del hidrógeno forma el enlace  $\sigma$  C-H. Los dos enlaces  $\pi$  se originan por solapamiento de los dos orbitales  $p$  que quedan en cada uno de los dos átomos de carbono. El solapamiento de estos orbitales forma un cilindro de densidad electrónica que circunda al enlace  $\sigma$  C-C.

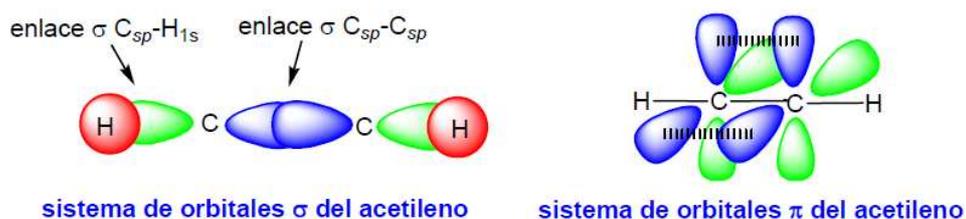


Figura 2.3 Estructura molecular de los alquinos<sup>8</sup>

## 2.2.2 Propiedades de los Hidrocarburos totales de petróleo

La mayor parte de los productos de origen petrolífero son mezclas más o menos sencillas en el caso de los gases, pero muy complejas al tratarse de fracciones líquidas. Además, los productos comerciales, los cuales deben

<sup>8</sup> <http://www.sinorg.uji.es/>

responder a determinadas especificaciones, son generalmente mezclas de fracciones complejas: naftas, carburantes para reactores, fueloils y aceites.

Las principales características son:

- Tensión de vapor de los hidrocarburos puros de las fracciones del petróleo y de sus mezclas.
- Propiedades críticas, temperatura y presión críticas.
- Densidad
- Propiedades térmicas como: calor específico, coeficiente de compresión adiabática, calor latente de vaporización, entalpía y conductividad térmica.
- Viscosidad
- Potencia calorífica o poder calorífico
- Número de octano
- Índice de cetano
- Puntos de congelación
- Límites de explosividad y punto de inflamación
- Tensión superficial
- Solubilidad de los hidrocarburos y de los hidrocarburos en el agua.
- Penetración y reblandecimiento de los asfaltos
- Curvas de destilación

A continuación se detallan los principales parámetros que afectan mayormente el impacto ambiental; en primer lugar resaltamos el factor de caracterización  $K_{uop}$ , usado para la clasificación de los crudos de petróleo.

Nelson, Watson y Murphy de la sociedad U.O.P (Universal Oil Products) propusieron la siguiente fórmula, que determina el factor de caracterización  $K_{uop}$ : siendo T la temperatura de ebullición expresada en grados Rankine.

$$K_{uop} = \frac{3\sqrt{T (^{\circ}R)}}{sp. gr. 60/60}$$

Ecuación 2.1 Factor de caracterización<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> [www.minas.upm.es](http://www.minas.upm.es)

- **Tensión de vapor.-** Mide la tendencia de las moléculas a dispersarse de una fase líquida para generar una fase vapor en equilibrio termodinámico. Es una función creciente de la temperatura y específica de cada cuerpo puro. Esta característica es muy significativa ya que de una manera indirecta indica el contenido en productos livianos que determinan la seguridad durante el transporte; las pérdidas en el almacenamiento y la volatilidad de las naftas.

En termodinámica, la ecuación de Clapeyron aplicada a un gas perfecto se escribe:

$$d(\ln P) = \frac{1}{R} \frac{dr}{T} \quad (1)$$

#### Ecuación 2.2 Ecuación de Clapeyron aplicada a un gas perfecto<sup>10</sup>

En donde:

- P, es la presión del gas saturado o la tensión de vapor del líquido
- r, el calor de vaporización molecular;
- R, la constante de los gases perfectos
- T, la temperatura absoluta °K

- **Temperatura y presión.-** Son características físicas de los hidrocarburos. Estos parámetros determinan el punto límite superior de la curva de tensión de vapor más allá del cual no se advierte el cambio de fase. Este punto crítico corresponde a la identidad perfecta de las propiedades del líquido y del vapor: densidad, índice de refracción, etc. Particularmente, el calor de vaporización se hace nulo en dicho punto.

---

<sup>10</sup> [www.minas.upm.es](http://www.minas.upm.es)

- **Densidad.-** Es la relación entre el peso de un determinado volumen de muestra a una temperatura t y el peso del mismo volumen de agua a una temperatura determinada.

Los americanos para medir la densidad utilizan el grado Baume, definido como una función hiperbólica de la densidad.

$$^{\circ}\text{Baumé} = \frac{140}{\text{densidad}} - 130$$

**Ecuación 2.3 Ecuación para medir el grado Baumé<sup>11</sup>**

Esta unidad corresponde al antiguo grado Baumé, aún utilizado para caracterizar la concentración en ácido de soluciones acuosas.

- **Calor específico.-** Es la cantidad de calor que se requiere aplicar a la unidad de peso para aumentar su temperatura en un grado. La unidad de calor específico es la misma en el sistema métrico y anglosajón.

Industrialmente, se utiliza como unidad de peso el kilogramo, la tonelada o la libra. En estas circunstancias, tenemos:

$$\text{KJ/Kg}^{\circ}\text{C} = \text{Kcal/Kg}^{\circ}\text{C} = \text{th/t}^{\circ}\text{C} = \text{Btu/lb}^{\circ}\text{F}$$

- **La conductividad térmica.-** representa el flujo de calor referido a la unidad de tiempo en un medio homogéneo, de superficie perpendicular a la dirección del flujo, y considerando el gradiente de temperatura entre las superficies de entrada y salida. La unidad de conductividad térmica

---

<sup>11</sup> [www.minas.upm.es](http://www.minas.upm.es)

práctica utilizada es la Kcal/h.m<sup>2</sup>°C/m; mientras que la unidad correspondiente anglosajona es la Btu/hr.

- **Poder calorífico o potencia calorífica.-** es la cantidad de calor liberada por la combustión de la unidad de volumen o de peso de un combustible.

Para un combustible tomado a 15°C y los productos de la combustión gaseosos a dicha temperatura, arroja la potencia calorífica inferior I, mientras que, si se condensa el vapor de agua en los humos a 15°C, se alcanza la potencia calorífica superior P.

La diferencia entre estos valores significa el calor de condensación del agua a 15°C, que es: 588Kcal por Kg de agua, o bien 473 Kcal por m<sup>3</sup> de vapor de agua a 0°C, 447 Kcal/m<sup>3</sup> de vapor de agua a 15°C. Usualmente se considera el estado de referencia a 15°C (60°F) con preferencia a 0°C, por concordar sensiblemente con la temperatura ambiente.

- **Viscosidad.-** es una magnitud física que mide la resistencia interna al flujo de un fluido, resistencia producto del frotamiento de las moléculas que se deslizan unas contra otras. La inversa de la viscosidad es la fluidez.

La viscosidad es un parámetro que influye en la potencial emisión de contaminantes dado que es una determinante en las condiciones de la combustión. Además resulta importante para definir las posibilidades de bombeo de los productos y el tipo de régimen de los caños.

En los fuel oils es el parámetro que se sigue en la clasificación de los productos pesados.

La viscosidad es una especificación de primer orden en los aceites lubricantes, ya que condiciona las cualidades requeridas para la lubricación.

Existen diversas unidades para definir la viscosidad, siendo las más utilizadas las descritas a continuación:

- **Viscosidad absoluta:** Representa la viscosidad dinámica del líquido y es medida por el tiempo en que tarda en fluir a través de un tubo capilar a una determinada temperatura. Sus unidades son el poise o centipoise ( $\text{gr/Seg}\cdot\text{cm}$ ), siendo muy utilizada a fines prácticos.
- **Viscosidad cinemática:** Representa la característica propia del líquido desechando las fuerzas que genera su movimiento, obteniéndose a través del cociente entre la viscosidad absoluta y la densidad del producto en cuestión. Su unidad es el stoke o centistoke ( $\text{cm}^2/\text{seg}$ ).
- **Solubilidad.-** Los hidrocarburos son solubles entre sí en todas las proporciones.

La separación de los componentes puede llevarse a cabo con solventes polares, como el dióxido de azufre, furfural y otros. En éstos, los aromáticos se disuelven de manera más fácil que los parafínicos y nafténicos.

Por otro lado, los hidrocarburos de elevado peso molecular con los de inferior peso molecular son miscibles en cierto grado; determinando que la solución se sature provocando la precipitación del componente de mayor peso.

- **Punto de inflamación.-** Es la temperatura a partir de la cual un vapor se inflama al ser expuesto a una fuente de ignición.

El punto de inflamación, que representa el contenido de productos ligeros de una fracción, condiciona los riesgos de explosión eventual si la fase

gaseosa de los recipientes de almacenaje contiene una concentración en hidrocarburos comprendida entre los límites de explosividad. A temperatura ambiente, son los destilados intermedios del tipo de disolvente pesado o keroseno, los que determinan el mayor peligro durante el almacenaje. Los productos ligeros como las naftas alcanzan una concentración en la fase vapor que excede el límite superior, mientras que los productos pesados no emiten suficientes vapores como para obtener el límite inferior de explosividad. La presión afecta parcialmente al vapor del límite inferior; no obstante, su aumento tiende a disminuir apreciablemente el límite superior, es decir, a incrementar la zona de las concentraciones explosivas.

Algunos límites de explosividad y temperaturas de auto-inflamación de los hidrocarburos puros y de las fracciones comerciales son:

PRODUCTOS	LÍMITES DE EXPLOSIVIDAD % VOLUMEN HIDROCARBUROS EN AIRE		TEMPERATURA DE AUTOINFLAMABILIDAD (°C)
	INFERIOR	SUPERIOR	
Hidrógeno	4.1	74.2	580
Sulfuro de hidrógeno	4.3	45.5	260
Metano	5.3	13.9	538
Acetileno	2.5	80.0	335
Etileno	3.02	34.0	543
Etano	3.12	15.0	510
Propileno	2.0	11.1	497
Propano	2.37	9.5	466
Isobutano	1.8	8.4	-
n-Butano	1.6	8.5	430
Pentano	1.4	8.0	309
Hexano	1.25	6.9	247
Heptano	1.0	6.0	233
Octano	0.84	3.2	232
Nonano	0.74	2.9	-
Decano	0.67	2.6	-
Ciclohexano	1.31	8.35	-
Benceno	1.40	8.0	580
Tolueno	1.27	7.0	552
Gas natural	4.8	13.5	-
Eter de petróleo	1.4	5.9	245
Nafta P.V.R = 0.7	1.3	6.0	260
Keroseno	1.16	6.0	255

Tabla 2.4 Límites de explosividad y temperaturas de auto-inflamación de los hidrocarburos puros y de las fracciones comerciales<sup>12</sup>

<sup>12</sup> <http://energia3.mecon.gov.ar>

### 2.2.3 Diluyentes

El thinner también conocido como diluyente o adelgazador de pinturas es una mezcla de solventes de naturaleza orgánica derivados del petróleo. Ha sido diseñado para disolver, diluir o adelgazar sustancias insolubles en agua, como la pintura, los aceites y las grasas. El thinner está compuesto por un solvente activo, un cosolvente y un diluyente, sustancias que efectúan una función en particular.

El solvente, es el que tendrá un efecto directo sobre lo que se está disolviendo, el cosolvente potenciará el efecto del solvente activo y el diluyente dará volumen al compuesto.

El thinner tiene como solvente principal al tolueno, como cosolvente al benceno y como diluyente a una serie de solventes, sustancias todas ellas tóxicas para el hombre.

No todos los diluyentes tienen el mismo poder de dilución, por lo tanto con idénticas cantidades de diluyente se obtendrán distintas viscosidades de aplicación. Es decir que el poder de dilución de un thinner dependerá no sólo de la composición del diluyente sino también, y fundamentalmente, de la del producto.

No existen normas ni criterios que definan sus características durante la elaboración de thinner de baja calidad. Por esta razón es imposible generalizar con exactitud sus propiedades tanto en sus aplicaciones comerciales, como en los riesgos que su manipulación representa para la salud de trabajadores, así como para farmacodependientes que abusan del mismo.

Los principales componentes del thinner son los siguientes:

<b>Sustancia</b>	<b>Porcentaje</b>
Tolueno 5	50 %
Alcohol metílico 15	50 %
Cetonas 5	40 %
Hexano 5	30 %
Alcoholes 5	40 %
Xileno 5	20 %
Ésteres 3	50 %

Tabla 2.5 Componentes químicos del thinner<sup>13</sup>

Las cantidades varían según el producto deseado.

### **Propiedades físico-químicas**

<b>Estado de agregación</b>	Líquido.
<b>Apariencia</b>	Incoloro
<b>Punto de fusión</b>	La menor es de -34 °C
<b>Temperatura de auto ignición</b>	480 °C
<b>Punto de ebullición</b>	56 - 136 °C
<b>Densidad relativa</b>	0,77 - 0,83

<sup>13</sup> [www.monfel.com](http://www.monfel.com)

<b>Solubilidad</b>	insoluble en agua
<b>Porcentaje de volatilidad por volumen</b>	100
<b>Gravedad</b>	0,9
<b>Presión vapor</b>	9 %

Tabla 2.6 Propiedades físico químicas del thinner<sup>14</sup>

## 2.3 Recuperación de hidrocarburos en efluentes contaminados

### 2.3.1 Destilación fraccionada de hidrocarburos

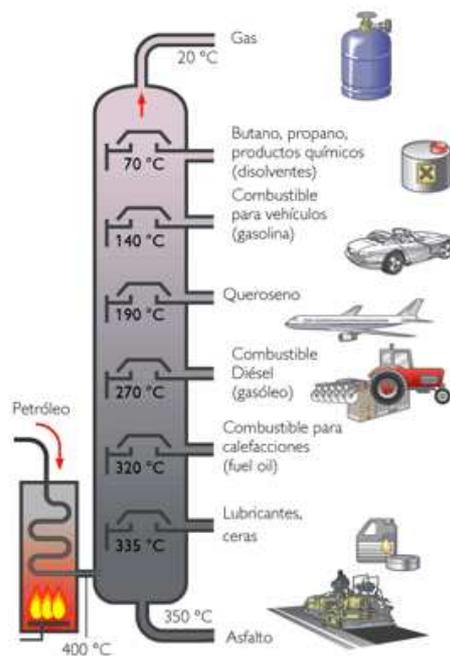
Es un proceso físico utilizado en química para separar mezclas (generalmente homogéneas) de líquidos mediante el calor, con un amplio intercambio calórico y másico entre vapores y líquidos. Se emplea principalmente cuando es necesario separar compuestos de sustancias con puntos de ebullición distintos pero cercanos. Algunos de los ejemplos más comunes son el petróleo, y la producción de etanol.

La principal diferencia que tiene con la destilación simple es el uso de una columna de fraccionamiento. Ésta permite un mayor contacto entre los vapores que ascienden con el líquido condensado que desciende, por la utilización de diferentes "platos" (placas). Esto facilita el intercambio de calor entre los vapores (que ceden) y los líquidos (que reciben). Ese intercambio produce un intercambio de masa, donde los líquidos con menor punto de ebullición se convierten en vapor, y los vapores de sustancias con mayor punto de ebullición pasan al estado líquido.

---

<sup>14</sup> [www.monfel.com](http://www.monfel.com)

La mezcla se pone en el aparato de destilación, que suele consistir en un matraz (u otro recipiente en general esférico), en cuya parte inferior hay unas piedrecillas que impiden que el líquido hierva demasiado rápido. En la boca del recipiente, en la parte superior, hay una columna de fraccionamiento, que consiste en un tubo grueso con placas de vidrio en posición horizontal.



**Figura 2.4 Proceso de destilación fraccionada<sup>15</sup>**

Mientras la mezcla hierve, el vapor producido asciende por la columna, se va condensando en las sucesivas placas y vuelve a caer hacia el líquido, produciendo un reflujo destilado. La columna se calienta desde abajo y, por tanto, la placa más caliente está en la parte inferior, y la más fría en la superior.

En condiciones estables, el vapor y el líquido de cada placa están en equilibrio y solamente los vapores más volátiles llegan a la parte superior en estado

<sup>15</sup> [www.patentados.com](http://www.patentados.com)

gaseoso. Este vapor pasa al condensador, que lo enfría y lo dirige hacia otro recipiente, donde se licúa de nuevo. Se consigue un destilado más puro cuánto más placas de vidrio haya en la columna. La parte condensada en la placa más cercana al azeótropo contiene gradualmente menos etanol y más agua, hasta que todo el etanol queda separado de la mezcla inicial. Este punto se puede reconocer mediante el termómetro ya que la temperatura se elevará bruscamente.

### **2.3.2 Sistema ORS Small diameter filter scavenger (SDFS)**

Es un sistema el cual usa un cartucho flotante de entrada, el cual sigue las fluctuaciones de agua, hasta 12 pulgadas. Están disponibles, sistemas para fluctuaciones mayores de agua. El cartucho de entrada consiste en un flotador y una membrana oleofílica hidrofóbica especialmente tratada.

Esta membrana tan peculiar, permite que los hidrocarburos entren al cartucho a medida que repele al agua. El sistema reduce el grosor de las capas de hidrocarburos al mínimo. Puede ser operado solo, o en conjunto con una bomba de depresión de agua.

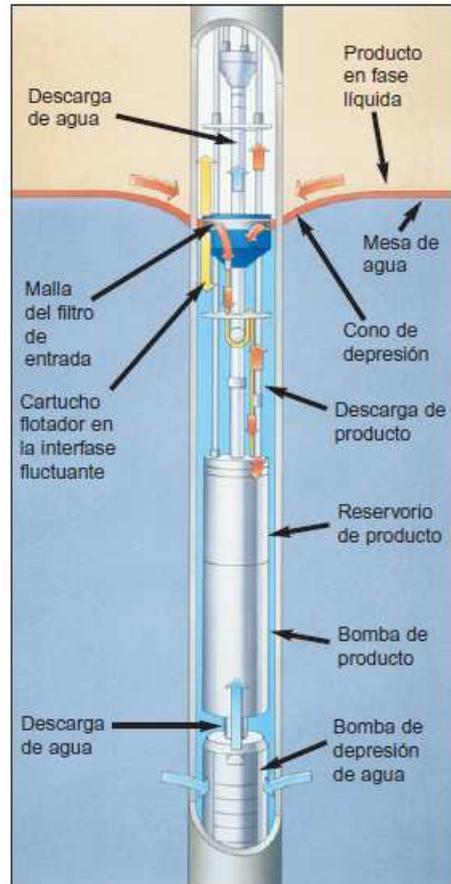


Figura 2.5 Estructura de un ORS sumergido en un pozo<sup>16</sup>

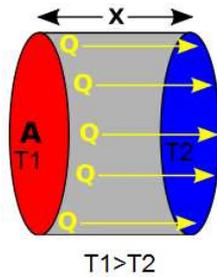
## 2.4 Transferencia de calor

Es el proceso por el que se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a distinta temperatura.

Cuando existe un gradiente de temperatura en un medio estacionario (que puede ser sólido o un fluido), utilizamos el término conducción que no es más que la transferencia de calor que se producirá a través del medio. El término convección se refiere a la transferencia de calor que ocurrirá entre una superficie y un fluido en movimiento cuando están a diferentes temperaturas.

<sup>16</sup> <http://www.geotechenv.com>

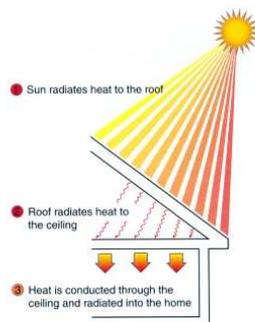
El último modo de transferencia de calor es la radiación térmica, ocurre cuando todas las superficies con temperatura finita emiten energía en forma de ondas electromagnéticas, por tanto, en ausencia de un medio, existe una transferencia neta de calor por radiación entre dos superficies a diferentes temperaturas.



**Figura 2.6 Conducción a través de un sólido o fluido estacionario**



**Figura 2.7 Convección de una superficie a un fluido en movimiento**



**Figura 2.8 Intercambio de calor por radiación entre dos superficies<sup>17</sup>**

<sup>17</sup> [www.lp.netai.net](http://www.lp.netai.net)

### 2.4.1 Transferencia de calor por conducción

Se considera a la conducción, como la transferencia de energía entre las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia debido a las interacciones entre las mismas.

Realizando un análisis molecular, vemos como las temperaturas más altas se asocian con las energías moleculares más altas y cuando las moléculas vecinas chocan, debe ocurrir una transferencia de energía de las moléculas más energéticas a las menos energéticas; entonces, la transferencia de energía por conducción debe ocurrir en la dirección de la temperatura decreciente.

Los fundamentos de la conducción de calor se establecieron hace más de un siglo y se atribuyen generalmente a Fourier. En muchos sistemas que involucran flujo, tal como flujo de calor, flujo de fluido o flujo de electricidad, se ha observado que la cantidad que fluye es directamente proporcional a la diferencia de potencial e inversamente proporcional a la resistencia que se aplica al sistema.

Analizando el flujo de calor a través de una pared, el flujo se lleva a efecto por la diferencia de temperatura entre las superficies calientes y frías. Cuando dos superficies de una pared están a diferente temperatura, necesariamente existe un flujo y una resistencia al flujo de calor. La conductancia es la recíproca de la resistencia al flujo de calor.

La conductancia, es una propiedad ponderable de toda la pared, pero para permitir un uso más amplio a la información experimental, se ha convenido reportar la conductancia únicamente cuando todas las dimensiones se refieren a valores unitarios. Cuando la conductancia se reporta para una cantidad de material de un pie de grueso con un área de flujo de un pie<sup>2</sup>, la unidad de tiempo 1 h y la diferencia de temperatura 1°F, se llama conductividad térmica  $k$ . Las correlaciones entre la conductividad térmica y la conductancia de una pared de grueso  $L$  y área  $A$ , están entonces dadas por:

$$\text{Conductancia} = K \frac{A}{L}$$

$$Q = K \frac{A}{L} \Delta T$$

**Ecuación 2.4 Conductancia en función del área y longitud<sup>18</sup>**

Donde K tiene las dimensiones (W/m<sup>2</sup>K)

La conductividad térmica de los sólidos es mayor que la de los líquidos, la que a su vez es mayor que la de los gases. Es más fácil transmitir calor a través de un sólido que a través de un líquido y más fácil por un líquido que por un gas. Algunos sólidos, tales como los metales, tienen altas conductividades térmicas y se llaman *conductores*. Otros tienen bajas conductividades y son malos conductores del *calor*, estos son *aislantes*.

Las conductividades de los sólidos pueden, ya sea aumentar o disminuir con la temperatura, y en algunos casos pueden hasta invertir su velocidad de cambio de una disminución a un incremento. Para la mayoría de los problemas prácticos no hay necesidad de introducir un factor de corrección para las variaciones de la conductividad térmica con la temperatura. Sin embargo, la variación puede usualmente expresarse por la ecuación lineal siguiente:

$$k = k_0 + \gamma t$$

**Ecuación 2.5 Factor de corrección para las variaciones de la conductividad térmica con la temperatura<sup>19</sup>**

---

<sup>18</sup> INCROPERA, Frank y DE WITT, David, Fundamentos de transferencia de calor, Pearson, México, 1999.

<sup>19</sup> INCROPERA, Frank y DE WITT, David, Fundamentos de transferencia de calor, Pearson, México, 1999.

Donde:

$K$  = conductividad térmica a  $^{\circ}K$

$\gamma$  = es una constante que denota el cambio en la conductividad por grado de cambio en la temperatura.

### Conductividad térmica por mediciones de conductividad eléctrica

La relación entre las conductividades térmicas y eléctricas de los metales demuestra una aplicación de la derivación de Fourier y es un método muy útil para determinar las conductividades térmicas de los metales. Una barra de metal aislada, como se muestra en la Fig. 2.9, tiene sus extremos transversales expuestos a baños diferentes de temperatura constante  $t_1$ , y  $t_2$ . Sujutando terminales eléctricas a las caras izquierda y derecha, respectivamente, se puede pasar una corriente de  $Z$  amperes en la dirección indicada, generando calor a través de la longitud de la barra. Las cantidades de calor que salen de ambos lados de la barra en el proceso estable, deben ser iguales a la cantidad de calor recibida como energía eléctrica.

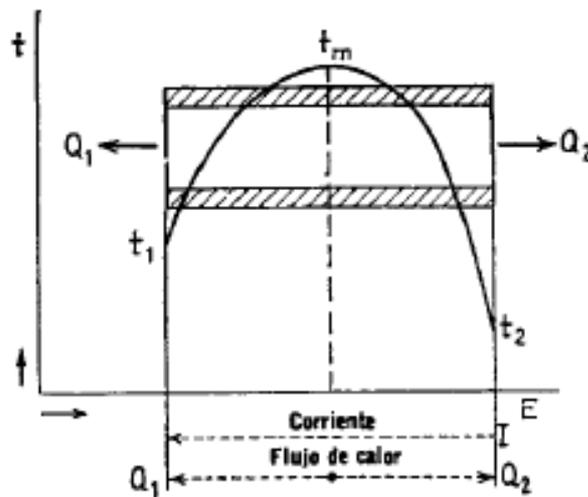


Figura 2.9 Transferencia de calor en un proceso estable<sup>20</sup>

<sup>20</sup> KERN, Donald, Procesos de transferencia de calor, Continental, México, 1999.

## Flujo de calor a través de una pared compuesta

Cuando la pared consiste de varios materiales colocados juntos en serie, tales como en la construcción de un horno o cámara de combustión. Usualmente se emplean varios tipos de ladrillo refractario, puesto que aquéllos que son capaces de resistir las altas temperaturas interiores son más frágiles y caros que los que se requieren cerca de la superficie externa, donde las temperaturas son considerablemente menores. Refiriéndonos a la Fig. 2.10, se colocan tres diferentes materiales refractarios en serie, indicados por los suscritos a, b, c. Para la pared total.

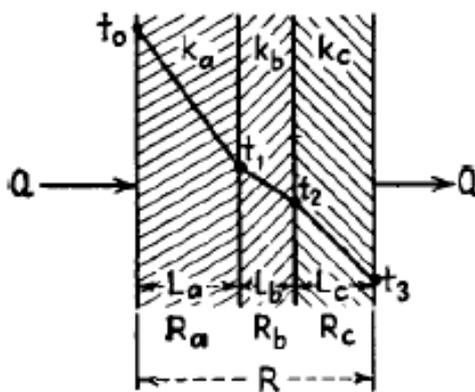


Figura 2.10 Flujo de calor a través de una pared compuesta<sup>21</sup>

El flujo de calor en Btu/h a través del material a debe vencer la resistencia  $R$ , pero al pasar a través del material a el calor también pasa a través de los materiales  $b$  y  $c$  en serie. El calor entrando en la cara izquierda debe ser igual al calor que sale en la cara derecha, puesto que el estado estable sanciona el almacenamiento de calor.

Si  $R_a$ ,  $R_b$  y  $R_c$  son diferentes, como resultado de diferente conductividad y grosor, la razón de la diferencia de temperatura a través de cada capa a su

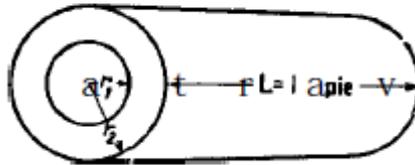
<sup>21</sup> KERN, Donald, Procesos de transferencia de calor, Continental, México, 1999.

resistencia, deberá ser la misma que la razón de la diferencia total de temperatura a la resistencia total.

$$Q = \frac{\Delta t}{R} = \frac{t_o - t_3}{\frac{L_a}{K_a A} + \frac{L_b}{K_b A} + \frac{L_c}{K_c A}}$$

**Ecuación 2.6 Razón de la diferencia de temperatura a través de cada capa a su resistencia<sup>22</sup>**

### Flujo de calor a través de la pared de un tubo



**Figura 2.11 Flujo de calor a través de un tubo<sup>23</sup>**

Refiriéndonos a la Fig. 2.11 que muestra un tubo de unidad de longitud, el área de la trayectoria del flujo de calor a través de la pared del tubo aumenta con la distancia de la trayectoria desde  $r_1$  a  $r_2$ . El área a cualquier radio  $r$  es dada por  $2\pi r L$ , y si el calor fluye hacia afuera del cilindro el gradiente de temperatura para el incremento de longitud  $dr$  es  $dt/dr$ . La ecuación se transforma en:

<sup>22</sup> KERN, Donald, Procesos de transferencia de calor, Continental, México, 1999.

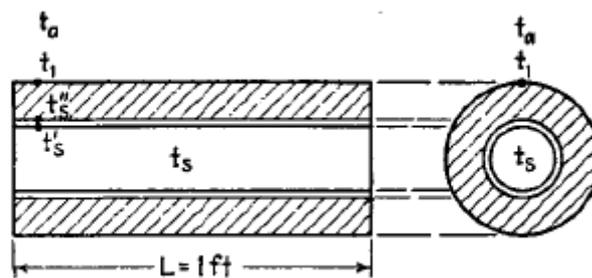
<sup>23</sup> INCROPERA, Frank y DE WITT, David, Fundamentos de transferencia de calor, Pearson, México, 1999.

$$q = 2\pi rk\left(-\frac{dt}{dr}\right)$$

$$q = \frac{2\pi k(ti - to)}{2.3 \log \frac{ro}{ri}}$$

**Ecuación 2.7 Cálculo del calor generado a través de la pared del tubo**

### **Pérdida de calor de una tubería**



**Figura 2.12 Pérdida de calor en un tubo aislado<sup>24</sup>**

En los ejemplos precedentes se supuso que la superficie externa fría podía mantenerse a una temperatura definida. Sin esta suposición, los ejemplos serían indeterminados, puesto que tanto  $Q$  y  $At$  serían desconocidas e independientes en una sola ecuación. En realidad, las temperaturas asignadas a la pared exterior dependen no solamente de las resistencias entre las superficies calientes y frías, sino también en la habilidad de la atmósfera más fría que lo rodea para remover el calor que llega a la superficie externa. Si analizamos un tubo cubierto con un aislante de lana mineral y que lleva vapor a la temperatura  $t$ , considerablemente arriba de la temperatura atmosférica. La

<sup>24</sup> INCROPERA, Frank y DE WITT, David, Fundamentos de transferencia de calor, Pearson, México, 1999.

diferencia total de temperatura que origina el flujo de calor hacia afuera del tubo es  $t_s - t_a$ . Las resistencias al flujo de calor tomadas en orden son (1) la resistencia del vapor al condensarse y dar su calor a la superficie interna del tubo, resistencia que experimentalmente se ha encontrado muy pequeña, de manera que  $t_r$  y  $t''_r$  son casi las mismas; (2) la resistencia del tubo metálico, que es muy pequeña, excepto para tuberías gruesas, de manera que  $t'_s$  y  $t''_s$  son casi las mismas; (3) la resistencia del aislante de lana mineral, y (4) la resistencia del aire que lo rodea para eliminar el calor de la superficie externa. Esta última es apreciable, aún cuando la remoción de calor se efectúa por convección natural del aire ambiente en adición a la radiación; y tiene como origen la diferencia de temperatura entre la superficie exterior y el aire frío. La convección natural resulta del entibamiento del aire adyacente a la tubería, por lo tanto, reduce su densidad. El aire tibio sube y continuamente se reemplaza por aire frío. Los efectos combinados de la convección natural y la radiación no pueden ser representados por el término convencional de resistencia  $R = L/KA$ , puesto que  $L$ , es indefinida y la conductancia del aire se suplementa simultáneamente por la transferencia de calor por radiación. Experimentalmente, se puede crear una diferencia de temperatura entre una superficie exterior conocida y el aire, y el calor que pasa de la superficie exterior al aire puede determinarse de mediciones hechas en el flujo que fluye por la tubería. Teniendo  $Q$ ,  $A$ , y  $A_t$ , se obtiene la resistencia combinada de ambos efectos como el cociente  $A_t/Q$ .

El flujo de calor de una tubería al aire ambiente usualmente es una pérdida y por lo tanto, es deseable reportar el dato como *unidad de conductancia*  $k/L$  Btu/(h)(pie<sup>2</sup> de superficie externa) (°F de diferencia de temperatura). La conductancia unitaria es el recíproco de la *resistencia unitaria*  $L/k$ , en lugar del recíproco de la resistencia para la superficie total  $L/kA$ . En otras palabras, es la conductancia por pie cuadrado de superficie de flujo de calor en lugar de la conductancia de la superficie total. La resistencia unitaria tiene las dimensiones de (h) (pie<sup>2</sup>) (°F/Btu). El recíproco de la resistencia unitaria,  $h$ , tiene las dimensiones de Btu/(h)(pie<sup>2</sup>°F) y muchas veces se designa como *coeficiente superficial* de transferencia de calor.

## 2.4.2 Transferencia de calor por convección

La convección es la transferencia de energía entre una superficie y un fluido que se mueve sobre ésta. La convección se produce únicamente por medio de materiales fluidos. Éstos, al calentarse, aumentan de volumen y, por lo tanto, su densidad y ascienden desplazando el fluido que se encuentra en la parte superior y que está a menor temperatura.

La transferencia de calor implica el transporte de calor en un volumen y la mezcla de elementos macroscópicos de porciones calientes y frías de un gas o un líquido. Se incluye también el intercambio de energía entre una superficie sólida y un fluido o por medio de una bomba, un ventilador u otro dispositivo mecánico (convección mecánica o asistida).

En la transferencia de calor libre o natural en la cual un fluido es más caliente o más frío y en contacto con una superficie sólida, causa una circulación debido a las diferencias de densidades que resultan del gradiente de temperaturas en el fluido. La transferencia de calor por convección se expresa con la Ley del Enfriamiento de Newton:

$$\frac{dQ}{dt} = hA_s(T_s - T_i)$$

**Ecuación 2.8 Ley de enfriamiento de Newton<sup>25</sup>**

Donde:

$h$  es el coeficiente de convección (ó *coeficiente de película*),

$A_s$  es el área del cuerpo en contacto con el fluido,  $T_s$  es la temperatura en la superficie del cuerpo

$T_i$  es la temperatura del fluido lejos del cuerpo.

---

<sup>25</sup> KERN, Donald, Procesos de transferencia de calor, Continental, México, 1999.

## Flujo laminar y turbulento

Cuando un líquido fluye en un tubo horizontal, su flujo puede tener un movimiento en forma de torbellino no localizado conocido como flujo turbulento, distancia de su centro.

Si la velocidad del líquido disminuye bajo cierto valor determinado, la naturaleza del flujo cambia y desaparece la turbulencia. Las partículas del fluido fluyen en líneas paralelas a lo largo del eje del tubo, esto se conoce como flujo laminar. Experimentos realizados para conocer más sobre este tipo de comportamientos de la capa límite han indicado que el flujo laminar procede como el deslizamiento de delgados cilindros concéntricos de líquido, uno dentro del otro, también se muestra que la distribución de las velocidades de los cilindros es parabólica con el máximo al centro aproximándose a cero en la pared del tubo.

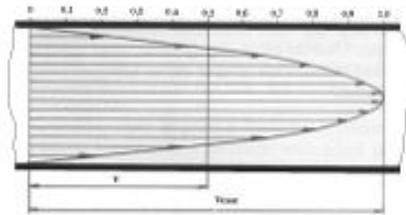


Figura 2.13 Flujo laminar



Figura 2.14 Flujo turbulento<sup>26</sup>

Reynolds<sup>27</sup> observó que el tipo de flujo adquirido por un líquido que fluya dentro de un tubo, era influido por la velocidad, densidad y viscosidad del líquido, además del diámetro del tubo<sup>27</sup>.

Cuando estas variables se relacionan como el cociente  $Du\rho/\mu$ , llamado el número de Reynolds, se encuentra que siempre existe flujo turbulento cuando el valor numérico de  $Du\rho/\mu$  excede las cercanías de 2 300 y usualmente cuando excede 2 100.

<sup>26</sup> [www.manualvuelo.com/GIFS/Fig\\_181.gif](http://www.manualvuelo.com/GIFS/Fig_181.gif)

<sup>27</sup> REYNOLDS, Osborne, Osborne Reynolds and engineering science today, Manchester University, London, 1901.

Por definición, la transferencia de calor por convección procede principalmente a resultas de mezcla y mientras que este requerimiento parece ser satisfecho por el flujo turbulento, no lo es por el flujo laminar.

La velocidad a la que el calor es transferido hacia o de un líquido a un tubo, es considerablemente menor en el flujo laminar que en el turbulento, y en la práctica industrial es casi siempre deseable evitar condiciones tales como la baja velocidad de un líquido que origina flujo laminar.

### **Análisis dimensional**

Es la manera de correlacionar cierto número de variables en una sola ecuación, ciertas ecuaciones que describen fenómenos físicos pueden obtenerse racionalmente de leyes básicas derivadas de experimentos. Un ejemplo de esto es el tiempo de vibración de un péndulo a partir de la segunda ley de Newton y la constante gravitacional.

Bridgman ha presentado y con mucho, la prueba más extensa de los principios matemáticos en los que se basa el análisis dimensional. Debido a que éste opera únicamente con las dimensiones de las variables, no se pueden producir resultados numéricos directos a partir de las variables, sino que se producen módulos por medio de los cuales los datos observados pueden combinarse y establecerse así la influencia relativa de las variables.

Las dimensiones fundamentales son cantidades tales como longitud, tiempo y temperatura, que son directamente medibles.

**Análisis de la forma de la ecuación de flujo de fluidos.-** Cuando un fluido incompresible fluye en un tubo horizontal uniforme, con un gasto de masa uniforme, la presión del fluido disminuye a lo largo de la tubería debido a la fricción. Esto comúnmente se llama la caída de presión del sistema  $\Delta P$ . La caída de presión por unidad de longitud se expresa como el gradiente de presión  $dP/dL$ , el cual se ha encontrado experimentalmente que está influido por las siguientes propiedades del tubo y del fluido: diámetro, velocidad, densidad del fluido, viscosidad.

La presión tiene las dimensiones de fuerza/área, mientras que la densidad se expresa por masa/volumen, de manera que la constante dimensional que relacione a  $M$  y  $F$  debe ser incluida. El mismo resultado puede alcanzarse incluyendo la constante de aceleración  $g$  junto con las variables anteriores. Mientras la viscosidad se determina experimentalmente como un efecto de fuerza, es una unidad muy pequeña y es más común en las ciencias de ingeniería usar la viscosidad absoluta, en la cual la conversión de fuerza a masa ha sido llevada a cabo.

Un término conveniente de uso casi universal en ingeniería es la masa velocidad  $G$ , que es idéntica con  $u\rho$  y corresponde al peso del flujo por pie cuadrado del área de flujo. Para obtener la caída de presión utilizaremos la siguiente fórmula:

$$\Delta P = \frac{\alpha G^2 L}{D \rho g} \left( \frac{DG}{\mu} \right)^{-d}$$

Ecuación 2.9 Caída de presión en los fluidos<sup>28</sup>

**Análisis de la forma de la ecuación de convección forzada.**- La razón de transferencia de calor por convección forzada a un fluido incompresible que viaja en flujo turbulento por una tubería de diámetro uniforme a flujo de masa constante, se ha encontrado que es influida por la velocidad  $u$ , densidad  $\rho$ , calor específico  $c$ , conductividad térmica  $k$ , viscosidad  $\mu$ , así como por el diámetro interno de la tubería  $D$ . La velocidad, viscosidad, densidad y diámetro, afectan el grueso de la película del fluido en la pared del tubo a través de la cual el calor debe ser conducido primero, también tienen influencia sobre el grado de mezcla del fluido.  $k$  es la conductividad térmica del fluido, y el calor específico refleja la variación del promedio de la temperatura del fluido como resultado de la absorción uniforme de calor.

---

<sup>28</sup> KERN, Donald, Procesos de transferencia de calor, Continental, México, 1999.

$$\frac{h_i D}{k} = \alpha \left( \frac{DG}{\mu} \right)^G \left( \frac{c\mu}{k} \right)^{1-f}$$

**Ecuación 2.10 Coeficiente de transferencia de calor interno para flujo turbulento<sup>29</sup>**

**Desarrollo de una ecuación para el flujo laminar.-** Puesto que el flujo laminar es un fenómeno de conducción, está sujeto al análisis matemático racional. En la suposición de que la distribución de velocidades en cualquier sección es parabólica, que la superficie interna del tubo es uniforme, y que la velocidad en la pared del tubo es cero, Graetz obtuvo para la conducción radial de un fluido que se mueve en un tubo en forma similar a bastones:

$$\frac{t_2 - t_1}{t_p - t_1} = 1 - 8\phi \frac{wc}{kL}$$

**Ecuación 2.11 Ecuación de Graetz para flujo laminar**

Donde  $t_1$  y  $t_2$  son las temperaturas de entrada y salida del fluido,  $t_p$  es la temperatura uniforme en la superficie interna del tubo,  $t_p - t_1$  la diferencia de temperatura en la entrada, y  $\phi$  ( $wc/kL$ ) es el valor numérico de una serie infinita que tiene exponentes que son múltiplos de  $wc/kL$ . La Ecuación puede establecerse mediante el análisis dimensional con una expresión empírica que debe evaluarse de experimentos. Si  $t_2 - t_1$ , la elevación en la temperatura del fluido que fluye en el tubo, se considera que es influida por la conducción radial, por la longitud de la trayectoria  $L$ , la razón de flujo  $w$ , el calor específico  $c$ , la conductividad térmica  $k$  y la diferencia de temperatura entre la superficie interna del tubo y la temperatura del fluido de manera que:

$$\frac{h_i D}{k} = \alpha \left[ \left( \frac{DG}{\mu} \right) \left( \frac{c\mu}{k} \right) \left( \frac{D}{L} \right) \right]^{d+1} = \alpha \left( \frac{wc}{kL} \right)^{d+1}$$

**Ecuación 2.12 Coeficiente de transferencia de calor interno para flujo laminar<sup>30</sup>**

---

<sup>29</sup> KERN, Donald, Procesos de transferencia de calor, Continental, México, 1999.

**Aplicación de la transferencia de calor en la Industria.-** El problema .que se encuentra en la industria, comparado con el experimento, no es determinar  $h_i$  sino aplicar valores experimentales de  $h_i$  para obtener  $A_i$ , la superficie de transferencia de calor.

El diagrama de flujo ordinariamente contiene balances de calor y de material acerca de los varios items de equipo que componen el proceso.

De estos balances se obtienen las condiciones que debe llenar cada parte si el proceso debe operar como una unidad. Así, entre dos puntos en el proceso, puede requerirse aumentar la temperatura de cierto flujo de líquido dado desde  $t_1$ , a  $t_2$ , mientras que otro fluido se enfría de  $T_2$ , a  $T_1$ . La pregunta en los problemas industriales es determinar cuanta superficie de transferencia de calor se requiere para llevar a efecto estas condiciones de proceso. La pista podría hacerse presente en la Ec. 2.12, excepto que no únicamente  $A_i$  sino también  $h_i$  son desconocidas, a menos de que se hayan establecido por experimentos anteriores para idénticas condiciones. Para preparar la solución de problemas industriales, no es práctico correr experimentos con todos los líquidos y bajo una variedad infinita de condiciones experimentales, para tener los valores numéricos de  $h_i$  disponibles. Por ejemplo,  $h_i$  diferirá para un mismo peso de líquido que absorba idénticas cantidades de calor cuando los valores numéricos de  $t_1$ , y  $t_2$ , difieran, puesto que las propiedades del líquido están relacionadas a esas temperaturas. Otros factores que afectan a  $h_i$ , son aquellos encontrados en el análisis dimensional, tales como la velocidad del líquido y el diámetro del tubo a través del que ocurre la transferencia de calor. Es aquí, donde la importancia de las ecuaciones obtenidas mediante el análisis dimensional se hace evidente. Si los valores de los exponentes y coeficientes de las ecuaciones adimensionales para condiciones extremas de operación son establecidos mediante experimentos, el valor de  $h_i$  puede ser calculado para cualquier combinación intermedia de velocidad, tubería y propiedades del líquido, a partir de la ecuación dada.

---

<sup>30</sup> KERN, Donald, Procesos de transferencia de calor, Continental, México, 1999.

Si los valores de los exponentes y coeficientes de las ecuaciones adimensionales para condiciones extremas de operación son establecidos mediante experimentos, el valor de  $hi$  puede ser calculado para cualquier combinación intermedia de velocidad, tubería y propiedades del líquido, a partir de la ecuación dada.

### **2.4.3 Transferencia de calor por radiación**

La radiación presenta una diferencia fundamental respecto a la conducción y la convección: las sustancias que intercambian calor no tienen que estar en contacto, sino que pueden estar separadas por un vacío. La radiación es un término que se aplica genéricamente a toda clase de fenómenos relacionados con ondas electromagnéticas. Algunos fenómenos de la radiación pueden describirse mediante la teoría de ondas, pero la única explicación general satisfactoria de la radiación electromagnética es la teoría cuántica. En 1905, Albert Einstein sugirió que la radiación presenta a veces un comportamiento cuantizado: en el efecto fotoeléctrico, la radiación se comporta como minúsculos proyectiles llamados fotones y no como ondas. La naturaleza cuántica de la energía radiante se había postulado antes de la aparición del artículo de Einstein, y en 1900 el físico alemán Max Planck empleó la teoría cuántica y el formalismo matemático de la mecánica estadística para derivar una ley fundamental de la radiación. La expresión matemática de esta ley, llamada distribución de Planck, relaciona la intensidad de la energía radiante que emite un cuerpo en una longitud de onda determinada con la temperatura del cuerpo. Para cada temperatura y cada longitud de onda existe un máximo de energía radiante. Sólo un cuerpo ideal (cuerpo negro) emite radiación ajustándose exactamente a la ley de Planck. Los cuerpos reales emiten con una intensidad algo menor.

La contribución de todas las longitudes de onda a la energía radiante emitida se denomina poderemisor del cuerpo, y corresponde a la cantidad de energía emitida por unidad de superficie del cuerpo y por unidad de tiempo. Como puede demostrarse a partir de la ley de Planck, el poder emisor de una superficie es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. El

factor de proporcionalidad se denomina constante de Stefan-Boltzmann en honor a dos físicos austriacos, Joseph Stefan y Ludwig Boltzmann que, en 1879 y 1884 respectivamente, descubrieron esta proporcionalidad entre el poder emisor y la temperatura. Según la ley de Planck, todas las sustancias emiten energía radiante sólo por tener una temperatura superior al cero absoluto. Cuanto mayor es la temperatura, mayor es la cantidad de energía emitida. Además de emitir radiación, todas las sustancias son capaces de absorberla. Por eso, aunque un cubito de hielo emite energía radiante de forma continua, se funde si se ilumina con una lámpara incandescente porque absorbe una cantidad de calor mayor de la que emite.

Las superficies opacas pueden absorber o reflejar la radiación incidente. Generalmente, las superficies mates y rugosas absorben más calor que las superficies brillantes y pulidas, y las superficies brillantes reflejan más energía radiante que las superficies mates. Además, las sustancias que absorben mucha radiación también son buenos emisores; las que reflejan mucha radiación y absorben poco son malos emisores. Por eso, los utensilios de cocina suelen tener fondos mates para una buena absorción y paredes pulidas para una emisión mínima, con lo que maximizan la transferencia total de calor al contenido de la cazuela.

Algunas sustancias, entre ellas muchos gases y el vidrio, son capaces de transmitir grandes cantidades de radiación. Se observa experimentalmente que las propiedades de absorción, reflexión y transmisión de una sustancia dependen de la longitud de onda de la radiación incidente. El vidrio, por ejemplo, transmite grandes cantidades de radiación ultravioleta, de baja longitud de onda, pero es un mal transmisor de los rayos infrarrojos, de alta longitud de onda. Una consecuencia de la distribución de Planck es que la longitud de onda a la que un cuerpo emite la cantidad máxima de energía radiante disminuye con la temperatura. La ley de desplazamiento de Wien, llamada así en honor al físico alemán Wilhelm Wien, es una expresión matemática de esta observación, y afirma que la longitud de onda que corresponde a la máxima energía, multiplicada por la temperatura absoluta del cuerpo, es igual a una constante, 2.878 micrómetros-Kelvin. Este hecho, junto

con las propiedades de transmisión del vidrio antes mencionadas, explica el calentamiento de los invernaderos. La energía radiante del Sol, máxima en las longitudes de onda visibles, se transmite a través del vidrio y entra en el invernadero. En cambio, la energía emitida por los cuerpos del interior del invernadero, predominantemente de longitudes de onda mayores, correspondientes al infrarrojo, no se transmiten al exterior a través del vidrio. Así, aunque la temperatura del aire en el exterior del invernadero sea baja, la temperatura que hay dentro es mucho más alta porque se produce una considerable transferencia de calor neta hacia su interior.

Además de los procesos de transmisión de calor que aumentan o disminuyen las temperaturas de los cuerpos afectados, la transmisión de calor también puede producir cambios de fase, como la fusión del hielo o la ebullición del agua. En ingeniería, los procesos de transferencia de calor suelen diseñarse de forma que aprovechen estos fenómenos. Por ejemplo, las cápsulas espaciales que regresan a la atmósfera de la Tierra a velocidades muy altas están dotadas de un escudo térmico que se funde de forma controlada en un proceso llamado ablación para impedir un sobrecalentamiento del interior de la cápsula. La mayoría del calor producido por el rozamiento con la atmósfera se emplea en fundir el escudo térmico y no en aumentar la temperatura de la cápsula.

#### **2.4.4 Condensación de vapores simples**

Un fluido puede existir como gas, vapor o líquido, el cambio de líquido a vapor se lo llama vaporización, y el cambio de vapor a líquido es condensación. Las cantidades de calor involucradas en la condensación o vaporización de una libra de fluido son idénticas.

Para fluidos puros a una presión dada, el cambio de líquido a vapor o de vapor a líquido ocurre sólo a una temperatura, que es la temperatura de saturación o de equilibrio. Puesto que los cambios de transferencia de calor vapor-líquido usualmente ocurren a presión constante o casi constante en la industria, la vaporización o condensación de un compuesto simple normalmente se efectúa isotérmicamente.

Cuando un vapor se remueve después de su formación y no se le permiten contactos posteriores con el líquido, la adición de calor al vapor causa sobrecalentamiento, durante el cual se comporta como un gas. Si se condensa una mezcla de vapores en lugar de un vapor puro, a presión constante, en muchos casos los cambios no tienen lugar isotérmicamente. El tratamiento general de mezcla de vapores difiere en ciertos aspectos de aquéllos de los compuestos simples, estos se analizan con la ayuda de la regla de la fase de J. Willard Gibbs.

La condensación tiene lugar a muy diferentes velocidades de transferencia de calor por cualquiera de los dos siguientes y distintos mecanismos físicos que serán discutidos, en forma de gota y en forma de película. El coeficiente de película en la condensación está influido por la textura de la superficie en la cual tiene lugar la condensación y también si la superficie condensante está montada verticalmente u horizontalmente. A pesar de estas complicaciones aparentes, la condensación, igual que el flujo laminar, es susceptible de un estudio matemático directo.

**Condensación en forma de gota y de película.-** Cuando un vapor puro saturado entra en contacto con una superficie fría tal como un tubo, se condensa y puede formar gotitas en la superficie del tubo. Estas gotitas pueden no exhibir ninguna afinidad por la superficie y en lugar de cubrir el tubo se desprenden de él, dejando metal descubierto en el cual se puede formar sucesivas gotitas de condensado.

Cuando la condensación ocurre por este mecanismo se llama condensación en forma de gota. Sin embargo, usualmente puede aparecer una inconfundible película a medida que el vapor se condensa en el tubo cubriéndolo. Se requiere vapor adicional para condensarse en la película del condensado en lugar de hacerlo sobre la pared del tubo directamente. Esta es condensación en forma de película. Los dos mecanismos son distintos e independientes de la cantidad de vapor condensante por pie cuadrado de superficie. La condensación en forma de película no es una transición de la condensación en forma de gota

debido a la rapidez a la cual el condensado se forma sobre el tubo. Debido a la resistencia de la película de condensado al paso de calor a través de ella, los coeficientes de transferencia de calor para la condensación por gotas son de cuatro a ocho veces mayores que para la condensación de película. El vapor de agua es el único vapor puro conocido que se condensa en forma de gota, y se requieren condiciones especiales para que esto ocurra. Estas son descritas por Drew, Nagle y Smith, influyendo principalmente la presencia de polvo en la superficie o el uso de contaminantes que se adhieran a la misma.

Nagle ha identificado materiales que promueven la condensación en forma de gota en el vapor, aun cuando estas sustancias introducen impurezas en el vapor de agua. La condensación por gota también tiene lugar cuando varios materiales se condensan simultáneamente como en una mezcla, y donde la mezcla de condensado no es miscible, como en el caso de hidrocarburos y vapor de agua. Sin embargo, durante varios periodos en la operación normal de un condensador normal de vapor de agua, el mecanismo puede ser inicialmente del tipo de película, y cambiar luego a la condensación en forma de gota, y un tiempo más tarde invertir el mecanismo. Debido a la falta de control no es costumbre en los cálculos considerar la ventaja de los altos coeficientes que han sido obtenidos en experimentos con condensación por gotas.

Afortunadamente, el fenómeno de condensación en forma de película es susceptible de análisis matemático, y la naturaleza de la condensación en una superficie fría puede ser considerada como de autodifusión. La presión de saturación del vapor en el cuerpo del vapor es mayor que la presión de saturación del condensado frío en contacto con la pared fría. Esta diferencia de presiones provee el potencial necesario para mover al vapor del cuerpo de éste a mayor velocidad. Comparada con la pequeña resistencia a la transferencia de calor por difusión del vapor al condensado, la película del condensado, en la pared fría del tubo, constituye la resistencia controlante.

Es la lentitud con la que el calor de condensación pasa a través de esta película lo que determina el coeficiente de condensación. La expresión última

para una ecuación de los coeficientes de condensación se puede obtener del análisis dimensional donde el coeficiente promedio  $h$  es una función de las propiedades de la película de condensado,  $\mu$ ,  $\rho$ ,  $g$ ,  $\nu$ ,  $L$ ,  $\Delta T$ , y  $X$ , esta última propiedad es el calor latente de vaporización.

Nusselt derivó teóricamente las correlaciones del mecanismo de condensación en forma de película, y los resultados que obtuvo están en excelente concordancia con los experimentos.

Aplicaciones al proceso. En la industria química es práctica común separar una mezcla de líquido destilando los componentes de bajo punto de ebullición, separándolos así en estado puro de aquéllos que tienen alto punto de ebullición. En una solución de varios compuestos cada uno ejerce una presión parcial y el más volátil no puede eliminarse del resto por ebullición sin arrastrar algo de los compuestos de mayor peso molecular. La proporción de los compuestos más pesados que son arrastrados cuando la solución empieza a hervir es menor que la que existía en la solución original antes de que empezara la ebullición. Si el vapor que se desprende se condensa, éste tiene un punto de ebullición menor que la solución original, indicando un aumento en la proporción de los componentes más volátiles. Por ebulliciones sucesivas de una sola parte de la mezcla, condensando los vapores que se forman, e hirviendo de nuevo parte de los condensados, es posible obtener una cantidad casi pura de los compuestos más volátiles y se repite el procedimiento anterior suficientemente.

Esto es, la separación por destilación se efectúa por vaporizaciones parciales y condensación subsecuente.

En la destilación es costumbre obtener un número determinado de vaporizaciones parciales y condensaciones poniendo en contacto directo un vapor y un líquido enfriante en una columna de destilación continua. La columna de destilación de cachuchas de burbujeo, es representativa de la práctica moderna y deriva su nombre de una serie de cachuchas ranuradas invertidas que se colocan sobre los elevadores de vapor en cada plato de la columna. El vapor que entra por debajo de un plato a través de los elevadores se rompe en pequeñas burbujas a medida que pasa a través de las ranuras de

las cachuchas que están sumergidas en el líquido, cuyo nivel se mantiene mediante el vertedero de cada plato.

El ahnento, que usualmente es un líquido, es una mezcla de componentes más y menos volátiles, y se alimenta a la columna en el plato alimentador, donde los compuestos volátiles son parcialmente vaporizados por los vapores ascendentes a medida que el alimento se desplaza a través del plato. El remanente del líquido en el plato es menos volátil que el alimento y derrama al plato inferior a través del vertedero. Los puntos de ebullición de los líquidos en cada uno de los platos inferiores son, en consecuencia, mayores.

Para vaporizar una porción del alimento, el vapor del plato inferior debe intercambiar calor con el líquido en el plato alimentador, liberando los compuestos más volátiles hacia el plato superior del de alimentación. Suministrando calor al fondo de la columna donde el aumento de concentración de los compuestos menos volátiles representa las mayores temperaturas de ebullición en el sistema, se establece un gradiente de temperatura de plato a plato entre el fondo de la columna y la parte superior. El calor suministrado en el fondo mediante la vaporización se transmite a la parte superior de la columna plato a plato, debido a la diferencia de temperaturas correspondientes a las diferencias de puntos de ebullición entre los platos. La destilación continua requiere de la presencia de líquido en los platos durante todo el tiempo, de manera que los vapores de los componentes menos volátiles en el alimento, puedan condensarse y ser arrastrados hacia abajo. Para efectuar esto, algo del líquido volátil del condensador, que representa un plato sobre el último de los platos de la columna y que por lo tanto tiene menos temperatura, se regresa al plato final de la columna de la parte superior, fluyendo hacia abajo a través de la columna. El líquido volátil que se regresa a la columna del condensador es el reflujo. La cantidad de componentes volátiles removidos del sistema en la parte superior y que tienen la misma composición que el reflujo se llama destilado. Los compuestos más pesados removidos en el fondo de la columna se llaman desperdicios, colas o residuos, o si tienen algún valor se llaman productos de fondo.

La temperatura de condensación en el condensador es la que determina la presión de operación en la columna destiladora, ya que la temperatura de saturación del vapor varía con su presión. El destilado debe condensar en el condensador a una temperatura suficientemente alta, de manera que su calor latente pueda ser eliminado por el agua de enfriamiento. El tamaño del condensador depende de la diferencia entre la temperatura de condensación y el rango de temperatura del agua de enfriamiento. Si la temperatura de condensación está muy cercana al rango de temperatura del agua de enfriamiento a presión atmosférica, la presión de destilación debe elevarse para permitir obtener un  $A_t$  más alto. En la industria de la generación de energía el término condensador de superficie se reserva para equipo tubular que condensa vapor del escape de turbinas y máquinas. Puesto que una turbina se diseña primariamente para obtener trabajo mecánico del calor, la conversión máxima se obtiene en la turbina manteniendo una temperatura baja en la descarga. Si la turbina descargara a la atmósfera, la menor temperatura de vapor obtenible sería de 212OF, pero si el vapor descargara a un condensador al vacío, sería posible operar a temperatura de descarga de 75OF y menores, y convertir la diferencia de entalpías de 212 a 750F en trabajo útil

## **2.5 Normativas ambientales**

### **2.5.1 Gestión ambiental ecuatoriana**

La gestión ambiental se enmarca en las políticas generales de desarrollo sustentable para la conservación del patrimonio natural y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales que establezca el Presidente de la República al aprobar el Plan Ambiental Ecuatoriano.

Las políticas y el Plan mencionados formarán parte de los objetivos nacionales permanentes y las metas de desarrollo. El Plan Ambiental Ecuatoriano contendrá las estrategias, planes, programas y proyectos para la gestión ambiental nacional y será preparado por el Ministerio del ramo.

La autoridad ambiental nacional será ejercida por el Ministerio del ramo, que actuará como instancia rectora, coordinadora y reguladora del Sistema Nacional Descentralizado de Gestión Ambiental, sin perjuicio de las atribuciones que dentro del ámbito de sus competencias y conforme las leyes que las regulan, ejerzan otras instituciones del Estado.

El Ministerio del ramo, contará con los organismos técnico-administrativos de apoyo, asesoría y ejecución, necesarios para la aplicación de las políticas ambientales, dictadas por el Presidente de la República.

Dentro de las obligaciones que tiene el ministerio del ambiente concerniente al manejo de residuos enumeraremos las siguientes:

Art. 9 incisos:

- i) Constituir Consejos Asesores entre los organismos componentes del Sistema Descentralizado de Gestión Ambiental para el estudio y asesoramiento de los asuntos relacionados con la gestión ambiental, garantizando la participación de los entes seccionales y de la sociedad civil.
- j) Coordinar con los organismos competentes sistemas de control para la verificación del cumplimiento de las normas de calidad ambiental referentes al aire, agua, suelo, ruido, desechos y agentes contaminantes.
- k) Definir un sistema de control y seguimiento de las normas y parámetros establecidos y del régimen de permisos y licencias sobre actividades potencialmente contaminantes y la relacionada con el ordenamiento territorial.

Art. 39.- Las instituciones encargadas de la administración de los recursos naturales, control de la contaminación ambiental y protección del medio ambiental, establecerán con participación social, programas de monitoreo del estado ambiental en las áreas de su competencia, esos datos serán remitidos al Ministerio del ramo para su sistematización; tal información será pública.

Art. 40.- Toda persona natural o jurídica que, en el curso de sus actividades empresariales o industriales estableciere que las mismas pueden producir o están produciendo daños ambientales a los ecosistemas, está obligada a informar sobre ello al Ministerio del ramo o a las instituciones del régimen seccional autónomo. La información se presentará a la brevedad posible y las autoridades competentes deberán adoptar las medidas necesarias para solucionar los problemas detectados. En caso de incumplimiento de la presente disposición, el infractor será sancionado con una multa de veinte a doscientos salarios mínimos vitales generales.

### **2.5.2 Normas para las emisiones de aire desde fuentes fijas de combustión**

Cada vez que se llenaban los tanques de efluentes contaminados, AV.Corp enviaba los mismos a su incineración, respaldados por la normativa de aire que la citaremos a continuación

La norma técnica para las emisiones de aire es dictada bajo el amparo de la Ley de Gestión Ambiental y del Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental y se somete a las disposiciones de éstos, es de aplicación obligatoria y rige en todo el territorio nacional.

Esta norma técnica determina o establece:

- Los límites permisibles, disposiciones y prohibiciones para emisiones de contaminantes del aire hacia la atmósfera desde fuentes fijas de combustión.
- Los métodos y procedimientos destinados a la determinación de las cantidades emitidas de contaminantes del aire desde fuentes fijas de combustión.

El objetivo principal de la norma es el preservar o conservar la salud de las personas, la calidad del aire ambiente, el bienestar de los ecosistemas y del

ambiente en general. Para cumplir con este objetivo, esta norma establece los límites permisibles de emisiones al aire desde diferentes actividades. La norma provee los métodos y procedimientos destinados a la determinación de las emisiones al aire que se verifiquen desde procesos de combustión en fuentes fijas. Se provee también de herramientas de gestión destinadas a promover el cumplimiento con los valores de calidad de aire ambiente establecidos en la normativa pertinente.

**Valores máximos permisibles de emisión.-** Los valores de emisión máxima permitida, para fuentes fijas de combustión existentes, son los establecidos en la Tabla 2.7 de esta norma.

CONTAMINANTE EMITIDO	COMBUSTIBLE UTILIZADO	VALOR	UNIDADES <sup>[1]</sup>
Partículas Totales	Sólido	355	mg/Nm <sup>3</sup>
	Líquido <sup>[2]</sup>	355	mg/Nm <sup>3</sup>
	Gaseoso	No Aplicable	No Aplicable
Óxidos de Nitrógeno	Sólido	1 100	mg/Nm <sup>3</sup>
	Líquido <sup>[2]</sup>	700	mg/Nm <sup>3</sup>
	Gaseoso	500	mg/Nm <sup>3</sup>
Dióxido de Azufre	Sólido	1 650	mg/Nm <sup>3</sup>
	Líquido <sup>[2]</sup>	1 650	mg/Nm <sup>3</sup>
	Gaseoso	No Aplicable	No Aplicable

Notas:

<sup>[1]</sup> mg/Nm<sup>3</sup>: miligramos por metro cúbico de gas, a condiciones normales, mil trece milibares de presión (1 013 mbar) y temperatura de 0 °C, en base seca y corregidos a 7% de oxígeno.

<sup>[2]</sup> combustibles líquidos comprenden los combustibles fósiles líquidos, tales como diesel, kerosene, búnker C, petróleo crudo, naftas.

**Tabla 2.7 Límites máximos permisibles de emisiones al aire para fuentes fijas de combustión<sup>31</sup>**

Los valores de emisión máxima permitida, para fuentes fijas de combustión nuevas, son los establecidos en la Tabla 2.8 de esta norma.

---

<sup>31</sup> Ministerio del Ambiente, normas para la emisión de gases contaminantes

CONTAMINANTE EMITIDO	COMBUSTIBLE UTILIZADO	VALOR	UNIDADES <sup>[1]</sup>
Partículas Totales	Sólido	150	mg/Nm <sup>3</sup>
	Líquido <sup>[2]</sup>	150	mg/Nm <sup>3</sup>
	Gaseoso	No Aplicable	No Aplicable
Óxidos de Nitrógeno	Sólido	850	mg/Nm <sup>3</sup>
	Líquido <sup>[2]</sup>	550	mg/Nm <sup>3</sup>
	Gaseoso	400	mg/Nm <sup>3</sup>
Dióxido de Azufre	Sólido	1 650	mg/Nm <sup>3</sup>
	Líquido <sup>[2]</sup>	1 650	mg/Nm <sup>3</sup>
	Gaseoso	No Aplicable	No Aplicable

Notas:

<sup>[1]</sup> mg/Nm<sup>3</sup>: miligramos por metro cúbico de gas, a condiciones normales, de mil trece milibares de presión (1 013 mbar) y temperatura de 0 °C, en base seca y corregidos a 7% de oxígeno.

<sup>[2]</sup> combustibles líquidos comprenden los combustibles fósiles líquidos, tales como diesel, kerosene, búnker C, petróleo crudo, naftas.

**Tabla 2.8 Límites máximos permisibles de emisiones al aire para fuentes fijas de combustión**

La Entidad Ambiental de Control utilizará los límites máximos permisibles de emisiones indicados en las Tablas 1 y 2 para fines de elaborar su respectiva norma (ver Reglamento a la Ley de Prevención y Control de Contaminación).

La Entidad Ambiental de Control podrá establecer normas de emisión de mayor exigencia, esto si los resultados de las evaluaciones de calidad de aire que efectúe indicaren dicha necesidad.

El Ministerio del Ambiente definirá la frecuencia de revisión de los valores establecidos como límite máximo permitido de emisiones al aire. De acuerdo a lo establecido en el reglamento para la prevención y control de la contaminación, se analizará la conveniencia de unificar los valores de emisión para fuentes en operación antes de Enero de 2003 y posteriores a esta fecha. La revisión deberá considerar, además, las bases de datos de emisiones, así como de los datos de concentraciones de contaminantes en el aire ambiente, efectúe la Entidad Ambiental de Control.

### 2.5.2.1 Disposiciones generales

Se prohíbe expresamente la dilución de las emisiones al aire desde una fuente fija con el fin de alcanzar cumplimiento con la normativa aquí descrita.

Se prohíbe el uso de aceites lubricantes usados como combustible en calderas, hornos u otros equipos de combustión, con excepción de que la fuente fija de combustión demuestre, mediante el respectivo estudio técnico, que cuenta con equipos y procesos de control de emisiones producidas por esta combustión, a fin de no comprometer la calidad del aire al exterior de la fuente, e independientemente de si la fuente fija es significativa o no significativa. Los planos y especificaciones técnicas de la instalación, incluyendo las previsiones de uso de aceites lubricantes usados, sea como combustible principal o como combustible auxiliar, o como combinación de ambos, se sujetarán a las disposiciones de la normativa aplicable para el manejo de desechos peligrosos y de su disposición final. La Entidad Ambiental de Control emitirá el respectivo permiso de operación para las fuentes que utilicen aceites lubricantes usados como combustible, permiso que será renovado cada dos años, previo el respectivo dictamen favorable, considerando los requerimientos estipulados tanto aquí como en la normativa aplicable a desechos peligrosos y su disposición final.

Aquellas fuentes fijas que utilicen como combustible otros que no sean combustibles fósiles, serán evaluadas, en primer lugar, en base al criterio de determinar si se trata de fuentes significativas o no. Para una fuente significativa, que utilice combustibles no fósiles, tales como biomasa, se aplicarán los valores máximos de emisión descritos en este reglamento en lo referente a fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos. Para fuentes no significativas, la Entidad Ambiental de Control podrá solicitar evaluaciones adicionales tendientes a prevenir el deterioro de la calidad del aire.

Toda fuente fija, sea significativa o no, deberá comunicar a la Entidad Ambiental de Control cualquier situación anómala, no típica, que se presente en la operación normal de la fuente, y en la que se verificaron emisiones de contaminantes superiores a los valores máximos establecidos en este reglamento. Este requisito no se aplica para el caso del período de arranque de operación de la fuente, o para el caso del período de limpieza por soplado de hollín acumulado en la fuente, siempre que estos períodos no excedan quince (15) minutos y la operación no se repita más de dos veces al día. Cuando por

las características de los procesos y/o de los equipos de combustión se justifique técnicamente que se requiere mayor tiempo para su arranque o limpieza con soplado de hollín, se deberá obtener la aprobación de la Entidad Ambiental de Control.

Para las fuentes fijas significativas, se requerirá que estas cuenten, por lo menos, con equipos básicos de control de emisiones de partículas, esto a fin de mitigar aquellas emisiones que se registren durante períodos de arranque o de soplado de hollín en la fuente. Los equipos básicos de control comprenden equipos tales como separadores inerciales (ciclones). Además, la Entidad Ambiental de Control podrá requerir, por parte del regulado, la instalación de equipos de control de emisiones de partículas adicionales a los equipos básicos descritos, siempre que la evaluación técnica y económica del equipo de control a ser instalado así lo determine.

Toda fuente fija significativa está obligada a presentar a la Entidad Ambiental de Control los resultados que se obtengan de los programas de medición de emisiones que deban ejecutarse. La Entidad Ambiental de Control establecerá una base de datos con las emisiones de todas las fuentes bajo su control, así como establecerá los procedimientos de mantenimiento y de control de calidad de la misma.

## 2.5.2.2 Esquema de los incineradores permitidos

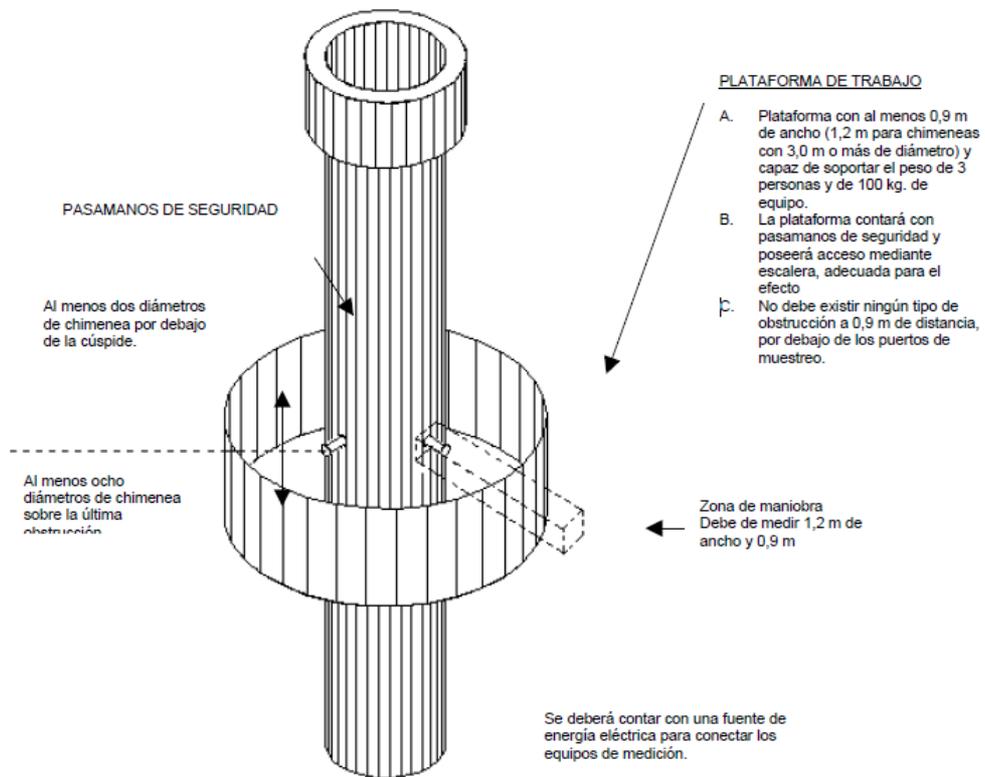


Figura 2.15 Requisitos para ejecución de equipos permitidos para las emisiones al aire desde fuentes fijas<sup>32</sup>

<sup>32</sup> Norma Ecuatoriana para las emisiones al aire desde fuentes fijas de combustión

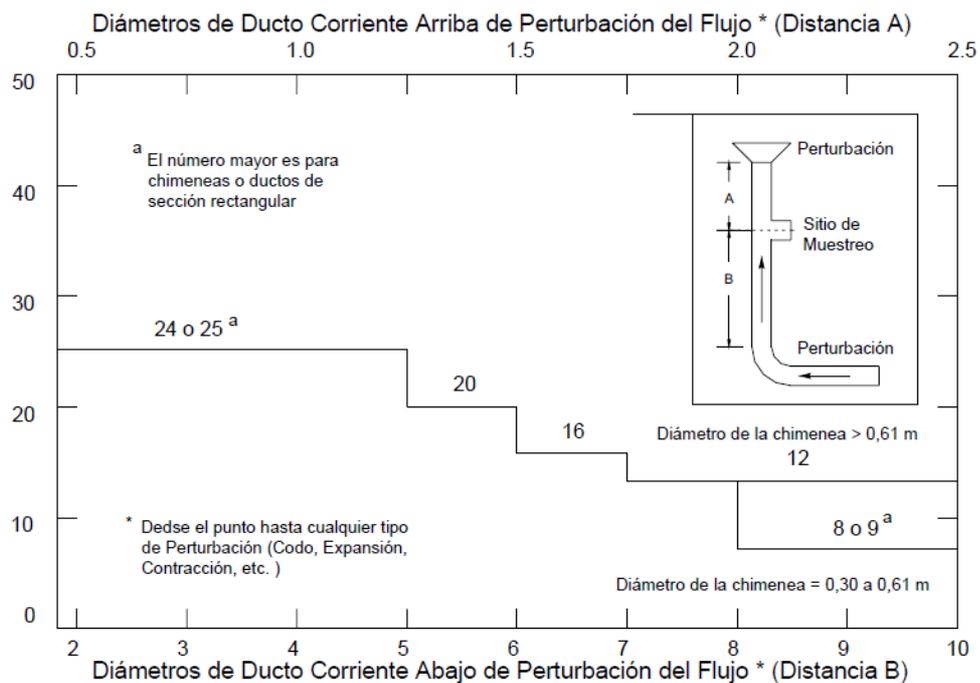


Figura 2.16 Número de puntos de medición de emisiones al aire desde fuentes fijas<sup>33</sup>

### 2.5.3 Sistema de manejo ambiental

Este sistema establece y define el conjunto de elementos mínimos que constituyen un sub-sistema de evaluación de impactos ambientales a ser aplicados en las instituciones integrantes del Sistema Nacional Descentralizado de Gestión Ambiental.

Mencionando el ART. 2, vemos que los principios del Sistema Único de Manejo Ambiental son el mejoramiento, la transparencia, la agilidad, la eficacia y la eficiencia así como la coordinación interinstitucional de las decisiones relativas a actividades o proyectos propuestos con potencial impacto y/o riesgo ambiental, para impulsar el desarrollo sustentable del país mediante la

<sup>33</sup> Norma Ecuatoriana para las emisiones al aire desde fuentes fijas de combustión

inclusión explícita de consideraciones ambientales y de la participación ciudadana.

Toda obra, instalación, construcción, inversión o cualquier otra intervención que pueda suponer ocasione impacto ambiental durante su ejecución o puesta en vigencia, o durante su operación o aplicación, mantenimiento o modificación, y abandono o retiro y que por lo tanto requiere la correspondiente licencia ambiental conforme el artículo 20 de la Ley de Gestión Ambiental y las disposiciones del presente reglamento.

#### **2.5.3.1 Acreditación ante el sistema único de manejo ambiental**

Para los efectos de la determinación de la competencia ambiental dentro del SNDGA, se entenderá que la tienen aquellas instituciones, nacionales, sectoriales o seccionales, que, según sus correspondientes leyes y reglamentos, tienen potestad para la realización de actividades, de cualquier naturaleza relacionadas con la prevención y control de la contaminación ambiental y uso, manejo y administración de los recursos naturales renovables y no renovables; y en general con el desarrollo sustentable.

Las autoridades ambientales de aplicación que cuentan con los elementos y cumplen con los requisitos mínimos de un sub-sistema de evaluación de impactos ambientales establecidos en este Título, podrán solicitar la correspondiente acreditación ante el SUMA a la autoridad ambiental nacional.

#### **2.5.4 Gestión de desechos peligrosos**

Citando lo contenido en el ART. 160, todo generador de desechos peligrosos es el titular y responsable del manejo de los mismos hasta su disposición final, siendo su responsabilidad:

- Tomar medidas con el fin de minimizar al máximo la generación de desechos peligrosos.

- Almacenar los desechos en condiciones ambientalmente seguras, evitando su contacto con el agua y la mezcla entre aquellos que sean incompatibles.
- Disponer de instalaciones adecuadas para realizar el almacenamiento temporal de los desechos, con accesibilidad a los vehículos recolectores.
- Realizar la entrega de los desechos para su adecuado manejo, únicamente a las personas autorizadas para el efecto por el MA o por las autoridades seccionales que tengan la delegación respectiva.
- Inscribir su actividad y los desechos peligrosos que generan, ante la STPQP o de las autoridades seccionales que tengan la delegación respectiva, el cual remitirá la información necesaria al MA.
- Llevar en forma obligatoria un registro del origen, cantidades producidas, características y destino de los desechos peligrosos, cualquiera sea ésta, de los cuales realizará una declaración en forma anual ante la Autoridad Competente; esta declaración es única para cada generador e independiente del número de desechos y centros de producción. La declaración se identificará con un número exclusivo para cada generador. Esta declaración será juramentada y se lo realizará de acuerdo con el formulario correspondiente, el generador se responsabiliza de la exactitud de la información declarada, la cual estará sujeta a comprobación por parte de la Autoridad Competente.
- Identificar y caracterizar los desechos peligrosos generados, de acuerdo a la norma técnica correspondiente.
- Antes de entregar sus desechos peligrosos a un prestador de servicios, deberá demostrar ante la autoridad competente que no es posible aprovecharlos dentro de su instalación.

Los proyectos de instalación de actividades nuevas que vayan a producir desechos peligrosos de acuerdo con los procesos de producción y las materias primas a utilizarse, de igual manera deberán presentar la declaración

correspondiente, la cual será requisito previo para la aprobación por parte de la Autoridad Competente.

Igualmente, deberán realizar un estudio de impacto ambiental conjuntamente con los estudios de ingeniería, el cual es requisito para su aprobación.

El operador deberá informar de forma inmediata en caso de accidentes producidos durante la generación y manejo de los desechos peligrosos. El ocultamiento de esta información recibirá la sanción prevista en este reglamento.

# **CAPÍTULO 3 DISEÑO DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA**

## **3.1. Diseño del calentador**

### **3.1.1 Parámetros de funcionamiento**

El calentador de efluentes contaminados deberá tener los siguientes elementos:

- Orificio de entrada del efluente
- Orificio para recoger el residuo de la evaporación de los efluentes
- Barrera para paso de hidrocarburo evaporado para favorecer el proceso de destilación fraccionada
- Conducto de salida de los efluentes evaporados livianos
- Conducto de salida de los efluentes evaporados pesados
- Manómetros de temperatura y presión
- Sistema de calentamiento a base de gas propano para el calentador

### **Cargas presentes en el calentador:**

Este elemento al estar trabajando con hidrocarburos no va a ser sometido a condiciones severas de trabajo, pero dentro de las principales que se deberán analizar para su diseño son las siguientes:

- Presión debido a la elevación de la temperatura en el interior del calentador.
- Peso del calentador.

Diagrama unifilar de todo el equipo de destilación

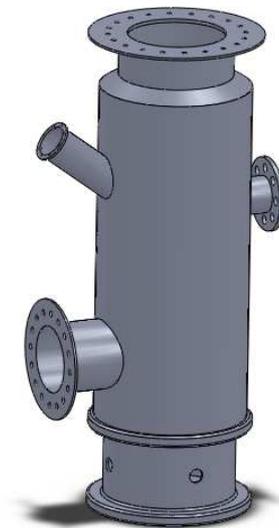
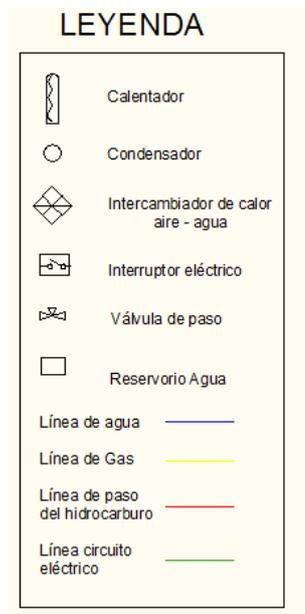
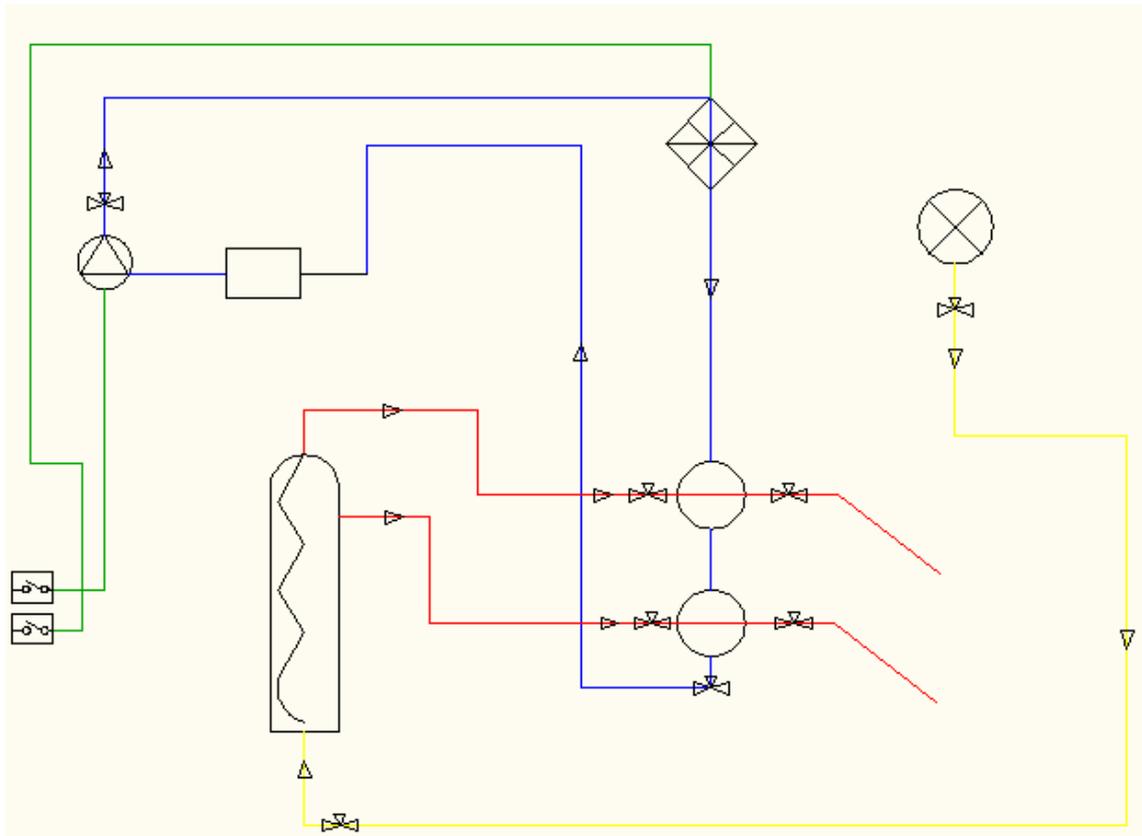


Figura 3.1 Esquema del calentador a construir<sup>34</sup>

<sup>34</sup> Esquema realizado por el autor

### 3.1.2 Materiales requeridos para su elaboración

El calentador será elaborado en su totalidad por acero SA-516 el cual tiene una resistencia de 15 700 PSI<sup>35</sup>.

Se diseñarán los orificios con tapas de manhole, las tapas que corresponden a la salida de los gases tendrán un orificio en su mitad para la instalación de la tubería que conducirá el gas efluente a los respectivos intercambiadores de calor.

En las tapas de manhole se colocará un empaque de asbesto para evitar fugas de gases a la presión de trabajo.

Se elaborarán avisos para la seguridad de los operadores al momento de su funcionamiento.

### 3.1.3 Dimensionamiento del calentador

El calentador de hidrocarburos será construido de acero, deberá tener dos aberturas para la entrada del hidrocarburo y la segunda para recoger los sólidos resultantes del proceso de evaporación del hidrocarburo.

Primero analizaremos cuanto volumen se necesita en el calentador:

El volumen de hidrocarburo a cargar en el calentador será de 55 galones.

$$V = 55 \text{gls}$$

$$1 \text{galón} = 3.78 \text{ litros}$$

$$V = 55 * 3.78 = 207.9 \text{ litros}$$

$$1 \text{ litro} = 1000 \text{ cm}^3$$

---

<sup>35</sup> Datos tomados del catálogo de “Vessel Pressure Handbook” y comparados con los valores en Aceropaxi S.A para el material mencionado.

$$V = 207900 \text{ cm}^3$$

Diámetro del calentador = 65 cm

Altura necesaria= altura de hidrocarburo **Ecuación 3.1**

(fase líquida) + altura hidrocarburo (fase gaseosa)

*Altura de hidrocarburo* =  $V/\text{área}$  **Ecuación 3.2**

$$\text{altura de hidrocarburo} = \frac{207900}{\pi * \left(\frac{65}{2}\right)^2}$$

*altura de hidrocarburo* = 62.65 cm

Para la altura del hidrocarburo evaporado se debe tomar en cuenta los siguientes requerimientos:

- Al ser un proceso de destilación fraccionada, se necesita una placa que consiga separar de mejor manera los elementos menos densos de los más densos.
- Un espacio en donde se ubique el gas hasta su evacuación.

$h_{gas} = h_{placa} + h_{ocupagas}$  **Ecuación 3.3**

$h_{gas} = 112 \text{ cm}$

$H = h_{hidrocarburo} + h_{gas}$  **Ecuación 3.4**

$H = 62.65 + 112$

$H = 174.65 \text{ cm}$

Por motivos de diseño y construcción la altura será de

H= 175 cm

## Esfuerzo en el recipiente a presión

Se deberá realizar un análisis de todas las cargas a las cuales el calentador se encontrará sometido, las cargas que podemos citar para el análisis son las siguientes:

Presión (5 PSI)

Temperatura (70 °C)

Presión por el peso del recipiente.

## Esfuerzos de tensión debido a la presión<sup>36</sup>

$$S1 = \frac{P \cdot D}{4t} \quad \text{Esfuerzo longitudinal} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

$$S2 = \frac{P \cdot D}{2t} \quad \text{Esfuerzo circunferencial} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Donde:

P= Presión interna (PSI)

D= Diámetro interno (pulgadas)

t = Espesor (pulgadas)

$$S1 = \frac{5 * (25.59)}{4(0.5)}$$

---

<sup>36</sup> MEGYESY, Eugene, Pressure Vessel handbook, Pressure Vessel publishing, Oklahoma, 2001. Pag 14

$$S1 = 63.98 \text{ PSI}$$

$$S2 = \frac{5 * (25.59)}{2(0.5)}$$

$$S2 = 127.95 \text{ PSI}$$

Si el esfuerzo del cordón de soldadura longitudinal y circular son de 63.98 y 127.95 respectivamente podemos concluir que el calentador a presión tiene una operación de trabajo adecuado con el diseño.

### **Presión Interna**

#### **Presión de operación**

Se considera presión de operación al valor en el que la presión se encuentra regularmente al momento del funcionamiento del calentador.

$$P_{\text{operación}} = 5 \text{ PSI}$$

#### **Presión de diseño<sup>37</sup>**

Al tratarse del diseño es recomendable contar con un factor de seguridad, para este caso va a ser de 30 PSI más que la presión de operación del calentador. También vamos a considerar la presión que ejerce el volumen del hidrocarburo dentro del caldero.

$$Presión \text{ hidrocarburo} = \rho * g * h$$

**Ecuación 3.7**

$$Presión \text{ hidrocarburo} = 0.8 * 9,81 * 62.65$$

$$Presión \text{ hidrocarburo} = 491.67 \text{ Pa}$$

---

<sup>37</sup>M EGYESY, Eugene, Pressure Vessel handbook, Pressure Vessel publishing, Oklahoma, 2001. Pag14

Transformando a PSI *Presión hidrocarburo* = 0.071 PSI

$$MAWP = 5 \text{ PSI} + (\text{presión del hidrocarburo}) + 30 \text{ PSI} \quad \text{Ecuación 3.8}$$

$$MAWP = 5 + 0.071 + 30$$

$$MAWP = 35.071 \text{ PSI}$$

### Máxima presión admisible de trabajo

Es el valor de presión interna a la que el elemento más débil del calentador está sometido hasta su punto permisible de trabajo, asumiremos el calentador como:

- En condición corroída
- Bajo la temperatura de diseño
- En posición normal de operación
- Bajo el efecto de otras cargas (viento, presión hidrostática, entre otras)

### Prueba hidrostática

Al menos 1.3 veces el valor máximo de presión admisible de trabajo, la prueba es realizada al terminar la construcción del calentador.

### Eficiencia de la junta

El valor de de eficiencia de la junta va a depender de la calidad de la junta. Para el caso de juntas a tope soldadas tenemos la siguiente tabla con sus respectivos valores:

	E/Rx	
<b>1</b>	Full	Total
<b>0.85</b>	Spot	Por puntos
<b>0.7</b>	None	No

**Tabla 3.1 Valores para juntas a tope soldadas<sup>38</sup>**

Para diseñar el caldero, primero debemos calcular el valor del espesor del cuerpo, para ello utilizaremos la siguiente fórmula:

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P} \quad \text{Ecuación 3.9}$$

En donde:

- t = espesor del calentador (inches)
- P= presión de diseño (MAWP) (PSI)
- R= radio interno (inches)
- S= valor del esfuerzo del material (PSI)
- E= eficiencia de la junta

Para calcular el esfuerzo del material acudimos a la tabla de materiales:

189

<b>PROPERTIES OF MATERIALS</b> <b>CARBON &amp; LOW ALLOY STEEL</b> Maximum Allowable Stress Values in Tension 1000 psi.*												
Specification		For Metal Temperature Not Exceeding Deg. F.										
Number	Grade	-20 400	500	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
SA-283	C	15.7	15.7	15.3	14.8	-	-	-	-	-	-	-
SA-285	C	15.7	15.7	15.3	14.8	14.3	13.0	10.8	8.7	5.9		
SA-515	60	17.1	17.1	16.4	15.8	15.3	13.0	10.8	8.7	5.9	4.0	2.5
SA-515	65	18.6	18.6	17.9	17.3	16.7	13.9	11.4	8.7	5.9	4.0	2.5
SA-515	70	20.0	20.0	19.4	18.8	18.1	14.8	12.0	9.3	6.7	4.0	2.5
SA-516	55	15.7	15.7	15.3	14.8	14.3	13.0	10.8	8.7	5.9	4.0	2.5
SA-516	60	17.1	17.1	16.4	15.8	15.3	13.0	10.8	8.7	5.9	4.0	2.5

**Tabla 3.2 Propiedades de los materiales (Acero)<sup>39</sup>**

<sup>38</sup> MEGYESY, Eugene, Pressure Vessel handbook, Pressure Vessel publishing, Oklahoma, 2001. Pag18

<sup>39</sup> MEGYESY, Eugene, Pressure Vessel handbook, Pressure Vessel publishing, Oklahoma, 2001. Pag 189

El material que vamos a ocupar es el SA-516 para la elaboración del calentador

$$t = \frac{35.071 * 12.79}{15700(0.85) - (0.6) * 35.071}$$

$$t = 0.033 \text{ inches}$$

El espesor mínimo para nuestro requerimiento será de 0.171 inches, el material que se tiene para el calentador es de 0.2 inches el cual resistirá la presión interna de trabajo en el calentador.

Para verificar si el calentador con el espesor designado resistirá ya en su funcionamiento, utilizaremos la siguiente fórmula de presión y la compararemos con la MAWP:

$$P = \frac{SEt}{R+0.6t}$$

**Ecuación 3.10**

$$P = \frac{15700(0.85)0.2}{12.79 + 0.6(0.2)}$$

$$P = 206.74 \text{ PSI}$$

$$MAWP = 35.071$$

Al ser  $P > MAWP$  podemos concluir que el espesor del calentador es correcto para la presión de trabajo a la que va a ser sometido.

Para el diseño de la cabeza, construiremos una de forma elipsoidal, la misma que tendrá las siguientes dimensiones:

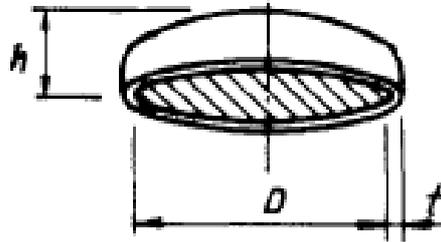


Figura 3.2 Cabeza elipsoidal<sup>40</sup>

- $h=15\text{cm}$
- $D=65\text{ cm}$

Para calcular el espesor de la cabeza utilizaremos la siguiente fórmula:

$$t = \frac{PD}{2SE - 0.2P} \quad \text{Ecuación 3.11}$$

$$t = \frac{35.071 * 25.59}{2 * 15700 * 0.85 - 0.2(35.071)}$$

$$t = 0.033\text{inches}$$

Para la construcción de la cabeza elipsoidal, consideraremos un espesor de 0.2inches por el material que se tiene en stock el mismo que es válido para la

---

<sup>40</sup> MEGYESY, Eugene, Pressure Vessel handbook, Pressure Vessel publishing, Oklahoma, 2001.

construcción de la cabeza ya que este valor es mayor al espesor calculado en la fórmula anterior.

Se usará la siguiente fórmula de la presión en la cabeza elipsoidal para compararla con la presión de diseño:

$$P = \frac{2SEt}{D+0.2t} \quad \text{Ecuación 3.12}$$

$$P = \frac{2(15700)(0.85)(0.2)}{25.59 + 0.2(0.2)}$$

$$P = 208.27 \text{ PSI}$$

$$MAWP = 35.071 \text{ PSI}$$

Con estos valores de presión obtenida y luego de analizarlos con el MAWP podemos concluir que la cabeza del tanque va a poder aguantar la presión de trabajo a la que va a ser sometida.

### 3.1.4 Análisis termodinámico del calentador

El efluente debe calentarse a una temperatura de 65°C para su ebullición a una presión de 5PSI.

Esquema del sistema:

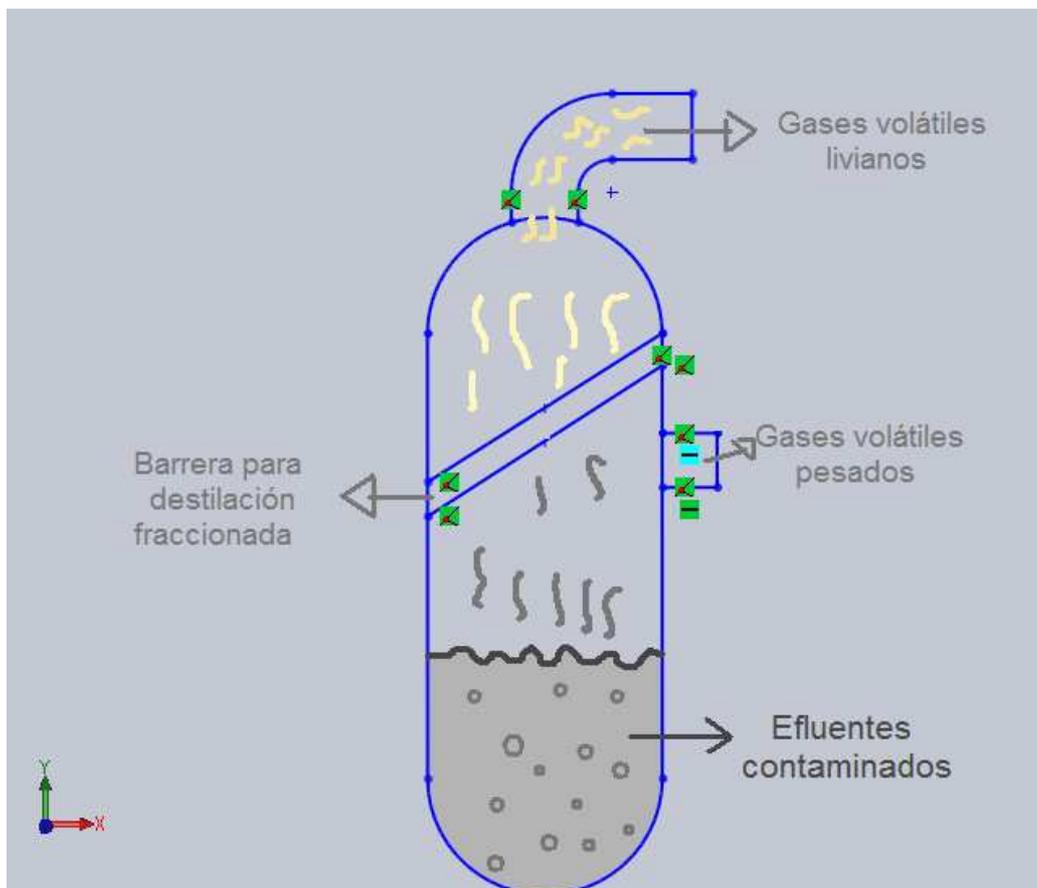


Figura 3.3 Esquema del proceso de calentamiento<sup>41</sup>

Realizando un proceso de destilación simple, debemos calcular el calor requerido para pasar 1kg de efluente desde 20°C hasta los 65°C

$$Q_a = mcp(t_2 - t_1)$$

Ecuación 3.13

<sup>41</sup> Esquema realizado por el autor.

Para calcular la masa:

$$V = 207.9 \text{ litros}$$

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Donde:

- $\rho$  = densidad del efluente hidrocarburífero (0.8 Kg/m<sup>3</sup>)
- $V$  = volúmen de efluente colocado en el calentador (55glns=207.9 m<sup>3</sup>)

$$m = 0.8(207.9)$$

$$m = 166.32 \text{ Kg}$$

$$Qa = 166.320kg(0.4)cal/g^{\circ}C(65 - 20)^{\circ}C$$

$$Qa = 2993.76 \text{ Kcal}$$

Transformando a BTU

$$Qa = 2993.76 * 3.9$$

$$Qa = 11855.28 \text{ BTU}$$

Cálculo del calor latente de vaporización, para conseguir pasar el efluente del estado líquido al estado de vapor

$$Qb = m\lambda_{vapor}$$

**Ecuación 3.14**

$$Qb = 166.320Kg * \frac{80Kcal}{kg}$$

$$Qb = 13305.6 \text{ Kcal}$$

$$Qb = 52690.17 \text{ BTU}$$

Calor total, es la suma del calor necesario para elevar la temperatura del efluente desde los 20°C hasta los 65°C mas el calor latente de vaporización

$$Q_t = Q_a + Q_b$$

Ecuación 3.15

$$Q_t = 11855.28 + 52690.17$$

$$Q_t = 64545.46 \text{ BTU}$$

Este calor va a ser suministrado por un sistema de calentamiento a gas, operado manualmente ya que al llegar a la temperatura requerida, el operador deberá desconectar el suministro de gas, de igual manera, cuando la temperatura descienda, deberá hacer el proceso contrario al mismo.

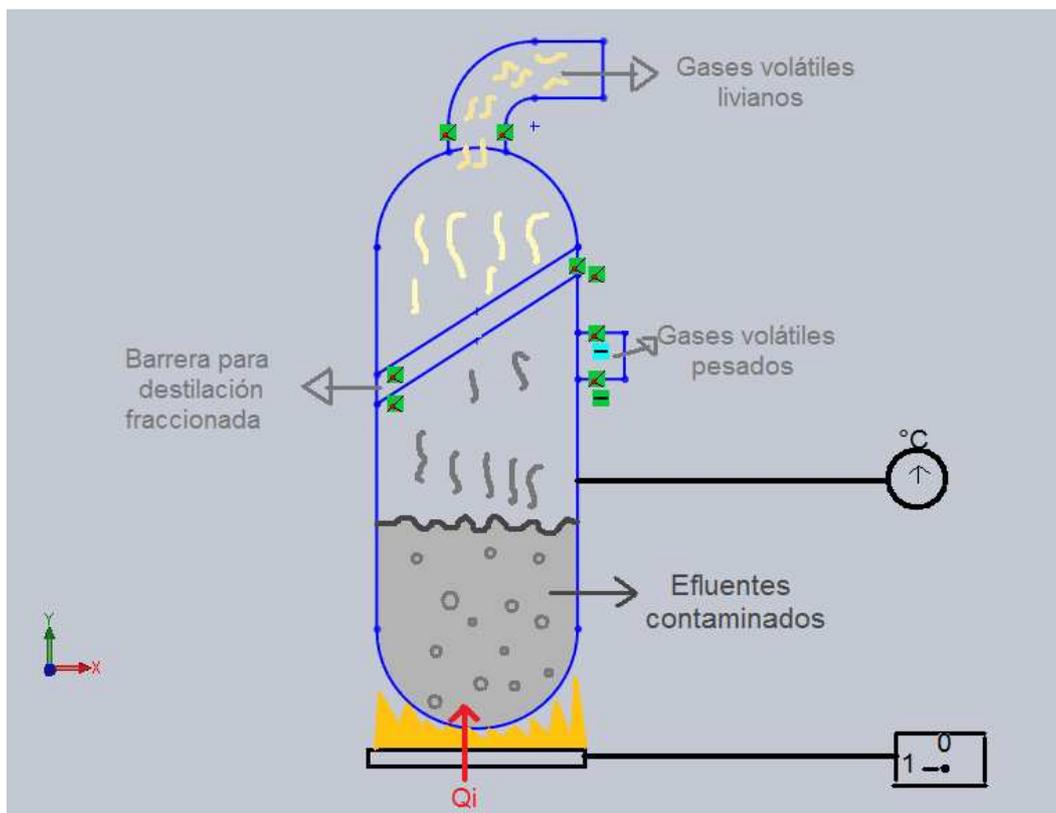


Figura 3.4 Esquema de calentamiento usando gas propano<sup>42</sup>

<sup>42</sup> Esquema realizado por el autor.

## **3.2. Diseño del sistema de condensación del efluente gaseoso**

### **3.2.1 Parámetros de diseño**

El sistema encargado de la condensación del efluente en estado gaseoso deberá contener los siguientes elementos:

- Intercambiador de calor para los efluentes gaseosos livianos
- Intercambiador de calor para los efluentes gaseosos pesados
- Bomba encargada de la recirculación del agua que será utilizada para el proceso de condensación del gas.
- Intercambiador de calor para enfriar el agua.
- Tuberías, mangueras y accesorios para enviar el condensado a un tanque de almacenamiento.
- Manómetros de presión y temperatura
- Válvulas de apertura y cierre de fluidos

#### **Cargas presentes en el sistema de condensación:**

Dentro de este sistema no tenemos ninguna carga que pueda influir en el diseño, ya que se trabaja con caudales bajos de agua y gas por tanto la presión es despreciable al momento de decisión en el diseño.

Lo importante dentro de este sistema es conseguir condensar el efluente gaseoso tanto en el intercambiador de calor para el gas liviano como para el intercambiador de calor para el gas pesado.

### 3.2.2 Materiales requeridos para su elaboración

Para los intercambiadores de calor se los diseñará en la disposición de tubo y coraza. Para la coraza se utilizará el acero SA-516 para la coraza, las dimensiones de la coraza serán las siguientes:

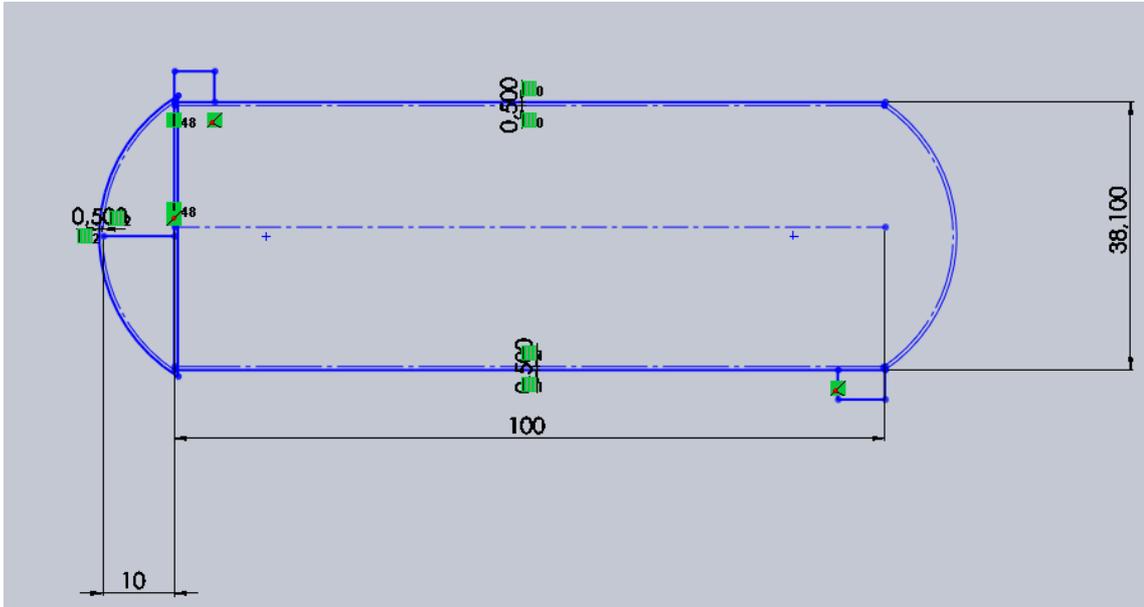


Figura 3.5 Esquema de la coraza del intercambiador de calor<sup>43</sup>

Dimensiones en centímetros.

El largo del intercambiador de calor es de 1 metro con 20 centímetros, sus extremos redondeados en forma elipsoidal con su distancia en  $x = 10$  centímetros.

La tubería de entrada del agua tendrá un diámetro de  $\frac{1}{2}$ " al igual que la tubería de salida.

---

<sup>43</sup> Esquema realizado por el autor.

El sistema de tubos será realizado tipo serpentín el material utilizado será el cobre gracias a su efectividad en el proceso de transferencia de calor, el cobre tiene una conductividad térmica de 420 W/mK

El serpentín se realizará en un proceso de doblado con las siguientes dimensiones:

- Diámetro del tubo ½"
- Diámetro del serpentín 30cms
- Número de pasos 10
- Espaciado entre pasos 8cms

La tubería que conduce el gas efluente desde el calentador hasta los intercambiadores de calor y el condensado desde los intercambiadores de calor hacia los tanques de almacenamiento será de acero SA-516.

Deberán contar con válvulas de apertura y cierre tanto para la entrada como a la salida de los intercambiadores de calor.

La tubería tendrá un diámetro de ½". y un largo de 32.8 ft

Para el sistema de refrigeración se utilizarán mangueras para conducir el líquido por los dos intercambiadores de calor, tanque de reserva y enfriador.

Para enfriar el agua que será utilizado en el proceso de condensación del gas efluente, utilizaremos un intercambiador de flujo cruzado con deflector para aumentar la eficiencia de este sistema.

### 3.2.3 Análisis termodinámico en el sistema de condensación

Condiciones:

El hidrocarburo ingresará en el condensador con las siguientes propiedades:

Temperatura de entrada:  $65^{\circ}\text{C}=174.6^{\circ}\text{F}$

Temperatura de saturación:  $50^{\circ}\text{C}=147.6^{\circ}\text{F}$

Temperatura de salida:  $20^{\circ}\text{C}=68^{\circ}\text{F}$

Masa de hidrocarburo: 50 Lb/h

La masa de hidrocarburo fue medido en el prototipo mostrado a continuación, pesando la cantidad de hidrocarburo obtenido en el intervalo de una hora de tiempo.



El fluido que enfriará el hidrocarburo será el agua, se tienen los siguientes datos de diseño:

Temperatura de entrada:  $18^{\circ}\text{C}=64.4^{\circ}\text{F}$

Temperatura de salida: Por calcular

Masa de agua: 330 Lb/h

Masa de agua es obtenida en base al caudal que nos ofrece la bomba de agua, la misma que lo seleccionaremos más adelante.

Nota: El diseño del intercambiador de calor detallado a continuación es aplicado tanto para efluentes livianos como para efluentes pesados.

Esquema del intercambiador de calor:

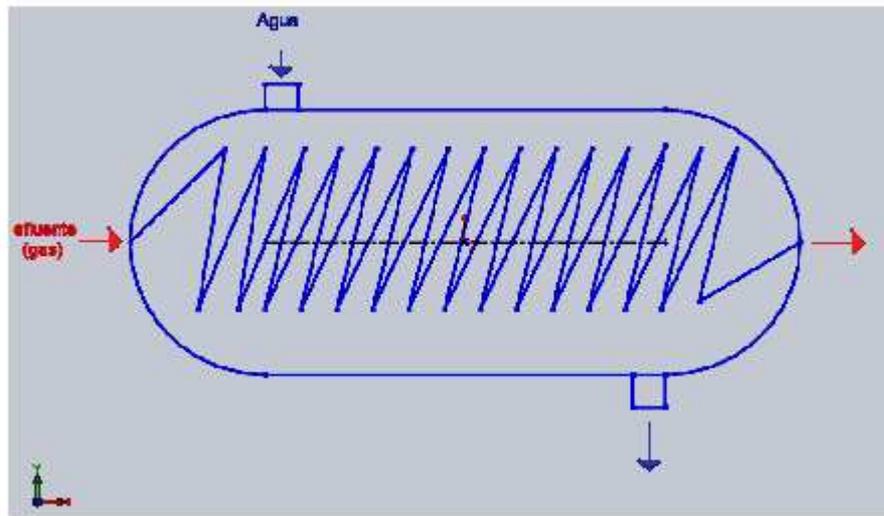


Figura 3.6 Esquema del intercambiador de calor de tubo y coraza<sup>44</sup>

Se tiene un intercambiador de calor tubo y coraza de un paso por la coraza y 10 pasos por el tubo.

**Coraza:**

- Material: Acero A36
- Diámetro exterior coraza= 15inches =38.1 cms

Dext\_coraza := 0.38 m      Diámetro exterior coraza

- Diámetro interior coraza= 14.5 =37.1 cms

---

<sup>44</sup> Esquema realizado por el autor

Dint\_coraza := 0.3710 m Diámetro interior coraza

Tubo:

PROPERTIES OF PIPE											
Schedule numbers and weight designations are in agreement with ANSI B36.10 for carbon and alloy steel pipe and ANSI B36.19 for stainless steel pipe.											
Nom pipe size	Schedule No.		Weight Designation	Out-side diam. in.	In-side diam. in.	Wall thick-ness in.	Weight per foot lb.	Wt. of water per ft. pipe lb.	Outside surface per ft. sq. ft.	Inside surface per ft. sq. ft.	Trans-verse area sq. in.
	Carbon & alloy steels	Stain-less steels									
1/2	...	10S	...	.840	.670	.083	.671	.1550	.220	.1764	.3568
	40	40S	Std.	.840	.622	.109	.850	.1316	.220	.1637	.3040
	80	80S	X-Sig.	.840	.546	.147	1.087	.1013	.220	.1433	.2340
	160	...	...	.840	.466	.187	1.310	.0740	.220	.1220	.1706
	...	...	XX-Sig.	.840	.252	.294	1.714	.0216	.220	.0660	.0499

Tabla 3.3 Dimensiones internas, externas y espesor de la tubería de 1/2"<sup>45</sup>

diámetro exterior=1/2"

De := 0.84 inches diámetro externo del tubo

Di := 0.622 inches diámetro interno del tubo

e := 0.109 inches espesor del tubo

L := 10 inches longitud del tubo

Material: Cobre

<sup>45</sup>MEGYESY, Eugene, Pressure Vessel handbook, Pressure Vessel publishing, Oklahoma, 2001.

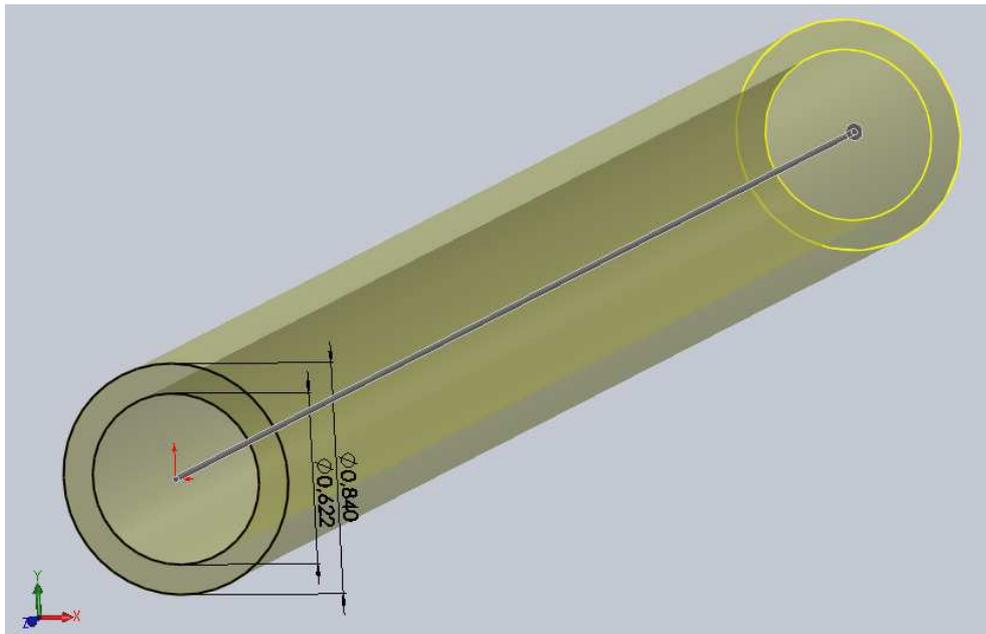


Figura 3.7 Dimensiones del diámetro interno y externo de la tubería de cobre de 1/2"<sup>46</sup>

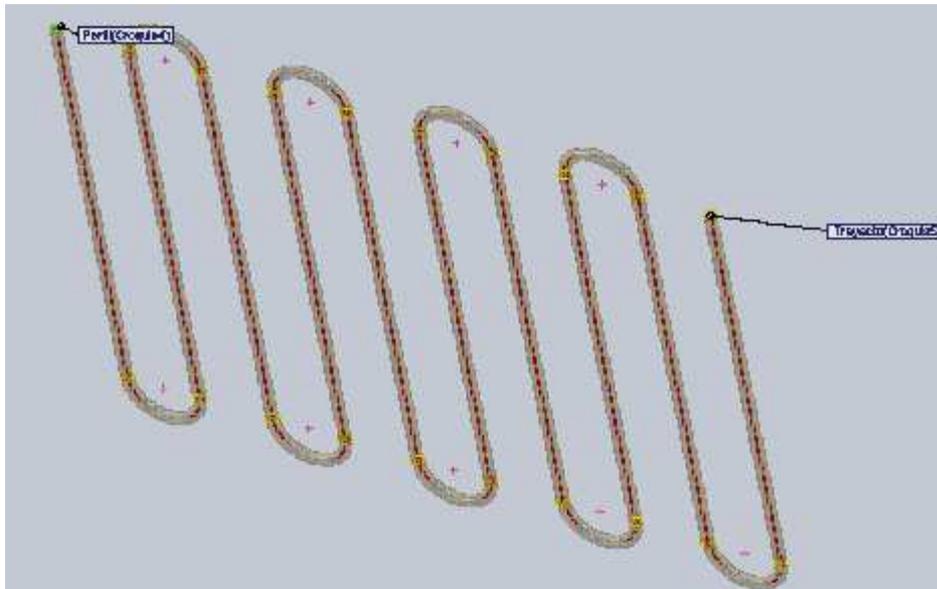


Figura 3.8 Esquema de pasos de la tubería de cobre de 1/2"<sup>47</sup>

---

<sup>46</sup> Esquema realizado por el autor

<sup>47</sup> Esquema realizado por el autor

Tras la realización de las pruebas en el prototipo se observó que a una presión de trabajo en el calentador de 5PSI, la temperatura de saturación del efluente liviano es de 50°C, sin embargo para tener un mejor caudal de flujo, la temperatura final a la cual se calentará el efluente será de 65 °C

$Th_i := 174.6$	°F	Temperatura del efluente liviano a la entrada del condensador
$Th_{sat} := 147.6$	°F	Temperatura de saturación del efluente liviano
$Th_o := 75$	°F	Temperatura de salida del efluente liviano
$m_h := 15$	lb/h	caudal del efluente
$cp_h := 0.45$	BTU/lb°F	Calor específico del efluente liviano

Calculo del calor que deberá perder el efluente desde su temperatura en estado sobrecalentado al punto de saturación:

$$q_{sobrec} := m_h \cdot cp_h \cdot (Th_i - Th_{sat}) \quad \text{Ecuación 3.16}$$

$$q_{sobrec} = 182.25 \quad \text{Btu}$$

Proceso de condensación del hidrocarburo:

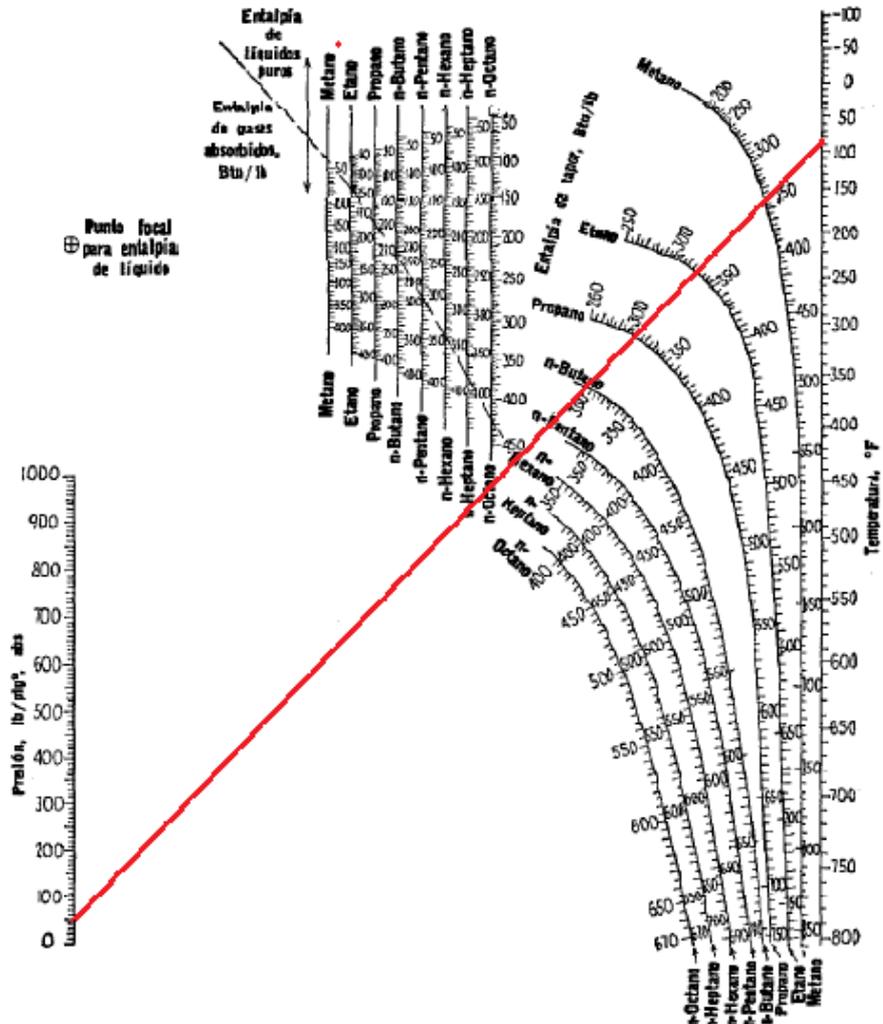


Figura 3.8 Tablas de entalpías de hidrocarburos<sup>48</sup>

$h_{i_h} = 315$  Btu/lb Entalpia de efluente estado gaseoso 5 PSI y 50 °C

$h_{o_h} = 175$  Btu/lb Entalpia de efluente estado líquido a 5 PSI y 20 °C

<sup>48</sup> KERN, Donald, Procesos de transferencia de calor, Continental, México, 1999. Pag. 941

Calor necesario para condensar el efluente liviano:

$$q_{\text{cond}} := m_h \cdot (h_{i_h} - h_{o_h})$$

$$q_{\text{cond}} = 2.1 \times 10^3 \text{ Btu}$$

**Ecuación 3.17**

Calor necesario para condensar el efluente y tener una temperatura final de 20°C:

$$Q_{\text{total}} := q_{\text{sobrec}} + q_{\text{cond}}$$

$$Q_{\text{total}} = 2.282 \times 10^3 \text{ Btu}$$

**Ecuación 3.18**

### Resumen:

$$q_{\text{sobrec}} = 182.25 \text{ Btu}$$

Calor necesario para que el vapor del hidrocarburo llegue al estado sobrecalentado

$$q_{\text{cond}} = 2.1 \times 10^3 \text{ Btu}$$

Calor necesario para enfriar el efluente líquido a la temperatura de salida requerida.

$$Q_{\text{total}} = 2.282 \times 10^3 \text{ Btu}$$

Calor total para todo el proceso

## Agua:

- Datos:

$T_{c\_i} := 65$  °F      Temperatura de entrada del agua

$cp\_c := 1$  Btu/lb°F      Capacidad calorífica del agua

## Balance de Temperaturas (DMLT)

Hidrocarburo

Agua

$T_{h\_i} = 174.6$

$T_{c\_i} = 65$

$T_{h\_o} = 75$

$T_{c\_o} = 68.804$

$\Delta T1 := T_{h\_i} - T_{c\_i}$

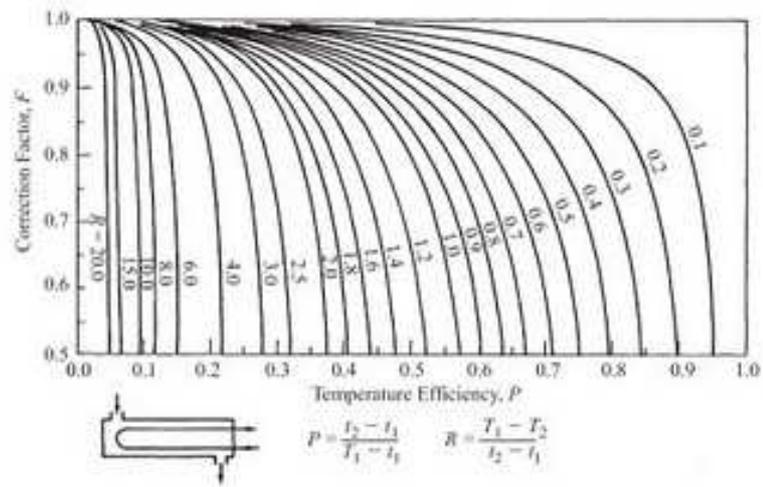
$\Delta T2 := T_{h\_o} - T_{c\_o}$

$$DMLT := \frac{\Delta T1 - \Delta T2}{\ln\left(\frac{\Delta T1}{\Delta T2}\right)}$$

Ecuación 3.19

$DMLT = 35.993$  °F

**Factor de corrección:**



**Figura 3.9 Factor de corrección F<sup>49</sup>**

$$R := \frac{T_{c_i} - T_{c_o}}{T_{h_o} - T_{h_i}}$$

$$P := \frac{T_{h_o} - T_{h_i}}{T_{c_i} - T_{h_i}}$$

$$R = 0.038$$

$$P = 0.909$$

$$\text{Factor } F = 1$$

$$\text{DMLTc} := \text{DMLT} = 35.993 \quad ^\circ\text{F}$$

<sup>49</sup> INCROPERA, Frank y DE WITT, David, Fundamentos de transferencia de calor, Pearson, México, 1999.

Cálculo del área de transferencia del condensador:

$N_p := 10$                       Número de pasos del tubo por el condensador

$N_t := 1$                         Número de tubos

$L := 0.98 \text{ ft}$                       Longitud de la tubería x cada paso

$D_i = 0.622 \text{ inches}$               Diámetro interno de la tubería de cobre

$$A_s := \pi \cdot \frac{D_i}{12} \cdot N_p \cdot N_t \cdot L$$

**Ecuación 3.20**

$A_s = 1.596 \text{ ft}^2$                       Área de transferencia de calor por la tubería.

Cálculo del número de Reynolds para el efluente liviano:

$$tm_h := \frac{Th_i + Th_o}{2} = 124.8 \quad ^\circ F$$

**Ecuación 3.21**

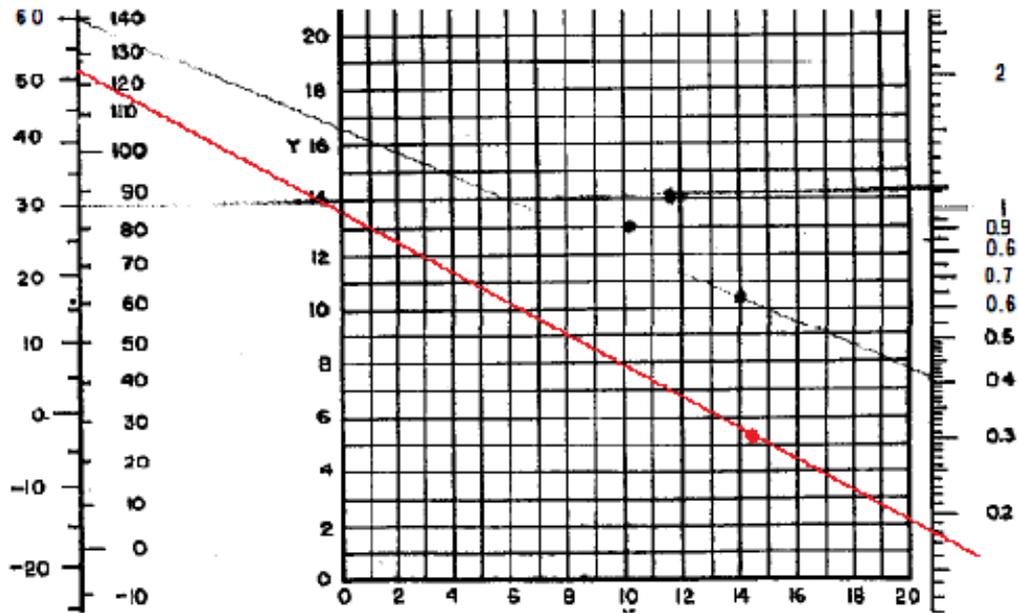


Figura 3.10 Viscosidades para hidrocarburos<sup>50</sup>

$\mu := 0.18-2.42$  lb/ft viscosidad cinemática del efluente a la temperatura media

$m_h := 20$  lb / h

$D_i = 0.622$  inches

$L = 0.98$  ft

$N_p = 10$  número de pasos por el tubo

$$at_h := \frac{\pi \cdot \left(\frac{D_i}{12}\right)^2}{4}$$

Ecuación 3.22

$$at_h = 2.11 \times 10^{-3}$$

<sup>50</sup> KERN, Donald, Procesos de transferencia de calor, Continental, México, 1999. pag 928

Ecuación 3.23

$$Gi := \frac{m\_h}{(at\_h)}$$

$$Gi = 9.478 \times 10^3 \quad \text{lb /h ft}^2$$

$$Re := \frac{Di \cdot Gi}{\mu}$$

Número de Reynolds para flujo interno

Ecuación 3.24

$$Re = 1.353 \times 10^4$$

$$\frac{L}{Di} = 1.576$$

Ingresando a la gráfica 24 del libro de Kern página 943 tenemos:

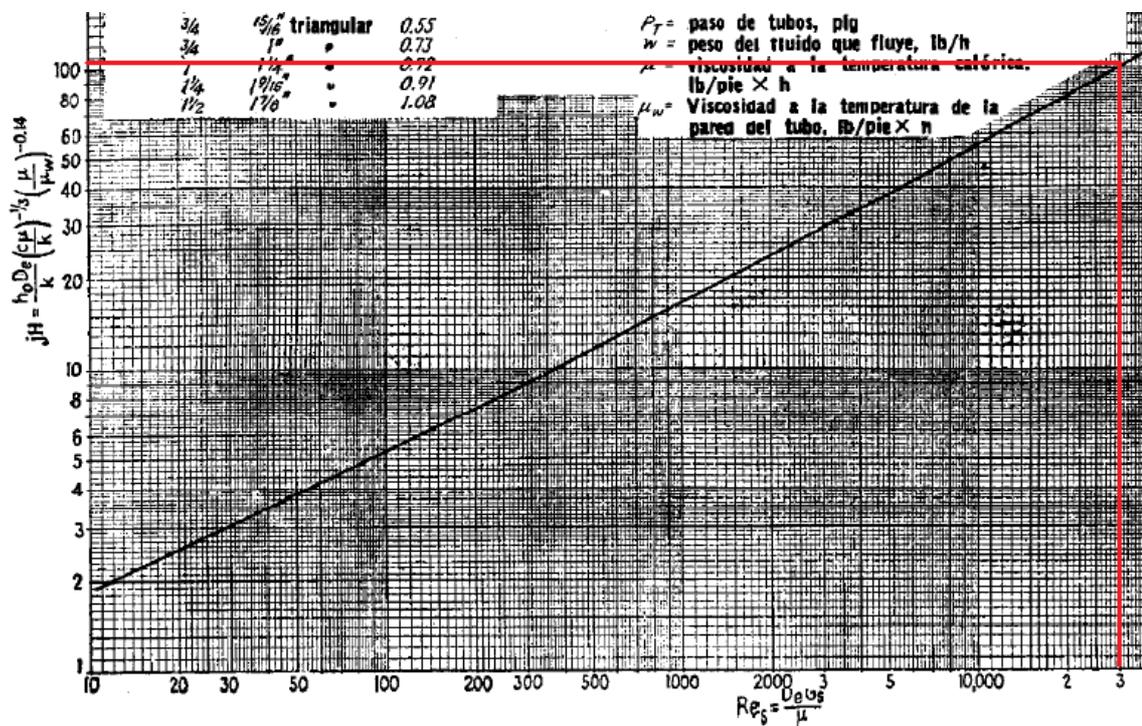


Figura 3.11 Curva de transferencia de calor para el lado de los tubos<sup>51</sup>

<sup>51</sup> KERN, Donald, Procesos de transferencia de calor, Continental, México, 1999, pag 943

$$\left(\frac{cp_h \cdot \mu}{k_h}\right)^{\frac{1}{3}} = 1.377$$

**Ecuación 3.25**

$$hi := jH \cdot \frac{k_h}{\frac{Di}{12}} \cdot \left(\frac{cp_h \cdot \mu}{k_h}\right)^{\frac{1}{3}}$$

**Ecuación 3.26**

$$hi = 129.552 \quad \text{Btu/h}^{\circ}\text{F}$$

Para el cálculo del coeficiente de película externo ho:

Datos:

$$A_{ext} := \pi \cdot D_e \cdot L$$

Área externa del tubo de cobre

**Ecuación 3.27**

$$A_{ext} = 2.586 \quad \text{inch}^2$$

$$A_{int} := \pi \cdot D_i \cdot L$$

Área interna del tubo de cobre

**Ecuación 3.28**

$$A_{int} = 1.915 \quad \text{inch}^2$$

$$e = 0.109$$

inch

espesor de la tubería de cobre

**Ecuación 3.29**

$$k_{cu} := 224$$

Btu/ft<sup>°</sup>F

conductividad térmica para el cobre

**Ecuación 3.30**

$$A_{ml} := \frac{A_{ext} - A_{int}}{\ln\left(\frac{A_{ext}}{A_{int}}\right)} \quad \text{Ecuación 3.31}$$

$$A_{ml} = 2.234 \quad m^2$$

Cálculo del  $h_e$ :

$$\frac{h_e * D_{ec}}{K_c} = 0,36 \left[ \left( \frac{G_s * D_e}{\mu_c} \right)_{T_m}^{0,55} \left( \frac{Cp_c * \mu_c}{k_c} \right)_{T_m}^{1/3} \right] \quad \text{Ecuación 3.32}$$

Propiedades a una temperatura promedio de agua en la coraza del intercambiador de calor

$$T_{c_i} = 65 \quad ^\circ F$$

$$T_{c_o} = 68.804 \quad ^\circ F$$

$$T_{med_c} := \frac{T_{c_i} + T_{c_o}}{2}$$

$$T_{med_c} = 66.902 \quad ^\circ F \quad \text{Ecuación 3.33}$$

$$m_c = 600 \quad lb / h \quad \text{masa de agua por hora}$$

$$\mu_c := 2.11 \quad lb / h \quad \text{viscoidad cinemática del agua}$$

$$k_c := 0.35 \quad Btu / h \, ft^2 \, ^\circ K \quad \text{conductividad térmica del agua}$$

$$D_e = 0.84 \quad inches \quad \text{diámetro externo del serpentín}$$

$$at\_c := \frac{\pi \cdot \left(\frac{De}{12}\right)^2}{4}$$

**Ecuación 3.34**

$$at\_c = 3.848 \times 10^{-3} \text{ ft}^2$$

$$Gc := \frac{mc}{at\_c} = 1.559 \times 10^5$$

**Ecuación 3.35**

$$he := 0.36 \cdot \left[ \left( \frac{Gc \cdot De}{\mu\_c} \right)^{0.55} \cdot \left( \frac{cp\_c \cdot \mu\_c}{k\_c} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \cdot \frac{k\_c}{De}$$

**Ecuación 3.36**

$$he = 118.096$$

Calculando el coeficiente global de transferencia de calor:

$$U := \frac{1}{\frac{1}{hi} + \frac{Aext \cdot e}{k\_cu \cdot Aml} + \frac{1}{he}}$$

**Ecuación 3.37**

$$Qtotal = 2.282 \times 10^3$$

$$DMLT = 35.993$$

$$U = 59.702$$

Calculando el área necesaria para el intercambiador

$$As1 := \frac{Q_{total}}{U \cdot DMLT}$$

Ecuación 3.38

$$As1 = 1.062 \quad \text{ft}^2$$

$$As = 1.596 \quad \text{ft}^2$$

Transformando el área de Transferencia en distancia:

$$L1 := \frac{As1}{\pi} \cdot \frac{1}{\frac{Di}{12} \cdot Nt}$$

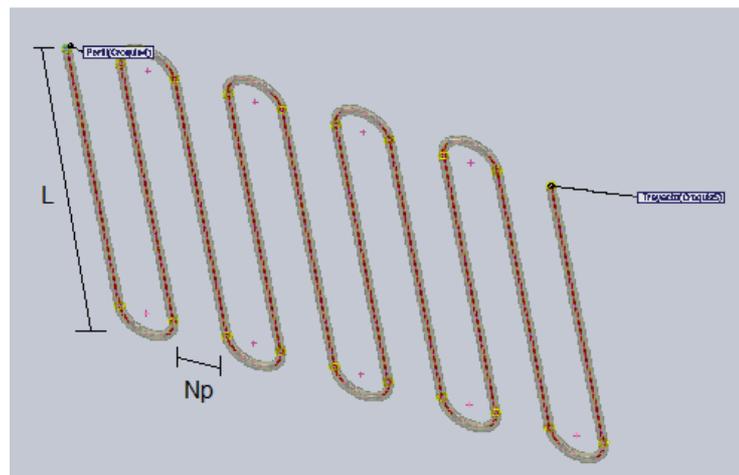
$$L2 := \frac{As}{\pi} \cdot \frac{1}{\frac{Di}{12} \cdot Nt}$$

$$L1 = 6.522 \quad \text{ft}$$

$$L2 = 9.8 \quad \text{ft}$$

$$Np = 10$$

Distribución: Un tubo con 10 pasos



En longitud:

Longitud de diseño: 6.52 ft

Longitud de construcción: 9.80 ft

Se construyó con un 30% más de longitud ya que por seguridad, todo el gas hidrocarburo debe condensarse y con esta longitud garantizamos que a la salida solo obtendremos hidrocarburo en estado líquido.

### 3.3. Diseño del sistema de enfriamiento del agua para el proceso de condensación del efluente gaseoso

Para enfriar el agua utilizaremos el siguiente sistema detallado en la figura 3.12 A continuación:

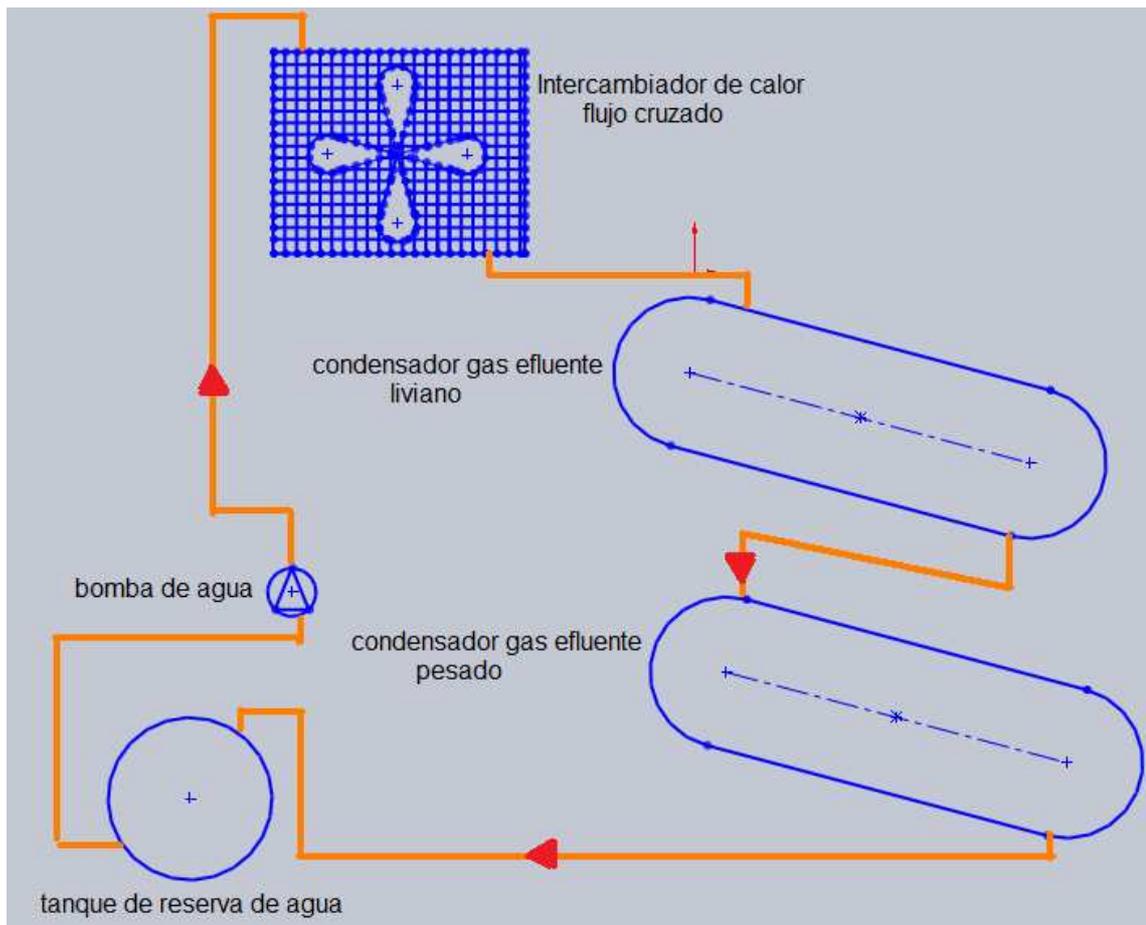


Figura 3.12 Esquema circuito de enfriamiento<sup>52</sup>

<sup>52</sup> Esquema realizado por el autor

### 3.3.1 Diseño del intercambiador de calor Aire-Agua

Cálculo del intercambiador de calor de flujo cruzado Aire – Agua

Para realizar el diseño de este intercambiador tenemos las siguientes condiciones de trabajo:

- El agua se encuentra a 30°C, su temperatura se debe a que fue sometida al proceso de condensación del efluente, para reinsertarla en el proceso es necesario disminuir su temperatura a 18°C
- Para enfriar el agua utilizaremos al aire como elemento enfriante, para conseguir una mejor eficiencia utilizaremos un deflector el mismo que consiga aumentar el caudal del aire.
- El intercambiador de calor será de flujo cruzado sin mezclar y tendrá un sistema aleteado para mejorar la eficiencia del mismo.
- El intercambiador no será construido, será seleccionado de una gama de intercambiadores que se tiene a disposición en el mercado, luego de un proceso de análisis de las posibilidades que se tienen en el mercado, se escogió un intercambiador de calor aire agua con flujo cruzado sin mezclar con las siguientes propiedades:
  - Se tiene un radiador automotriz donde los fluidos aire-agua no se mezclan.
  - La matriz de las aletas de placa tienen muy poco espacio entre sí.
  - En su interior se encuentran 40 tubos con un diámetro interno de 0.5 cms y una longitud de 60 cms.

**Matriz de decisión para seleccionar el radiador y deflector necesarios:**

Tipos de Radiadores			
Presión	Número tubos	Caudal (Kg/s)	Material
6	20	0.01	Acero, plástico
8	30	0.02	Cobre, plástico
10	30	0.03	Acero, cobre. Plástico
12	40	0.04	Acero, cobre. Plástico

**Tabla 3.4 Matriz de decisión para seleccionar el radiador**

Se seleccionó este tipo de radiador pues cumple con presión y caudal requeridos, los materiales de construcción son los adecuados para el trabajo que se va a realizar. Al tener 40 tubos, garantizamos una gran área de transferencia de calor.

Tipos de Deflectores		
CFM	Dimensiones (largo – ancho) cms	Voltaje (V)
20	20 x 20	110
40	60 x 60	110
60	80 x 80	220
80	100 x 100	220

**Tabla 3.5 Matriz de decisión para seleccionar el deflector**

El deflector seleccionado tiene similares dimensiones a las del radiador, lo cual es importante para su instalación, los CFM son adecuados para la transferencia de calor y el voltaje de trabajo nos ayuda a que estos equipos puedan ser conectado a la red eléctrica general.

Esquema:

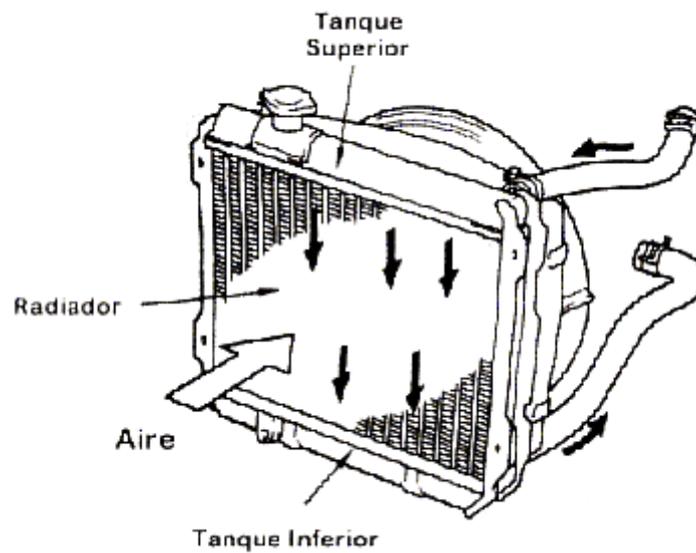


Figura 3.13 esquema funcionamiento intercambiador aire - agua<sup>53</sup>

Como datos de diseño tenemos:

- Agua :

$T_{i\_agua} := 24 \text{ } ^\circ\text{C}$  temperatura de entrada del agua

$T_{o\_agua} := 18 \text{ } ^\circ\text{C}$  temperatura de salida del agua

$m_{agua} := 0.04 \text{ kg/s}$  flujo másico del agua

- Aire :

$T_{i\_aire} := 15 \text{ } ^\circ\text{C}$  temperatura de entrada del aire

$m_{aire} : 40 \text{ CFM,}$  transformando a metros<sup>3</sup>/ hora

$m_{aire} := 40 \cdot 1.699$

$m_{aire} = 67.96 \text{ kg / h}$

---

<sup>53</sup>www.jeeperos.com

Para calcular el área superficial que se requiere, necesitamos conocer el número de unidades de transferencia, la misma que se puede calcular determinando la relación de capacidades de calor y eficiencia.

$$Q := m_{\text{agua}} \cdot c_{p_{\text{agua}}} \cdot (T_{i_{\text{agua}}} - T_{o_{\text{agua}}})$$

Para calcular el calor específico del agua necesitamos conocer la temperatura promedio del mismo.

$$T_{m_{\text{agua}}} := \frac{T_{i_{\text{agua}}} + T_{o_{\text{agua}}}}{2}$$

Ecuación 3.39

$$T_{m_{\text{agua}}} = 21 \quad ^\circ\text{C}$$

Revisando la tabla A6 del libro de Incropera:

Temperatura °C	Calor específico (Cp)
20	4.182
<b>21</b>	<b>X</b>
25	4.180

Tabla 3.6 Proceso de interpolación para el agua<sup>54</sup>

<sup>54</sup> Tabla realizada por el autor

Luego del proceso de interpolación:

$$cp\_agua := 4.181 \quad \text{KJ/Kg } ^\circ\text{C}$$

$$Q := m\_agua \cdot cp\_agua \cdot (Ti\_agua - To\_agua) \quad \text{Ecuación 3.40}$$

$$Q = 1.003 \quad \text{KW / s}$$

Cálculo del área de transferencia de calor del lado de los tubos:

$$Ai := Nt \cdot Di \cdot L$$

Donde :

$Ai$  : Área de transferencia de calor del lado de los tubos

$Nt$  : Número de tubos

$L$  : Longitud de los tubos

$$Nt := 40 \quad \text{tubos}$$

$$Di := 0.005 \quad \text{m}$$

$$L := 0.65 \quad \text{m}$$

$$Ai := Nt \cdot Di \cdot L$$

Ecuación 3.41

$$Ai = 0.13 \quad \text{m}^2$$

Con base en el balance de energía sobre el flujo de aire determinamos la temperatura de salida del mismo:

$$Q = 1.003 \quad \text{KW / s}$$

Ecuación 3.42

$$Q := m\_aire \cdot cp\_aire \cdot (To\_aire - Ti\_aire)$$

$$m_{\text{aire1}} := 550 \quad \text{Kg / h}$$

$$cp_{\text{aire}} := 1.0068 \quad \text{KJ/Kg } ^\circ\text{K}$$

$$Ti_{\text{aire}} = 15 \quad ^\circ\text{C}$$

$$To_{\text{aire}} := \frac{Q}{\frac{m_{\text{aire1}}}{3600} \cdot cp_{\text{aire}}} + Ti_{\text{aire}} \quad \text{Ecuación 3.43}$$

$$To_{\text{aire}} = 21.524 \quad ^\circ\text{C}$$

Al conocer la velocidad de transferencia de calor y el área superficial, el coeficiente de transferencia de calor global se puede determinar:

$$Q := U \cdot A \cdot F \cdot DMLTc \quad \text{Ecuación 3.44}$$

Cálculo de la Diferencia media de temperatura logarítmica DMLT

Esquema del diagrama de temperaturas:

$$\Delta T1 := Ti_{\text{agua}} - To_{\text{aire}}$$

$$Ti_{\text{agua}} = 24$$

$$\Delta T2 := To_{\text{agua}} - Ti_{\text{aire}}$$

$$To_{\text{agua}} = 18$$

$$\Delta T1 = 2.476$$

$$Ti_{\text{aire}} = 15$$

$$\Delta T2 = 3$$

$$To_{\text{aire}} = 21.524$$

$$DMLT := \frac{\Delta T1 - \Delta T2}{\ln\left(\frac{\Delta T1}{\Delta T2}\right)}$$

Ecuación 3.45

$$DMLT = 2.73$$

Calculo del factor de corrección:

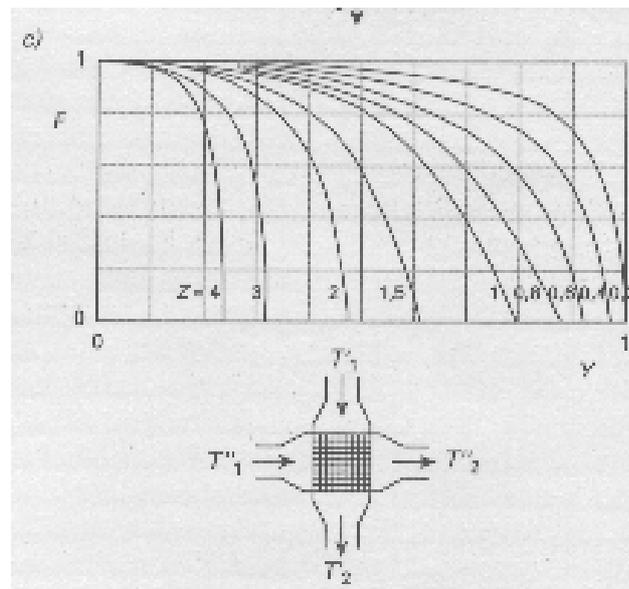


Figura 3.14 Factor de corrección para flujo cruzado<sup>55</sup>

$$P := \frac{T_{o\_agua} - T_{i\_agua}}{T_{i\_aire} - T_{i\_agua}} = 0.667$$

$$R := \frac{T_{i\_aire} - T_{o\_aire}}{T_{o\_agua} - T_{i\_agua}} = 1.087$$

<sup>55</sup> CENGEL, Transferencia de calor, McGraw-Hill, México, DF, 2003

Revisando la figura 13-18 c del libro de cengel:

$$F_{\text{cor}} := 0.55$$

$$\text{DMLTc} := \text{DMLT} \cdot F = 1.501$$

La transferencia de calor total es:

$$U := \frac{Q}{A_i \cdot \text{DMLTc}}$$

**Ecuación 3.46**

$$Q = 1.003 \quad \text{KW} / \text{s}$$

$$A_i = 0.13 \quad \text{m}^2$$

$$U = 5.141 \quad \text{KW} / \text{m}^2\text{°C}$$

Transformando los resultados al sistema ingles:

$$Q := 0.949 \quad \text{BTU}$$

$$A_i := 1.399 \quad \text{ft}^2$$

$$U := 0.45 \quad \text{BTU}/\text{ft}^2\text{°F}$$

Con los valores obtenidos en el diseño se puede concluir que el intercambiador de calor estará en la capacidad de enfriar el agua que estará circulando por el sistema de enfriamiento de los condensadores. Esto ayudará a que el agua ingrese al condensador de efluente a una temperatura de 18°C.

### 3.3.2 Selección de la bomba de agua

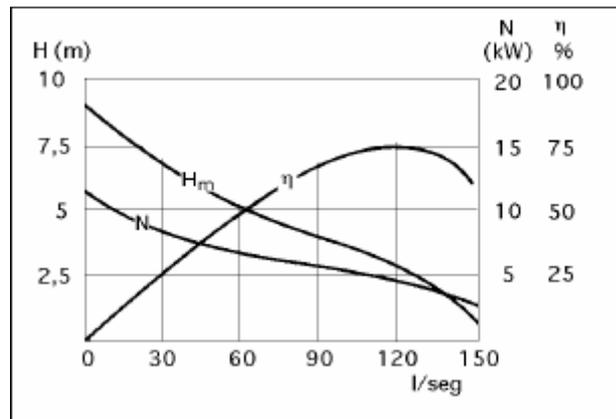


Figura 3.15 Parámetros de altura, caudal y eficiencia de la bomba a seleccionar

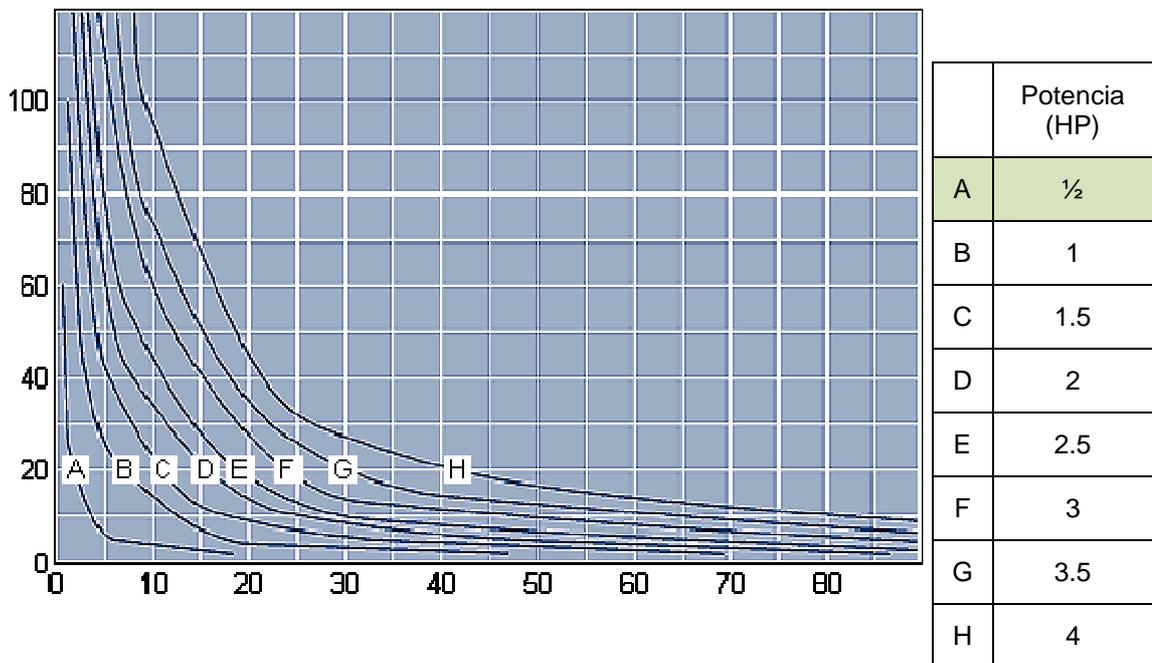


Figura 3.16 Potencia en base a la altura y caudal para la selección de la bomba

Los requisitos de altura y presión nos indican que debemos utilizar la siguiente bomba:

La bomba a utilizar para este proceso es de la marca Pedrollo, su forma de aspiración es por su parte central.

### Características:

- Caudal hasta 90 l/min (5.4 m<sup>3</sup>/h)
- Altura manométrica hasta 100 m
- Altura de aspiración manométrica hasta 8 m
- Temperatura del fluido hasta + 60°C
- Máxima temperatura ambiente hasta +40°C
- Potencia de ½ HP
- Trabaja con 110 V



Figura 3.17 Bomba Pedrollo<sup>56</sup>

La serie PK de Pedrollo está constituida por electrobombas periféricas, así llamadas porque en la periferia del rodete han sido aplicadas numerosas aspas radiales, que se encargan de ceder energía al fluido bombeado. El apropiado perfil de las aspas confiere al fluido en entrada a la bomba un movimiento veloz de recirculación radial entre las aspas del rodete y la doble ranura situada a ambos lados de éste en el cuerpo bomba. Puesto que cada una de las numerosas aspas contribuye a ceder energía, la presión del fluido aumenta gradualmente, durante su recorrido desde la boca de aspiración a la de impulsión, asegurando por otra parte un flujo regular sin ser intermitente y, por otra parte, elevadas presiones y curvas particularmente inclinadas. La tipología constructiva, relativamente sencilla de las bombas de la serie PK, exige, sin

---

<sup>56</sup> [www.pedrollo.com](http://www.pedrollo.com)

embargo, una ejecución mecánica particularmente esmerada, con el fin de garantizar la curva característica de la misma.

Es recomendable bombear agua limpia que no contenga partículas abrasivas y/o líquidos químicamente agresivos para los materiales que constituyen la bomba.

Son aptas para el empleo doméstico y especialmente para la distribución automática del agua acopladas a pequeños equipos hidroneumáticos, para riegos de huertas y jardines, para incrementar la insuficiente presión de la red de acueductos.

La instalación se debe efectuar en lugares cerrados o protegidos de la intemperie.

#### **Partes de la bomba:**

- CUERPO BOMBA en hierro fundido, con bocas de aspiración e impulsión roscadas.
- SOPORTE MOTOR en aluminio con laminilla de ajuste frontal en latón que reduce las dificultades de arranque causadas por el bloqueo del rodete tras largos períodos de inactividad.
- RODETE EN LATON, del tipo aspas periféricas radiales, flotante respecto al eje.
- EJE MOTOR en acero inoxidable AISI 316 (AISI 416 hasta 0.75 kW).
- SELLO MECANICO en cerámica y grafito.
- MOTOR ELECTRICO: las bombas están acopladas directamente a un motor eléctrico expresamente dimensionado, de tipo asíncrono con elevado rendimiento, silencioso, cerrado, con ventilación externa, apto para servicio continuo. AISLAMIENTO clase F

- El protector térmico (salva motor) está incorporado en los motores monofásicos.
- Los motores trifásicos deben estar protegidos con un salva motor exterior adecuado, por lo que se prevé una conexión conforme a las normas vigentes.
- EJECUCION Y NORMAS DE SEGURIDAD según EN60 335-1 (IEC 335-1, CEI 61-150) EN 60034-1 -(IEC 34-1,

### **Mangueras para la circulación de agua:**

Se usarán mangueras corrientes ya que no se maneja mayor temperatura, se tendrá 4 secciones de mangueras las mismas que son las siguientes:

- Salida de la bomba a la entrada del intercambiador de calor aire-agua
- Salida del Intercambiador de calor aire-agua a la entrada del condensador efluente liviano
- Salida del condensador de fluente liviano a la entrada del condensador de efluente pesado
- Salida del condensador de efluente pesado a la entrada del tanque de almacenamiento
- Salida del tanque de almacenamiento a la entrada de la bomba.

Se deberá tener en cuenta la presión que existe debido a la bomba y para eso se instalarán acoples hidráulicos para la entrada de los condensadores y abrazaderas para los radiadores.



Figura 3.18 Acoples hidráulicos<sup>57</sup>

En el caso de este sistema calcularemos el intercambio de calor en el sistema de flujo cruzado aire agua ya que el resto del sistema está incluido en el diseño de los condensadores para los efluentes.

### 3.3.3 Selección del tanque de reserva del efluente recuperado

Para la selección del tanque de reserva tenemos en cuenta que:

- El fluido a almacenar es un hidrocarburo
- Es inflamable
- Presenta un alto grado de volatilidad
- Puede traer complicaciones a la salud si este es inhalado o manipulado sin el equipo necesario.
- El hidrocarburo debe ser almacenado por algún tiempo hasta su utilización, el recipiente debe tener la capacidad de no sufrir daños por tener en su interior este hidrocarburo
- El recipiente debe ser hermético
- Debe tener la capacidad necesaria al menos de almacenar la producción realizada por un día de trabajo.

---

<sup>57</sup> <http://www.gr-industrial.com>

Para la recolección del hidrocarburo limpio, se utilizarán tanques con capacidad de 5 Glns cada una, la misma que tendrá su respectiva tapa hermética para evitar que el hidrocarburo se evapore al ambiente.

Una vez lleno el tanque con capacidad de 5Glns, el efluente se lo lleva a los tanques de almacenamiento de AV.CORP, su capacidad es de 55 Glns y cumplen con todos los requerimientos necesarios para almacenar hidrocarburos.

### 3.3.4 Selección del sistema de alimentación de gas propano para el calentador de efluentes.

Para el sistema se alimentación se contará con un cilindro de gas propano-butano industrial.

Se realizará un conducto de gas que llegará hacia los conductos de calentamiento situados debajo del calentador.

El esquema de este sistema será de la siguiente manera:

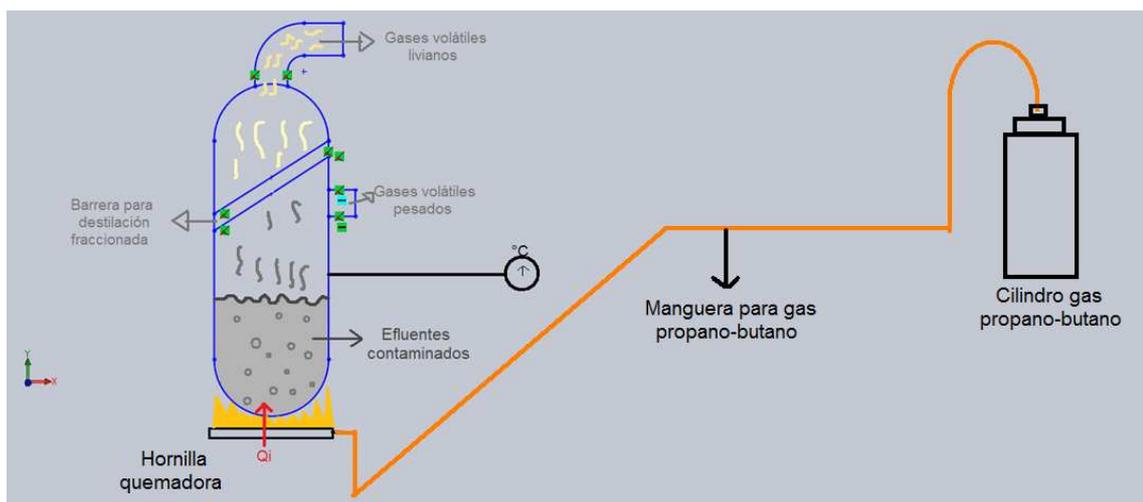


Figura 3.19 Esquema sistema de alimentación de gas<sup>58</sup>

<sup>58</sup> Esquema realizado por el autor

Para la selección de la manguera debemos considerar los siguientes factores:

- La manguera contará con 4mts de longitud.
- El diámetro será de ¼”.
- Deberá ser resistente al paso del gas
- Debe ser hermética
- Debe tener la posibilidad de flexionarse.

Esta es la solución más adecuada:

Referencia #	ta- pul- DN maño mm gada				mm	Máx. presión de trabajo MPa / psi		Mín. presión de rotura MPa / psi		Mín. radio de curvatura mm	Peso kg/m	Ra- cores
2370N-04V10-P	6	-04	6,3	1/4	12,4	46,5	6.745	186,0	26.970	70	0,19	NX
2370N-05V10-P	8	-05	8,2	5/16	14,3	35,0	5.080	140,0	20.300	100	0,25	NX
2370N-06V10-P	10	-06	9,7	3/8	16,4	33,0	4.790	132,0	19.140	120	0,33	NX
2370N-08V10-P	12	-08	12,8	1/2	19,6	27,5	3.990	110,0	15.950	150	0,42	NX
2370H-08V10-P	12	-08	12,8	1/2	19,6	27,5	3.990	110,0	15.950	150	0,42	NX

Tabla 3.7 Características de la manguera seleccionada<sup>59</sup>

### Materiales de la manguera:

#### Tubo interno:

- Poliamida, alternativa DN12
- Elastómero de poliéster

#### Refuerzo:

- Doble capa en espiral de alambre de alta resistencia
- Doble espiral abierta de fibra sintética

<sup>59</sup> www.polydrop.com

### **Cubierta:**

- Poliuretano, negra, picada.

### **Hornillas**

Para la selección de las hornillas se consultó con toda la oferta disponible en el mercado. Se encontró una que se adaptará a la forma del calentador de tal manera que el calor se pueda suministrar sea de la manera más uniforme posible.



**Figura 3.20** Hornilla seleccionada para el proceso de calentamiento<sup>60</sup>

Su disposición permite acoplar este dispositivo al calentador por esta razón es conveniente el usar este producto.

---

<sup>60</sup> [www.lavacatuerta.com](http://www.lavacatuerta.com)

# CAPÍTULO 4 CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA

## 4.1 Calentador

### 4.4.1 Proceso de construcción

Para las paredes del calentador utilizaremos el acero SA-516, las dimensiones serán las siguientes:

- diámetro exterior de 26 inches
- espesor de  $\frac{1}{2}$ " inches.
- Largo= 66 inches

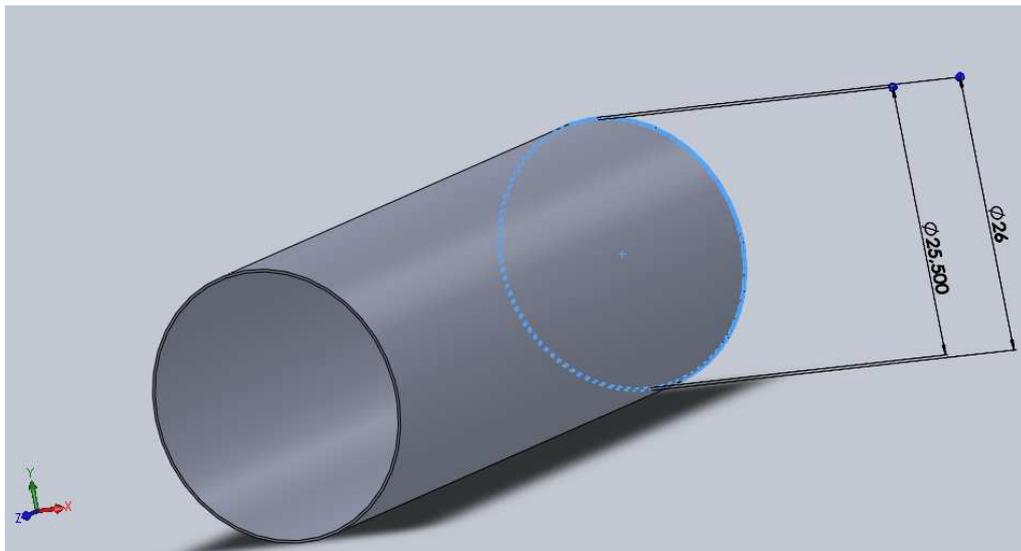


Figura 4.1 Dimensiones paredes del calentador<sup>61</sup>

Se realizaron los siguientes procesos:

- Barolado del material, proceso realizado en taller metalmeccánico del sector.
- Corte, se realizó 3 agujeros en el calentador para colocar instrumentos de medición de presión y temperatura

---

<sup>61</sup> Realizado por el autor.

- Soldadura, para que el calentador tenga su propiedad de ser hermético se lo sometió a un estricto control en la calidad de la soldadura, se realizó una costura en los extremos del material previamente barolado, el tipo de soldadura utilizado fue el proceso SMAW, el electrodo utilizado para la base fue E6011, para el relleno fue de E6011 Y para el acabado fue de E6018.

Se soldó una pequeña sección en los 3 agujeros realizados en el anterior proceso para colocar los instrumentos de medición.

Se soldó en el extremo superior una plancha que previamente fue cortada para que en ella repose la cabeza elíptica diseñada para el calentador.

Se soldó otra en el extremo inferior una plancha del mismo material con las mismas características en las paredes del tanque.

Se soldó el tanque con la base que a su vez aloja a la hornilla para el calentamiento del tanque.

- Limpieza, tras el proceso de soldadura, quedan algunas rebabas de material de aporte, estas son retiradas con la ayuda de una amoladora y cepillos de acero.
- Proceso de pintura, se preparó el calentador para este proceso con diluyentes y removedores de óxido, tras dejar toda la superficie limpia se procedió al proceso de pintado realizado en la cámara de pintura de la empresa.
- Instalación de los instrumentos de medición, en los tres agujeros se colocaron, 2 termómetros y un manómetro de presión.

El primer termómetro nos da a conocer la temperatura a la que se encuentra el efluente

El segundo termómetro nos da a conocer la temperatura a la que se encuentra el efluente sobrecalentado.

El tercer manómetro nos da a conocer la presión que existe en el interior del tanque.



Figura 4.2 cordón de soldadura realizado en la pared del calentador<sup>62</sup>



Figura 4.3 Cámara de calentamiento<sup>63</sup>

---

<sup>62</sup> Cámara digital

<sup>63</sup>



Figura 4.4 Calentador



Figura 4.5 Termómetro



Figura 4.6 Manómetro<sup>64</sup>

---

<sup>64</sup> Cámara digital



**Figura 4. 7 Brida para mantenimiento**

Dentro de este sistema también se soldó la tubería desde las tapas del tanque al condensador de efluente



**Figura 4. 8 Trabajos en la cabeza del calentador<sup>65</sup>**

---

<sup>65</sup> Cámara digital



Figura 4. 9 Soldadura sección para la instalación de manómetro<sup>66</sup>

#### 4.4.2 Instalación del calentador

Terminada la construcción del calentador:

- Se soldó su base a la plancha en donde se colocará todo el equipo de destilación.
- Se colocó el empaque en la cabeza del calentador.
- Se colocaron los empaques en las bridas.

---

<sup>66</sup> Cámara digital



**Figura 4.10 Soldadura de la base del calentador a la base de todo el equipo de destilación<sup>67</sup>**



**Figura 4.11 Instalación de las tapas para las bridas en el calentador**

---

<sup>67</sup> Cámara digital



**Figura 4. 12 Brida para ingreso de efluentes contaminados<sup>68</sup>**



**Figura 4.13 Calentador con todos los equipos instalados**

---

<sup>68</sup> Cámara digital

#### 4.4.3 Instalación de los sistemas de medición

Para instalar los equipos de medición soldamos tramos de tubería de ½ inches, para insertar dos termómetros los cuales nos van a indicar el valor de la temperatura del efluente cuando se encuentra en estado líquido y el valor de la temperatura del efluente en estado gaseoso.

El calentador también tiene dos manómetros de presión ubicados en la parte superior del calentador en la sección del gas y otro en la cabeza elipsoidal.

Por razones de seguridad también se instaló una válvula de emergencia la misma que será activada pasadas las 10 PSI, esta únicamente se activará en casos de emergencia y su funcionamiento es independiente del control de un operador.



Figura 4. 14 Instalación del manómetro en el calentador

#### **4.4.4 Control de calidad en la manufactura e instalación del equipo**

Para verificar posibles fugas en el calentador, se lo llenó de agua hasta el tope, se examinó cuidadosamente el cordón de soldadura del calentador.

Se verificó que no existiesen fugas de agua en los pequeños ductos para la instalación de los manómetros.

Antes de la instalación de los empaques se verificó su estado y que su geometría esté acorde a la superficie a sellar.

Para garantizar una correcta operatividad del calentador se verificó que la base se encuentre nivelada con relación a la base.

La estabilidad del calentador es un factor muy importante a considerar, una vez terminados todos los procesos anteriores descritos se lo sometió a cargas laterales, la base otorga al calentador estabilidad para el trabajo, sin embargo para asegurarnos de esta estabilidad procedimos a realizar un cordón de soldadura de la base del calentador a la base del todo el sistema.

Luego de la instalación de los empaques y las tapas de las bridas en el calentador se verificó el correcto ajuste de los pernos para garantizar que los gases sometidos a presión no tengan puntos de fuga por las bridas.

De igual manera se aseguró la correcta presión de los pernos en la cabeza elíptica y su hermeticidad otorgada por el empaque.

Se verificó el correcto funcionamiento de los equipos de medición en el calentador.

## 4.2 Sistema de Condensación del efluente

### 4.2.1 Proceso de construcción

El sistema de destilación fraccionada del hidrocarburo genera dos tipos de vapor, los livianos y pesados, los mismos que se condensan de manera separada, es por ésta razón que se procedió a la construcción de dos intercambiadores de calor que tengan las mismas características.

Se realizaron los siguientes procesos:

- Se seleccionó del mercado una tubería con el diámetro y el espesor calculado, el material, acero SA-516.
- Se adquirió tubería de cobre con un diámetro de ½" y un largo de 10 m
- En el torno se procedió al doblado de la tubería para conseguir los pasos descritos en el diseño.
- Se soldó la tubería de cobre con la tubería de salida del intercambiador, y la misma a su vez con la coraza del intercambiador de calor.
- Se instalaron válvulas para la entrada y salida del hidrocarburo sobrecalentado.
- Se realizó un corte en la coraza con el fin de instalar un termómetro a fin de conocer la temperatura que tiene el agua.
- Se limpió todo el sistema con diluyentes y antioxidantes, más la ayuda de lijas.
- Una vez limpia la superficie se realizó el proceso de pintado en la cámara.

#### 4.2.2 Instalación de la tubería para el gas hidrocarburo

La tubería utilizada para este fin fue construida de acero, la misma que conecta la cabeza elipsoidal con el condensador en el caso del efluente liviano y la brida con el condensador de efluente pesado.

Se instaló válvulas de apertura y cierre del paso de gas en la entrada de cada condensador



Figura 4. 15 Cabeza hemisférica y conexión con el condensador de efluentes livianos<sup>69</sup>

---

<sup>69</sup> Cámara digital



Figura 4. 16 Condensador de efluentes pesados, válvula de paso de gas<sup>70</sup>

### 4.2.3 Instalación de los condensadores

Para colocar los tanques condensadores fue necesario construir una estructura a base de tubo cuadrado de acero A32.

Los condensadores fueron sujetos mediante abrazaderas a la base quedando su disposición de la siguiente manera:

---

<sup>70</sup> Cámara digital



Figura 4. 17 Condensadores junto a todos sus elementos<sup>71</sup>

---

<sup>71</sup> Cámara digital



**Figura 4. 18 Válvula de paso del condensado<sup>72</sup>**

Se instaló válvulas para la apertura y cierre del paso del condensado para de esta manera controlar el flujo cada vez que se necesite detener el proceso.

Cada condensador cuenta con dos válvulas la misma que se las encuentra tanto a la entrada como a la salida del mismo.

Tenemos también manómetros en la coraza del condensador para conocer la presión del líquido enfriante, de esta manera nos aseguramos que el líquido no tiene ninguna obstrucción.

---

<sup>72</sup> Cámara digital



**Figura 4. 19 Manómetro para medir la presión de agua en el condensador de efluentes livianos<sup>73</sup>**

#### **4.2.4 Control de calidad en los condensadores**

Se analizó cuidadosamente el área de soldadura a fin de evitar posibles fugas, se realizó un proceso de ensayo no destructivo mediante el método de líquido penetrante, el mismo que fue favorable.

En la coraza de igual manera se realizó una inspección en los cordones de soldadura, tanto en las cúpulas laterales como en la tubería de entrada y salida del gas a condensar.

---

<sup>73</sup> Cámara digital

Se revisó los manómetros, válvulas mediante una prueba con agua para comprobar su funcionamiento.

Se sometió a cargas laterales para comprobar la estabilidad de la estructura que soporta los condensadores, la misma que fue favorable.

### **4.3 Sistema de enfriamiento para el agua**

#### **4.3.1 Elementos que forman el sistema**

El sistema de enfriamiento para el agua consta de los siguientes elementos:

- Tanque de reserva para la recirculación del agua
- Bomba eléctrica para la recirculación del agua
- Mangueras de ½" para la recirculación de agua en el sistema
- Acoples para mangueras
- Intercambiador de calor por convección de flujo cruzado aire-agua

El tanque de reserva de agua se colocará en la parte frontal derecha tras el cilindro de gas industrial.

En la parte posterior a este elemento se instalará la bomba eléctrica para conducir el agua por todo el sistema.

A la salida de la bomba, mediante una manguera para agua se conducirá el líquido al intercambiador de calor de flujo cruzado, el agua se enfriará y reingresará para el proceso de condensación del hidrocarburo que saldrá del calentador, el líquido circulará por los dos intercambiadores de calor y regresará al tanque de reserva.

El intercambiador de calor de flujo cruzado para agua contará con un deflector el mismo que multiplicará el flujo de aire que ingrese al intercambiador, eso a más de la eficiencia generada por las aletas nos garantizará un buen proceso de enfriamiento del agua que será la encargada de generar el proceso de condensación del hidrocarburo gasificado.

#### 4.3.2 Instalación del intercambiador de calor aire-agua

Se colocó el deflector junto al intercambiador, sujetados mediante 4 pernos de 5/8 inches en cada esquina.

Se instaló este intercambiador en la misma estructura diseñada para los condensadores, sujetados mediante 4 pernos de 5/8 inches.



Figura 4.20 Deflector para intercambiador aire-agua<sup>74</sup>

---

<sup>74</sup> Cámara digital



Figura 4.21 Intercambiador aire-agua<sup>75</sup>

### 4.3.3 Instalación del tanque de reserva para el agua

Para el tanque de reserva de igual manera se construyó una base y se lo sujetó mediante abrazaderas.

La capacidad de este elemento es de 40 Glns suficiente para soportar toda la cantidad alojada en los dos condensadores más el intercambiador de calor aire-agua.

---

<sup>75</sup> Cámara digital



Figura 4.22 Tanque de reserva de agua<sup>76</sup>



Figura 4.23 tanque de reserva de agua<sup>77</sup>

---

<sup>76</sup> Cámara digital

<sup>77</sup> Cámara digital

#### 4.3.4 Instalación de la bomba eléctrica

La bomba de agua fue colocada junto al tanque de reserva, este dispositivo fue empernado junto a la base para evitar cualquier caída al momento de su funcionamiento.



Figura 4.24 Bomba eléctrica Pedrollo<sup>78</sup>

---

<sup>78</sup> Cámara digital

#### 4.3.5 Instalación del sistema eléctrico

Se instaló una caja de instrumentos, dentro de la misma constan los interruptores de accionamiento tanto de la bomba eléctrica como del deflector, esta caja se la colocó en una esquina de todo el sistema otorgando la facilidad de ser utilizada por el operador.

Todo el cableado eléctrico se lo dispuso por debajo de la base del sistema para que no esté en contacto directo con fuego o altas temperaturas.



Figura 4.25 Panel de control de la bomba y deflector<sup>79</sup>

---

<sup>79</sup> Cámara digital



Figura 4.26 Panel de control de la bomba y deflector<sup>80</sup>

#### 4.3.6 Instalación de las mangueras para circular el agua

Se utilizo para este fin manguera de ½ inches, las mismas que conectan todo el sistema de enfriamiento, cada manguera cuenta con los acoples para ser roscados a la bomba, tanque de reserva, condensadores, intercambiadores de calor.



Figura 4.27 Mangueras para el circuito hidráulico<sup>81</sup>

---

<sup>80</sup> Cámara digital



**Figura 4.28 Mangueras para el circuito hidráulico<sup>82</sup>**



**Figura 4.29 Mangueras de alta presión a la entrada y salida del intercambiador de calor<sup>83</sup>**

Tenemos dos mangueras especiales las mismas que son usadas para la recolección del hidrocarburo condensado, las mismas son de caucho especial el mismo que soporta la alta volatilidad del hidrocarburo.

---

<sup>81</sup> Cámara digital

<sup>82</sup> Cámara digital

<sup>83</sup> Cámara digital



Figura 4.30 Mangueras que transportan el hidrocarburo desde los condensadores a los tanques de recolección<sup>84</sup>

#### 4.3.7 Control de calidad en el sistema de enfriamiento

- Se introdujo 40 Gln en el tanque de reserva de agua, el mismo está en la capacidad de almacenar esta cantidad.
- Se encendió la bomba, la misma tiene la fuerza necesaria para darnos el caudal necesario para el intercambio.
- Se comprobó que no existiesen fugas de agua en las mangueras ni en los acoples.

---

<sup>84</sup> Cámara digital

- Se comprobó que no existiesen fugas en las purgas que se encuentran a la entrada de cada condensador.
- Se realizó una prueba con todo el sistema trabajando el mismo que fue favorable.

## **4.4 Sistema de alimentación de propano para el calentador**

### **4.4.1 Elementos que forman el sistema**

El sistema de alimentación cuenta con los siguientes elementos:

- Una manguera para uso de gas de una longitud de 4mts, con un diámetro de ¼”.
- Hornillas para calentar el efluente
- Cilindro industrial de gas
- Válvula de paso de gas a la salida del cilindro
- Válvula de seguridad de paso de gas a la entrada de las hornillas.

### **4.4.2 Instalación del cilindro para el gas propano**

El cilindro de gas industrial será ubicado en la parte frontal derecha de todo el sistema, su ubicación responde a normas de seguridad, el cilindro se encontrará lo más lejos posible del calentador por razones de alta temperatura y presión que éste elemento maneja.

Al momento de su funcionamiento se lo colocará en una pequeña cámara construida para este elemento junto a sujetadores para evitar una posible caída de este elemento.

#### **4.4.3 Instalación de las mangueras para el gas**

La manguera conductora del gas será llevada bajo la plataforma en donde se encuentra el sistema hasta llegar a la válvula de seguridad que se encuentra ubicada antes de las hornillas quemadoras.

#### **4.4.4 Instalación de la válvula de seguridad**

La válvula de seguridad nos ayuda a reducir un riesgo de accidente por un paso involuntario de gas, éste elemento se encuentra instalado en la parte lateral del calentador, la misma que debe ser abierta y cerrada por el operador antes y después del trabajo a realizar.

#### **4.4.5 Instalación de las hornillas para el gas**

Las hornillas se instalaron en la parte hueca de la base del calentador, gracias a los cortes realizados en cada extremo de la circunferencia de la base, el aire podrá ingresar en esta pequeña cámara para la combustión del gas propano a fin de calentar el efluente ubicado en el interior del calentador.



Figura 4.31 Hornillas ubicadas bajo el calentador<sup>85</sup>

---

<sup>85</sup> Cámara digital

# CAPÍTULO 5 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO DE DESTILACIÓN DE EFLUENTES CONTAMINADOS

## 5.1 Parámetros de Funcionamiento

Para el correcto desempeño del equipo de destilación es necesario conocer algunos parámetros que cada sistema tiene específicamente por esta razón las vamos a tratar por separado.

### 5.1.1 Calentador

- Antes de proceder a cargar el efluente contaminado se deberá verificar que la tubería de descarga esté cerrada.
- Cargar cuidadosamente el efluente por la brida, una vez colocado, centrar el empaque y colocar los pernos. El ajuste se lo debe realizar en cruz.
- Al cargar siempre se puede derramar un poco de hidrocarburo por esta razón se deberá limpiar completamente la zona para evitar que el mismo se encienda por el calor.
- Cuando el calentador está trabajando, se debe tener mucho cuidado con la temperatura y presión de trabajo, el operador deberá calentar el calentador hasta llegar a la temperatura de diseño es decir de 65°C.
- La presión de trabajo un momento antes de destilar será de 5 Psi para conseguir la fuerza necesaria de empuje para conseguir el condensado del otro lado.

### **5.1.2 Condensadores**

- Al ser condensadores de tubo y coraza, debemos tener en cuenta la presión del agua vertida por la bomba, en el condensador superior tenemos una presión de 8Psi y en el inferior de 5Psi, estas presiones nos ayudan a controlar que el flujo de agua sea correcto ya que si la misma sube, quiere decir que hay algún punto en la que se esté obstruyendo el paso del agua, si ocurre lo contrario, quiere decir que existe una gran cantidad de aire en los condensadores y es necesario purgar.
- Para el proceso de destilación, se debe abrir las válvulas de salida del condensado hasta  $\frac{1}{4}$  de la apertura de la misma para tener siempre el sistema presurizado.
- Se deberá alternar siempre la destilación entre condensadores ya que si se abriese las dos válvulas al mismo tiempo, se perderá presión y el caudal de condensado disminuiría.

### **5.1.3 Sistema de enfriamiento**

#### **5.1.3.1 Tanque de reserva**

- El tanque deberá cargarse con 40 Glns de agua los mismos que deberán llenar los dos condensadores.
- Las válvulas de entrada y salida al tanque de reserva deben estar abiertas para conseguir la recirculación del agua.

### **5.1.1.1 Mangueras conductoras de agua**

- Se deberá constatar que las mismas no tengan obstrucciones debido a su mala colocación.
- Mediante las válvulas de purgado que se encuentran a la entrada de cada condensador, se deberá retirar la mayor cantidad de aire que circula junto con el agua, de esta manera la transferencia de calor resultará más efectiva.

### **5.1.1.2 Bomba eléctrica para el agua**

- Se deberá verificar que todo el circuito por donde circula el agua esté abierto, mediante el panel de control de la bomba, se deberá encender la misma, se tiene un controlador de flujo con el mismo que deberemos constatar que el fluido está circulando con normalidad.

### **5.1.1.3 Intercambiador de calor aire agua**

- El operador deberá verificar siempre la temperatura del agua, si la misma sobrepasa los 21°C deberá encender el deflector desde el panel de control, el tiempo de trabajo de este elemento dependerá hasta cuando consigamos disminuir la temperatura a los 18°C.

## **5.1.2 Sistema de calentamiento**

### **5.1.2.1 Tubería de gas**

- Antes de iniciar cualquier operación, se debe revisar que la tubería se encuentre en buen estado y correctamente colocada por los ductos que se encuentran por debajo de la base de todo el equipo

### **5.1.2.2 Válvula de gas**

- El operador debe verificar que la válvula se encuentre correctamente conectada al cilindro
- Se deberá abrir la misma hasta  $\frac{3}{4}$  de su abertura total por razones de seguridad
- Un instante antes de encender el calentador, abriremos la válvula para tener un flujo mínimo para encender las hornillas, luego de esto, podremos abrir la válvula hasta  $\frac{3}{4}$  de su abertura total.

## **5.2 Pruebas de funcionamiento**

Una vez terminado el proceso de instalación, se llevó a cabo las pruebas de funcionamiento, este proceso comenzó dejando reposar el tanque con efluente por un día para que por el fenómeno físico del peso específico de cada sustancia, el efluente más volátil se coloque en la parte superior del tanque mientras que los elementos como aceites, tierra, lodos, entre otros reposen sobre la base del tanque.



**Figura 5.1 Almacenamiento de residuos<sup>86</sup>**

- Terminado el proceso de reposo, se procede a colocar el efluente en el calentador con la ayuda de una bomba de manivela y una manguera.
- Una vez colocado el mismo se procede a cerrar la brida ajustando los pernos en forma de cruz para que la fuerza dada a los pernos sea la misma en cada perno.



**Figura 5.2 Ajuste brida entrada de residuos<sup>87</sup>**

---

<sup>86</sup> Cámara digital

- Se procede a calentar el efluente hasta conseguir la temperatura de diseño para el gas que es de 65°C



Figura 5.3 Temperatura del efluente líquido<sup>88</sup>

- Una vez que se tiene la temperatura y presión requerida, se deberá abrir las válvulas respectivas a cada condensador y obtener el hidrocarburo destilado.
- Este proceso se lo realizará periódicamente para evitar despresurizar el calentador.

---

<sup>87</sup> Cámara digital

<sup>88</sup> Cámara digital

- Es importante tener control sobre la temperatura del agua, si este elemento se encuentra sobre los 21°C, el operador deberá encender el deflector de aire, hasta que la temperatura disminuya a 19°C que es la recomendable para el trabajo.



Figura 5.4 Recolección hidrocarburo recuperado<sup>89</sup>

---

<sup>89</sup> Cámara digital

## Resultados de las pruebas realizadas con el equipo de destilación

Fecha: Jueves 20 de Junio del 2010  
 Hora de inicio: 11:40  
 Volumen de efluente: 45 Glns  
 Temperatura ambiente: 20°C

Temp. Líquido °C	Temp. Gas °C	Tiempo de calentamiento (min)	ΔT (min)	
22	20	0	0	
25	22	40	40	
30	24	48	8	
35	24	52	4	
40	25	59	7	
45	26	65	6	
50	27	70	5	
55	30	77	7	
60	40	84	7	
65	50	91	7	
70	65	95	4	
Duración total del calentamiento:		95		
Efluente ingresado Glns	Liviano	Pesado	Efluente que no se destilo	Porcentaje aprovechado
45	25	7	13	71,11

Tabla 5.1 Pruebas realizadas en el equipo<sup>90</sup>

<sup>90</sup> Realizado por el autor

Fecha: Martes 25 de Mayo del 2010

Hora de inicio: 10:00

Volumen de efluente: 40 Glns

Temperatura ambiente: 18°C

Temp. Líquido °C	Temp. Gas °C	Tiempo de calentamiento (min)	ΔT (min)	
20	19	0	0	
25	22	45	45	
30	24	52	7	
35	24	58	6	
40	25	66	8	
45	26	72	6	
50	27	79	7	
55	30	85	6	
60	40	90	5	
65	50	93	3	
70	65	96	3	
<b>Duración total del calentamiento:</b>		<b>96</b>		
Efluente ingresado Glns	Liviano	Pesado	Efluente que no se destilo	Porcentaje aprovechado
40	22	6	12	70,00

Tabla 5.2 Pruebas realizadas en el equipo<sup>91</sup>

<sup>91</sup> Realizado por el autor

Fecha: Miércoles 26 de Mayo del 2010  
 Hora de inicio: 9:00  
 Volumen de efluente: 60 Glns  
 Temperatura ambiente: 17 °C

Temp. Líquido °C	Temp. Gas °C	Tiempo de calentamiento (min)	ΔT (min)	
17	18	0	0	
25	22	45	45	
30	24	51	6	
35	24	58	7	
40	25	64	6	
45	26	70	6	
50	27	77	7	
55	30	84	7	
60	40	89	5	
65	50	93	4	
70	65	96	3	
<b>Duración total del calentamiento:</b>		<b>96</b>		
Efluente ingresado Glns	Liviano	Pesado	Efluente que no se destilo	Porcentaje aprovechado
60	30	9	21	65,00

Tabla 5.3 Pruebas realizadas en el equipo<sup>92</sup>

<sup>92</sup> Realizado por el autor

Fecha: Jueves 27 de Mayo del 2010  
 Hora de inicio: 10:00  
 Volumen de efluente: 55 Glns  
 Temperatura ambiente: 18 °C

Temp. Líquido °C	Temp. Gas °C	Tiempo de calentamiento (min)	ΔT (min)	
17	18	0	0	
25	22	45	45	
30	24	52	7	
35	24	59	7	
40	25	66	7	
45	26	72	6	
50	27	78	6	
55	30	83	5	
60	40	88	5	
65	50	92	4	
70	65	95	3	
<b>Duración total del calentamiento:</b>		<b>95</b>		
Efluente ingresado Glns	Liviano	Pesado	Efluente que no se destilo	Porcentaje aprovechado
55	30	9	16	70,91

Tabla 5.4 Pruebas realizadas en el equipo<sup>93</sup>

<sup>93</sup> Realizado por el autor

Fecha: Viernes 28 de Mayo del 2010  
 Hora de inicio: 10:00  
 Volumen de efluente: 55 Glns  
 Temperatura ambiente: 21°C

Temp. Líquido °C	Temp. Gas °C	Tiempo de calentamiento (min)	ΔT (min)
17	18	0	0
25	22	38	38
30	24	45	7
35	24	52	7
40	25	58	6
45	26	64	6
50	27	71	7
55	30	78	7
60	40	83	5
65	50	88	5
70	65	92	4

<b>Duración total del calentamiento:</b>		<b>92</b>		
Efluente ingresado Glns	Liviano	Pesado	Efluente que no se destilo	Porcentaje aprovechado
55	29	11	15	72,73

Tabla 5.5 Pruebas realizadas en el equipo<sup>94</sup>

<sup>94</sup> Realizado por el autor

Fecha: Sábado 29 de Mayo del 2010  
 Hora de inicio: 11:00  
 Volumen de efluente: 55 Glns  
 Temperatura ambiente: 23°C

Temp. Líquido °C	Temp. Gas °C	Tiempo de calentamiento (min)	ΔT (min)	
17	18	0	0	
25	22	37	37	
30	24	45	8	
35	24	52	7	
40	25	59	7	
45	26	66	7	
50	27	72	6	
55	30	77	5	
60	40	82	5	
65	50	86	4	
70	65	89	3	
<b>Duración total del calentamiento:</b>		<b>89</b>		
Efluente ingresado Glns	Liviano	Pesado	Efluente que no se destilo	Porcentaje aprovechado
55	31	7	17	69,09

Tabla 5.6 Pruebas realizadas en el equipo<sup>95</sup>

<sup>95</sup> Realizado por el autor

Fecha: Lunes 1 de Junio del 2010  
 Hora de inicio: 8:00  
 Volumen de efluente: 55 Glns  
 Temperatura ambiente: 19°C

Temp. Líquido °C	Temp. Gas °C	Tiempo de calentamiento (min)	ΔT (min)
17	18	0	0
25	22	40	40
30	24	47	7
35	24	53	6
40	25	60	7
45	26	67	7
50	27	73	6
55	30	79	6
60	40	85	6
65	50	89	4
70	65	91	2

<b>Duración total del calentamiento:</b>		<b>91</b>		
Efluente ingresado Glns	Liviano	Pesado	Efluente que no se destilo	Porcentaje aprovechado
55	31	7	17	69,09

Tabla 5.7 Pruebas realizadas en el equipo<sup>96</sup>

<sup>96</sup> Realizado por el autor

Fecha: Martes 2 de Junio del 2010  
 Hora de inicio: 10:00  
 Volumen de efluente: 55 Glns  
 Temperatura ambiente: 22°C

Temp. Líquido °C	Temp. Gas °C	Tiempo de calentamiento (min)	ΔT (min)
17	18	0	0
25	22	38	38
30	24	45	7
35	24	51	6
40	25	58	7
45	26	65	7
50	27	71	6
55	30	77	6
60	40	83	6
65	50	87	4
70	65	90	3

**Duración total del calentamiento:**

**90**

Efluente ingresado Glns	Liviano	Pesado	Efluente que no se destilo	Porcentaje aprovechado
55	30	8	17	69,09

Tabla 5.8 Pruebas realizadas en el equipo<sup>97</sup>

<sup>97</sup> Realizado por el autor

Fecha: Miércoles 3 de Junio del 2010

Hora de inicio: 9:30

Volumen de efluente: 55 Glns

Temperatura ambiente: 22°C

Temp. Líquido °C	Temp. Gas °C	Tiempo de calentamiento (min)	ΔT (min)	
17	18	0	0	
25	22	37	37	
30	24	44	7	
35	24	51	7	
40	25	58	7	
45	26	64	6	
50	27	70	6	
55	30	75	5	
60	40	80	5	
65	50	84	4	
70	65	87	3	
<b>Duración total del calentamiento:</b>		<b>87</b>		
Efluente ingresado Glns	Liviano	Pesado	Efluente que no se destilo	Porcentaje aprovechado
55	31	7	17	69,09

Tabla 5.9 Pruebas realizadas en el equipo<sup>98</sup>

<sup>98</sup> Realizado por el autor

Fecha: Jueves 4 de Junio del 2010  
 Hora de inicio: 8:00  
 Volumen de efluente: 40 Glns  
 Temperatura ambiente: 18°C

Temp. Líquido °C	Temp. Gas °C	Tiempo de calentamiento (min)	ΔT (min)	
20	19	0	0	
25	22	46	46	
30	24	53	7	
35	24	59	6	
40	25	66	7	
45	26	73	7	
50	27	78	5	
55	30	86	8	
60	40	91	5	
65	50	94	3	
70	65	97	3	
<b>Duración total del calentamiento:</b>		<b>97</b>		
Efluente ingresado Glns	Liviano	Pesado	Efluente que no se destilo	Porcentaje aprovechado
55	30	9	16	70,91

Tabla 5.10 Pruebas realizadas en el equipo<sup>99</sup>

<sup>99</sup> Realizado por el autor

Los resultados en base a tiempo de calentamiento vs temperatura son los siguientes:

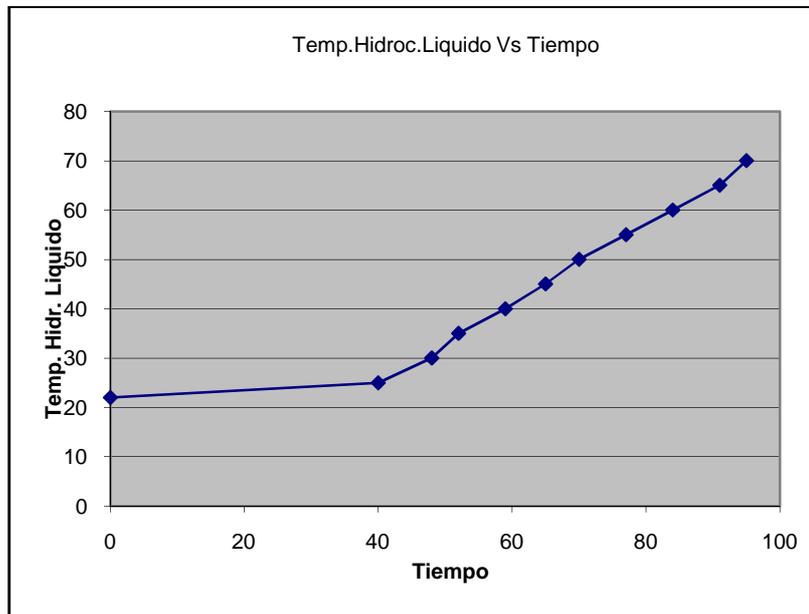


Figura 5.5 Gráfica comportamiento del hidrocarburo líquido en el proceso de calentamiento

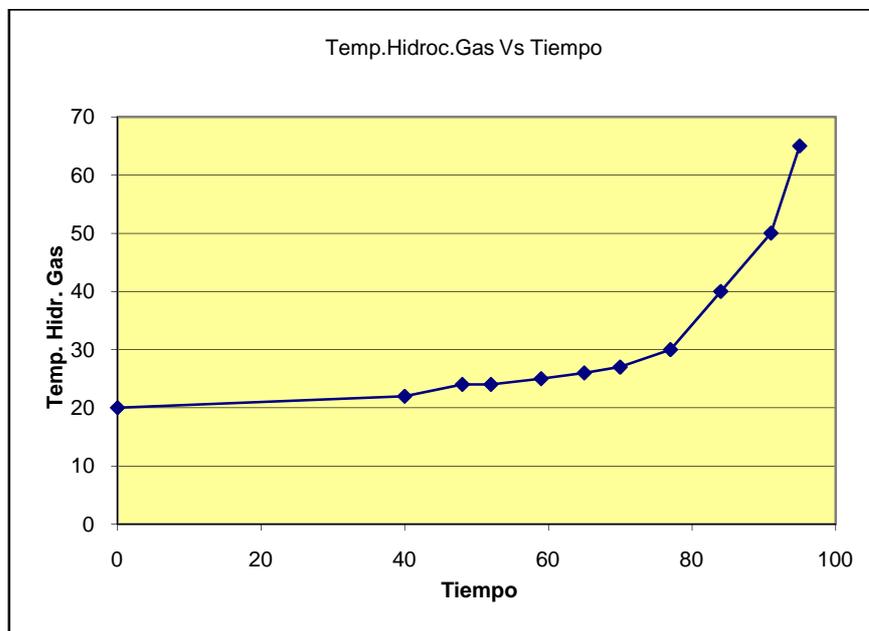


Figura 5.6 Gráfica comportamiento del hidrocarburo (gas) en el proceso de calentamiento<sup>100</sup>

<sup>100</sup> Realizado por el autor

Porcentajes promedio del comportamiento de los solventes en las pruebas realizadas.

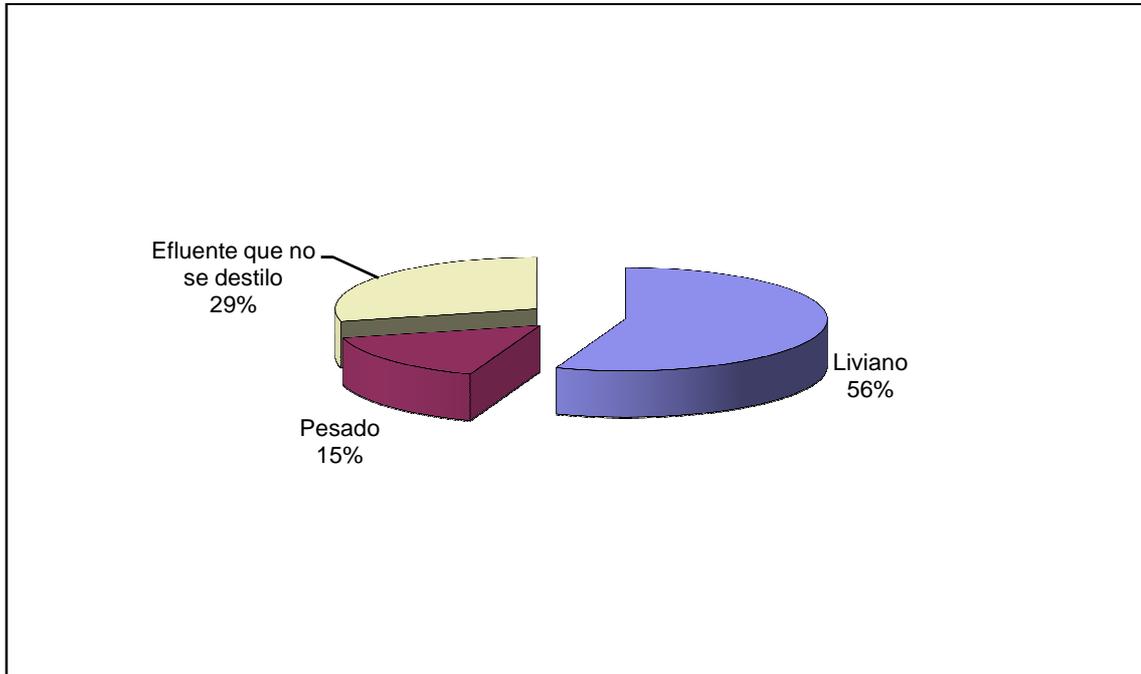


Figura 5.7 Porcentajes de recuperación de hidrocarburo<sup>101</sup>

Con muestras del hidrocarburo obtenido se ha realizado un análisis físico químico el mismo que permite comparar el thinner recuperado con el thinner comercial en la tabla 5.11 a continuación:

Propiedades Físico-Químicas	(Thinner comercial)	Efluente recuperado liviano	Efluente recuperado pesado
<b>Color</b>	Líquido incoloro	Líquido incoloro	Ligera coloración amarillenta
<b>Olor</b>	Olor fuerte característico	Olor fuerte característico	Olor fuerte característico

<sup>101</sup> Realizado por el autor

<b>Solubilidad en agua</b>	Insoluble	Insoluble	Insoluble
<b>Temp. Ebullición °C</b>	66-113	65	65
<b>Densidad relativa</b>	0.77-0.83	0.75	0.85
<b>Porcentaje de volatilidad por volumen</b>	100	94	85
<b>Presión vapor</b>	9 %	9%	8%

**Tabla 5.11 Análisis físico-químico realizado a los hidrocarburos recuperados<sup>102</sup>**

Una vez terminado el proceso de recuperación del efluente, se lo podrá reinsertar en el proceso de lavado de tanques de la empresa.



**Figura 5.8 efluente recuperado entregado a los empleados de AV.Corp**

---

<sup>102</sup> <sup>102</sup> Realizado por el autor



**Figura 5.9** Proceso de limpieza de tanques en AV.Corp



**Figura 5.10** Limpieza de tanques en AV.Corp<sup>103</sup>

- Es de importancia también citar que el producto obtenido del efluente liviano sirvió también para reinsertarlo en el proceso de pintado gracias a su pureza y características adecuadas como catalizador de pinturas.

---

<sup>103</sup> Cámara digital



**Figura 5.11 Hidrocarburo recuperado usado en el proceso de limpieza de tanques en AV.Corp<sup>104</sup>**

### **5.3 Análisis de resultados**

- El proceso de destilación fraccionada fue exitoso, gracias al diseño realizado en el calentador, tenemos un buen volumen de líquido y gas, esto permite que el líquido cambie de estado libremente a la temperatura de diseño, dándonos un flujo constante de condensado.
- Se comprobó que a la temperatura de 50°C el efluente cambia de estado, es por esta razón que a partir de esa temperatura, el área en donde se encuentra el gas en el calentador presenta un aumento de temperatura rápido en relación al aumento de temperatura cuando el efluente tiene menos de 50°C.

---

<sup>104</sup> Cámara digital

- Es prudente cerrar las válvulas de paso de gas a los condensadores cada media hora por un lapso de 10 minutos a fin de que el calentador vuelva a ganar presión.
- Gracias al intercambio de calor que otorga el condensador de tubo y coraza, todo el gas que ingresa es transformado en líquido para su recolección.
- El sistema de Enfriamiento del agua trabaja a la perfección, la disposición que presenta este intercambiador ayuda mucho al intercambio de calor, más la eficiencia que otorga el sistema aleateado.
- En el caso del condensador para el gas efluente liviano, el hidrocarburo recogido presenta similares características a las del thinner, se obtuvo el mismo color, densidad y principalmente el de ser un buen diluyente, por estas razones podemos afirmar que este producto puede ser utilizado como solvente.
- Es importante exponer que el thinner utilizado fue probado para el proceso de pintado de tanques con resultados favorables lo que corrobora su pureza y características naturales del solvente concerniente a la aplicación de catalizar la pintura.
- Analizando el producto obtenido del intercambiador de efluente pesado, cabe decir que el mismo tiene mayor densidad que el thinner. Presenta leves contenidos de aceite, su coloración es cristalina amarillenta y al ser utilizado en el proceso de lavado, el mismo dio buenos resultados.
- Los materiales con los que consta el equipo fueron seleccionados de algunas alternativas, siendo los mismos los más adecuados para las exigencias que tienen al estar trabajando el equipo. Por este motivo, se realizará un mantenimiento predictivo cada 6 meses para alargar su vida útil y tener una buena confiabilidad a la hora de producción.

# **CAPÍTULO 6 ANÁLISIS ECONÓMICO FINANCIERO**

## **6.1 Introducción para el análisis**

Tras la realización del análisis económico financiero de este proyecto, demostraremos que la inversión realizada para la construcción del equipo de destilación para la empresa AV.Corp nos genera rentabilidad es decir, que la tasa Interna de Retorno (TIR) nos arroje valores superiores al rendimiento del dinero en el sistema financiero. Para cumplir con este propósito se analizará dos escenarios, el primero, el costo que tiene el thinner mensualmente versus el costo que genera el recuperar el thinner con la máquina destiladora, analizando estas dos posibilidades observaremos cuál de estas posibilidades es la más beneficiosa para la empresa.

## **6.2 Análisis de costos**

El proceso de lavado de tanques demanda de 220 Glns mensualmente de Thinner el mismo que es utilizado como insumo para el proceso de lavados de los tanques que se encuentran en la compañía, este valor representa mensualmente a la empresa el valor de 1500\$ incluyendo el valor del transporte.

Al conseguir recuperar el solvente gracias al equipo de destilación, el costo producido por la compra del solvente será sustituido por los costos que genera la recuperación del solvente, estos valores los analizaremos en el siguiente punto.

### 6.3 Análisis Financiero

Analizando el costo que genera la compra del thinner se ha generado la siguiente tabla informativa:

<b>COMPRA MENSUAL DE THINNER</b>	
<b>Precio x galón</b>	6,82
<b>Q de galones al mes</b>	220
<b>Costo total</b>	<b>1.500,40</b>

Tabla 6.1 Compra mensual de thinner<sup>105</sup>

Tras la construcción de equipo de destilación tenemos la tabla 6.2 Que nos indica la inversión realizada en este equipo:

<b><i>Equipo de destilación para efluentes</i></b>			
<b>Equipo</b>	<b>Cant</b>	<b>P.U</b>	<b>P.T</b>
Honorario tesista	3	700	2100
Calentador	1	1500	1500
Estructura para condensadores e intercambiador de calor aire-agua	1	300	300
Condensadores	2	700	1400
Tanque de almacenamiento para el agua	1	300	300
Tanque de almacenamiento hidrocarburos	2	50	100

<sup>105</sup> Realizado por el autor

<b>Bomba eléctrica</b>	1	75	75
<b>Int. Calor aire-agua</b>	1	600	600
<b>Mangueras neoplos, conexiones hidráulicas</b>	1	300	300
<b>Sistema eléctrico</b>	1	200	200
<b>TOTAL</b>			<b>6875</b>

Tabla 6.2 Inversión para la construcción del equipo de destilación<sup>106</sup>

El equipo de destilación genera costos mensuales, estos valores serán calculados para una producción mensual de 800 Glns, valor promedio de trabajo de este equipo.

La tabla 6.3 Muestra detalladamente los costos variables a continuación:

<b>Costos variables (USD x mes)</b>		
	<b>Total</b>	<b>Por galón</b>
<b>Reposición de desperdicio</b>	375,1	1,705
<b>Mantenimiento</b>	16,67	0,08
<b>Gas</b>	152,00	0,69
<b>Luz</b>	40,00	0,18
<b>Total (A)</b>	583,77	2,65

Tabla 6.3 Costos variables<sup>107</sup>

<sup>106</sup> Realizado por el autor

- Reposición de desperdicio.- El proceso de recuperación no es completo, es decir que por cada 100 Glns de efluente contaminado, se consigue recuperar 70 Glns. Por este motivo es necesario cada seis meses, comprar efluente limpio, el mismo que luego de ser usado en el proceso de lavado, estará a disposición para su recuperación.
- Mantenimiento.- El equipo será sometido a un mantenimiento preventivo en un período de 6 meses.

Tenemos también los costos fijos detallados a continuación en la tabla 6.4:

<b>Costos fijos (USD x mes)</b>	
<b>Sueldos</b>	307,20
<b>Depreciación</b>	57,29
<b>Total fijo (B)</b>	364,49

**Tabla 6.4 Costos fijos<sup>108</sup>**

<b>Costo total (A+B)</b>	<b>948,26</b>
--------------------------	---------------

**Tabla 6.5 Costo total<sup>109</sup>**

<sup>107</sup> Realizado por el autor

<sup>108</sup> Realizado por el autor

<sup>109</sup> Realizado por el autor

El costo total representa la sumatoria de los costos fijos más los costos variables.

Si el costo por la compra del solvente es de 1500\$ y el costo por la recuperación del mismo es de 948,26 podemos afirmar que el utilizar el equipo de destilación nos genera menores costos para obtener el Thinner.

Para entender de mejor manera el ahorro generado por la utilización del equipo de destilación, generaremos la figura 6.1 Que muestra los costos de producción versus la cantidad de galones.

<b>OPCIÓN 1 Compra del Thinner</b>					
<b>Costo unitario</b>	6,82	6,82	6,82	6,82	6,82
<b>Cantidad x mes</b>	100	200	220	300	400
<b>Costo total OP1</b>	<b>682,00</b>	<b>1.364,00</b>	<b>1.500,40</b>	<b>2.046,00</b>	<b>2.728,00</b>

Tabla 6.6 Costo por la compra del thinner<sup>110</sup>

<b>OPCIÓN 2 Recuperación del thinner</b>					
<b>Costo unitario</b>	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65
<b>Cantidad x mes</b>	100	200	220	300	400
<b>Costo variable</b>	265,35	530,70	583,77	796,05	1.061,39
<b>Costo fijo</b>	364,49	364,49	364,49	364,49	364,49
<b>Costo total OP2</b>	<b>629,84</b>	<b>895,19</b>	<b>948,26</b>	<b>1.160,54</b>	<b>1.425,89</b>

Tabla 6.7 Costo por la recuperación del thinner<sup>111</sup>

<sup>110</sup> Realizado por el autor

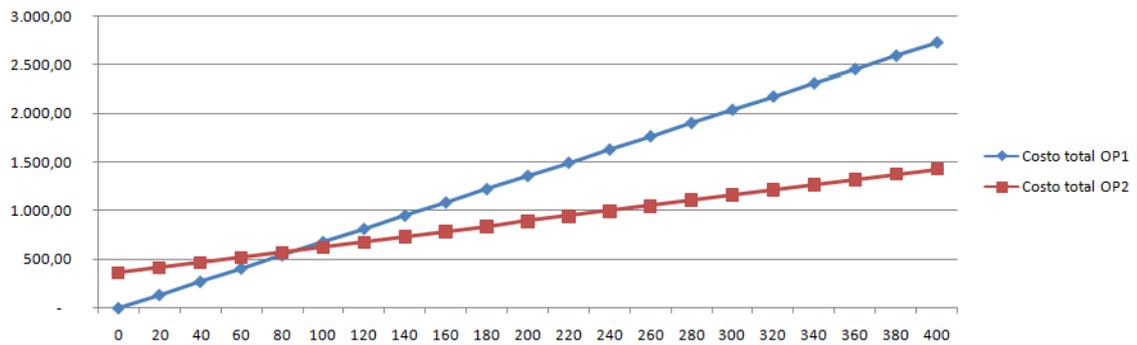


Figura 6.1 Costos por compra vs costos por recuperación<sup>112</sup>

Analizando la gráfica 6.1 Podemos decir que:

- |                                  |                                   |
|----------------------------------|-----------------------------------|
| Si se produce menos de 87.4 Glns | no es rentable el proceso         |
| Si se produce 87.4 Glns          | no se gana ni se pierde           |
| Si se produce más de 87.4 Glns   | es rentable recuperar el solvente |

<sup>111</sup> Realizado por el autor

<sup>112</sup> Realizado por el autor

La siguiente tabla mostrará el ahorro versus la cantidad de galones producidos.

Produciendo	Ahorro por mes	Ahorro por año
0	-364,49	-4.373,90)
20	-281,31	-3.375,74)
40	-198,13	-2.377,57)
60	-114,95	-1.379,41)
80	-31,77	-381,25)
100	51,41	616,92
120	134,59	1.615,08
140	217,77	2.613,25
160	300,95	3.611,41
180	384,13	4.609,57
200	467,31	5.607,74
220	550,49	6.605,90
240	633,67	7.604,06
260	716,85	8.602,23
280	800,03	9.600,39
300	883,21	10.598,55
320	966,39	11.596,72
340	1049,57	12.594,88

360	1132,75	13.593,05
380	1215,93	14.591,21
400	1299,11	15.589,37

**Tabla 6.8 Ahorro vs galones producidos<sup>113</sup>**

Si la cantidad promedio de galones recuperados es de 220 podemos realizar el siguiente cálculo para conocer en qué mes se recupera la inversión por la construcción del equipo de destilación:

<b>Inversión total</b>	<b>6.875,00</b>
<b>Cantidad x mes</b>	220,00
<b>Ahorro x mes</b>	550,49
<b>No. Meses rec.</b>	12,49

**Tabla 6.9 Número de meses necesarios para recuperar la inversión<sup>114</sup>**

Para evaluar los resultados económicos tras la implementación del equipo de destilación, se calcularon los índices financieros esperados Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR) del proyecto.

El Valor Actual Neto representa la sumatoria de los flujos futuros de efectivo descontados a una tasa determinada, nosotros la fijamos en el 15% que

<sup>113</sup> Realizado por el autor

<sup>114</sup> Realizado por el autor

actualmente es la tasa bancaria para financiamiento de capital de la empresa. Su cálculo se realizó mediante las Ec.5.1 y 5.2.

$$VAN = VAN_0 + VAN_1 + VAN_2 + \dots + VAN_n \quad \text{Ecuación 6.1}$$

$$VAN = \frac{FE_0}{(1+k)^0} + \frac{FE_1}{(1+k)^1} + \frac{FE_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{FE_n}{(1+k)^n} \quad \text{Ecuación 6.2}$$

Donde:

$VA_i \rightarrow$	Valor actual (flujo descontado)
$FE_i \rightarrow$	Flujo de efectivo neto
$k \rightarrow$	Tasa de descuento (costos de capital)
$n \rightarrow$	Período

Año	Ahorro x 200 Glns mensuales producidos
0	6.605,90
1	6.605,90
2	6.605,90
3	6.605,90
4	6.605,90
5	6.605,90

6	6.605,90
7	6.605,90
8	6.605,90
9	6.605,90
10	6.605,90

**Tabla 6.10 Ahorro anual para una proyección de 10 años<sup>115</sup>**

La Tasa Interna de Retorno representa la rentabilidad de los flujos invertidos en el proyecto con la finalidad de poder comparar sus resultados con otros proyectos u oportunidades de inversión de la empresa. Se calcula a partir de la ecuación 6.3:

$$VAN = 0 = \frac{FE_0}{(1 + TIR)^0} + \frac{FE_1}{(1 + TIR)^1} + \frac{FE_2}{(1 + TIR)^2} + \dots + \frac{FE_n}{(1 + TIR)^n} \quad \text{Ecuación 6.3}$$

Donde:

- $FE_i$  → Flujo de efectivo neto  
 $TIR$  → Tasa interna de rendimiento (rentabilidad)  
 $n$  → Período

<b>VAN</b>	<b>\$ 34.676,97</b>
<b>TIR</b>	<b>95.97%</b>

**Tabla 6.11 Valor del TIR y el VAN para este proyecto<sup>116</sup>**

<sup>115</sup> Realizado por el autor

<sup>116</sup> Realizado por el autor

La rentabilidad de este proyecto es alta lo que da la tranquilidad para trabajar con el equipo de destilación.

El proyecto reducirá cada año el valor de 6605,90\$ al reutilizar el solvente como conclusión de este análisis podemos afirmar que es viable y genera alta rentabilidad.

## CONCLUSIONES

- El proceso de recuperación de efluentes contaminados, en lugar de la compra de thinner; objetivo principal del presente proyecto de tesis, resulta altamente rentable según el análisis económico financiero realizado en el capítulo 6.
- El equipo de destilación planteado, generará para AV. Corp un ahorro de 550,49 USD, al producir 220 Gln mensuales que son utilizados para el proceso de limpieza de tanques contaminados. Por ende, los costos de producción en relación a los de compra, son menores.
- El recuperador de efluentes contaminados que se encuentra operando en AV.Corp, reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente. Por cada galón de efluente contaminado recuperado hemos dejado de producir 0.88 Kg de CO<sub>2</sub>, es decir, que en un año de recuperación de efluentes con el equipo, se dejará de originar 2.3 Toneladas de CO<sub>2</sub> al ambiente. Este, es un resultado sumamente favorable, ya que estos efluentes contaminados, eran anteriormente incinerados como método de eliminación.
- El proyecto, además de ser una solución económica que reduce costos, se convierte en una alternativa de reutilización de efluentes, catalogamos como basura. Gracias a éste sistema de recuperación, se disminuye el espacio destinado al almacenamiento de efluentes contaminados en bodega, lo cual, a su vez, reduce notablemente posibles accidentes que podrían contaminar el suelo y/o causar enfermedades en los operadores.

- Los materiales que han sido seleccionados para la construcción del sistema de recuperación planteado, se basan en los estándares de diseño planteados en el código ASME sección VIII. Esto garantiza, que el equipo trabajará sin inconvenientes durante el período aproximado de 10 años, realizando los mantenimientos pre establecidos en el manual de usuario.
- Cabe señalar, que parte de los materiales utilizados en la construcción del equipo son reutilizados, luego de darles tratamiento como limpieza de óxido, pintura, soldadura se consiguió adaptarlos para esta nueva utilidad.
- El condensador de tubo y coraza permite una alta transferencia de calor gracias a la adecuada área de contacto entre el fluido frío y el tubo por donde circula el gas hidrocarburo. Adicionalmente, se diseñó la tubería con pasos, y de un material con una excelente conductividad como el cobre.
- El caudal del agua que se encuentra circulando por todo el equipo es el adecuado ya que permite absorber el calor necesario para que el gas cambie de estado, sin una variación de temperatura mayor a 5 °C.
- Gracias a una presión de trabajo de 15 PSI, el caudal de agua que se obtiene en el agua es constante, por lo cual, se puede concluir que la bomba eléctrica para suministro de agua es la correcta para cumplir con la funcionalidad deseada.
- La transferencia de calor en el intercambiador aire - agua es eficiente, pues se consigue reducir la temperatura en un rango de 1 a 3 °C tras su paso por el intercambiador. Cabe resaltar, que es necesario el utilizar el

deflector para que de esta manera el flujo de aire pueda interactuar de mejor manera con el sistema aleteado del intercambiador de calor.

- El proceso de destilación fraccionada trabaja con éxito. Podemos observar mediante las pruebas detalladas en el Capítulo IV que el hidrocarburo recuperado en el condensador para efluentes livianos presenta menos cantidades de aceite que en el condensador de efluentes pesados. Los efluentes livianos presentan 90% de pureza mientras que los efluentes pesados presentan un 75% de pureza.
- El solvente recuperado será alojado en los tanques de 55 Glns que tiene AV.Corp y llevados a la sección de bodegaje de hidrocarburos.
- El calentador cuenta con una válvula de seguridad, la misma que se activará a los 10 PSI. Es importante trabajar con presiones bajas pues al tratarse de efluentes volátiles los mismos aumentan su peligrosidad proporcionalmente a la presión de trabajo.
- Para mejorar la eficiencia en el proceso de transferencia de calor en los condensadores, se instalaron purgas a la entrada de los mismos con el fin de desalojar las partículas de aire que se sitúan en el circuito de refrigeración.
- El equipo cuenta con controles de presión y temperatura, mismos que registran al efluente y al agua; con el fin que el operador tenga conocimiento del estado en el que se encuentra el proceso en todo momento.
- El diseño del equipo ha tenido en cuenta estándares ergonómicos y antropométricos, pues se valora la comodidad y correcta posición del

operador mientras vigila el proceso, a través de manómetros y demás equipos de control.

- Cumpliendo con parámetros de seguridad industrial, se concluye que todo trabajador debe operar el equipo de destilación contando con una vestimenta hecha a base de algodón para evitar que se inflame con facilidad. Es necesario el uso de botas de seguridad y guantes industriales.
- En el caso del equipo, se cuenta con un extintor y una manguera que se encuentra conectada con el sistema de enfriamiento. En casos de emergencia, por incendio, el operador podrá usar el agua destinada al enfriamiento para apagar la llama.

## RECOMENDACIONES

- Antes de comenzar cualquier operación en el calentador, el trabajador deberá usar todo el equipo de seguridad de manera obligatoria. El mismo que consta de botas de seguridad, guantes industriales, overol, casco y mascarilla.
- Todo operario que vaya a usar el equipo de destilación deberá leer el manual de instrucciones adjunto a este proyecto de tesis, para conocer el funcionamiento correcto de todo el equipo. En el caso de requerir información adicional se podrá recurrir al tesista o al Gerente de producción de AV.Corp.
- El operador deberá manipular el efluente contaminado con mucho cuidado, evitando cualquier derrame del mismo. De ser el caso, deberá limpiar toda la zona cuidadosamente, ya que este producto es altamente inflamable y podría causar accidentes graves.
- Antes de proceder con el calentamiento del equipo, el operador deberá depurar todo el circuito de enfriamiento mediante las válvulas de purga que se encuentran en la entrada de cada uno de los condensadores, para evitar partículas de aire en el circuito de enfriamiento.
- Se recomienda, verificar que el agua se encuentre circulando con normalidad mediante el visor dinámico con el que cuenta la bomba.
- Una vez ingresado el efluente contaminado en el calentador es recomendable situar correctamente el empaque de la brida de ingreso del efluente contaminado para evitar fugas. De igual manera, se deberá

torquear los pernos en forma de cruz para equilibrar la fuerza en todos los puntos.

- Para abrir y cerrar el circuito de gas, el operador deberá manipular primeramente la válvula que está sobre el cilindro. Posteriormente se abrirá la de válvula de seguridad para evitar accidentes por fugas del mismo.
- El operador debe estar controlando constantemente la temperatura, registrando los datos en la hoja de control desarrollada para este equipo. La temperatura en el efluente gaseoso no debe sobrepasar los 65°C, si se llega a esta temperatura, el operador deberá cerrar gradualmente la válvula de seguridad de paso de gas.
- La recuperación del efluente debe ser realizada una vez en cada proceso, es decir que si destilamos desde el condensador de efluentes livianos, no se deberá abrir al mismo tiempo la válvula para destilar los efluentes pesados, pues esto generaría una pérdida de presión y por otro lado, el operador no podría controlar ambos procesos al mismo tiempo con la atención requerida.
- Para finalizar, se recomienda realizar una limpieza del calentador cada semana para evitar que los residuos más pesados continúen en el calentador, caso contrario, se retrasaría el proceso de calentamiento de los otros efluentes que se ingresan por semana.

## **ANEXOS**

## **ANEXO A**

**PROPIEDADES TERMODINÁMICAS Y MECÁNICAS DE  
LOS ELEMENTOS UTILIZADOS PARA LA  
RECUPERACIÓN DE EFLUENTES CONTAMINADOS.**

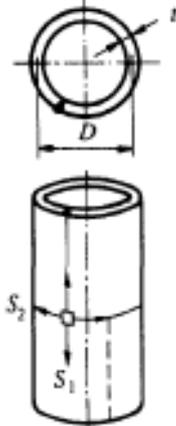
**NORMA UTILIZADA: CÓDIGO ASME SECCIÓN VIII – 1  
DISEÑO DE RECIPIENTES A PRESIÓN**

## Esfuerzos en tanques cilíndricos

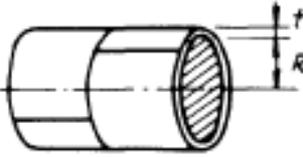
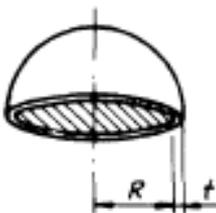
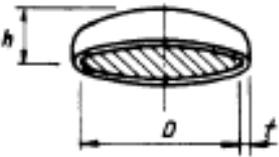
Uniform internal or external pressure induces in the longitudinal seam two times larger unit stress than in the circumferential seam because of the geometry of the cylinder.

A vessel under external pressure, when other forces (wind, earthquake, etc.) are not factors, must be designed to resist the circumferential buckling only. The Code provides the method of design to meet this requirement. When other loadings are present, these combined loadings may govern and heavier plate will be required than the plate which was satisfactory to resist the circumferential buckling only.

The compressive stress due to external pressure and tensile stress due to internal pressure shall be determined by the formulas:

	<b>FORMULAS</b>	
	<b>CIRCUMFERENTIAL JOINT</b>	<b>LONGITUDINAL JOINT</b>
	$S_1 = \frac{PD}{4t}$	$S_2 = \frac{PD}{2t}$
<b>NOTATION</b>		
<p><math>D</math> = Mean diameter of vessel, inches  <math>P</math> = Internal or external pressure, psi  <math>S_1</math> = Longitudinal stress, psi  <math>S_2</math> = Circumferential (hoop) stress, psi  <math>t</math> = Thickness of shell, corrosion allowance excluded, inches</p>		
<b>EXAMPLE</b>		
<p>Given <math>D = 96</math> inches  <math>P = 15</math> psi  <math>t = 0.25</math> inches</p>	$S_1 = \frac{PD}{4t} = \frac{15 \times 96}{4 \times 0.25} = 1440 \text{ psi}$ $S_2 = \frac{PD}{2t} = \frac{15 \times 96}{2 \times 0.25} = 2880 \text{ psi}$	
<p>For towers under internal pressure and wind load the critical height above which compressive stress governs can be approximated by the formula:</p>		
$H = \frac{PD}{32t} \quad \text{where } H = \text{Critical height of tower, ft.}$		

## Presión interna en recipientes a presión

NOTATION			
<p><math>P</math> = Design pressure or max. allowable working pressure psi</p> <p><math>S</math> = Stress value of material psi. page 189</p>	<p><math>E</math> = Joint efficiency, page 172</p> <p><math>R</math> = Inside radius, inches</p> <p><math>D</math> = Inside diameter, inches</p> <p><math>t</math> = Wall thickness, inches</p> <p><math>C.A.</math> = Corrosion allowance, inches</p>		
<p><b>A</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>CYLINDRICAL SHELL (LONG SEAM)<sup>1</sup></b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center; padding: 5px;"><math>t = \frac{PR}{SE - 0.6P}</math></td> <td style="width: 50%; text-align: center; padding: 5px;"><math>P = \frac{SEt}{R + 0.6t}</math></td> </tr> </table> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Usually the stress in the long seam is governing. See preceding page.</li> <li>2. When the wall thickness exceeds one half of the inside radius or <math>P</math> exceeds <math>0.385 SE</math>, the formulas given in the Code Appendix 1-2 shall be applied.</li> </ol>	$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$	$P = \frac{SEt}{R + 0.6t}$
$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$	$P = \frac{SEt}{R + 0.6t}$		
<p><b>B</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>SPHERE and HEMISPHERICAL HEAD</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center; padding: 5px;"><math>t = \frac{PR}{2SE - 0.2P}</math></td> <td style="width: 50%; text-align: center; padding: 5px;"><math>P = \frac{2SEt}{R + 0.2t}</math></td> </tr> </table> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. For heads without a straight flange, use the efficiency of the head to shell joint if it less than the efficiency of the seams in the head.</li> <li>2. When the wall thickness exceeds <math>0.356 R</math> or <math>P</math> exceeds <math>0.665 SE</math>, the formulas given in the Code Appendix 1-3, shall be applied.</li> </ol>	$t = \frac{PR}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{2SEt}{R + 0.2t}$
$t = \frac{PR}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{2SEt}{R + 0.2t}$		
<p><b>C</b></p>  <p style="margin-top: 10px;"><math>h = D/4</math></p>	<p style="text-align: center;"><b>2:1 ELLIPSOIDAL HEAD</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center; padding: 5px;"><math>t = \frac{PD}{2SE - 0.2P}</math></td> <td style="width: 50%; text-align: center; padding: 5px;"><math>P = \frac{2SEt}{D + 0.2t}</math></td> </tr> </table> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. For ellipsoidal heads, where the ratio of the major and minor axis is other than 2:1, see Code Appendix 1-4(c).</li> </ol>	$t = \frac{PD}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{2SEt}{D + 0.2t}$
$t = \frac{PD}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{2SEt}{D + 0.2t}$		

## Tipos de juntas soldadas

TYPES CODE UW-12		JOINT EFFICIENCY, E When the Joint:		
		a. Fully Radio- graphed	b. Spot Examined	c. Not Examined
1	 <p>Butt joints as attained by double-welding or by other means which will obtain the same quality of deposited weld metal on the inside and outside weld surface.</p> <p>Backing strip if used shall be removed after completion of weld.</p>	1.00	0.85	0.70
2	 <p>Single-welded butt joint with backing strip which remains in place after welding</p> <p><i>For circumferential joint only</i></p>	0.90	0.80	0.65
3	 <p>Single-welded butt joint without use of backing strip</p>	—	—	0.60
4	 <p>Double-full fillet lap joint</p>	—	—	0.55
5	 <p>Single-full fillet lap joint with plug welds</p>	—	—	0.50
6	 <p>Single full fillet lap joint without plug welds</p>	—	—	0.45

### Propiedades de algunos materiales

Specification		For Metal Temperature Not Exceeding Deg. F.										
Number	Grade	-20 400	500	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
SA-283	C	15.7	15.7	15.3	14.8	-	-	-	-	-	-	-
SA-285	C	15.7	15.7	15.3	14.8	14.3	13.0	10.8	8.7	5.9		
SA-515	60	17.1	17.1	16.4	15.8	15.3	13.0	10.8	8.7	5.9	4.0	2.5
SA-515	65	18.6	18.6	17.9	17.3	16.7	13.9	11.4	8.7	5.9	4.0	2.5
SA-515	70	20.0	20.0	19.4	18.8	18.1	14.8	12.0	9.3	6.7	4.0	2.5
SA-516	55	15.7	15.7	15.3	14.8	14.3	13.0	10.8	8.7	5.9	4.0	2.5
SA-516	60	17.1	17.1	16.4	15.8	15.3	13.0	10.8	8.7	5.9	4.0	2.5
SA-516	65	18.6	18.6	17.9	17.3	16.7	13.9	11.4	8.7	5.9	4.0	2.5
SA-516	70	20.0	20.0	19.4	18.8	18.1	14.8	12.0	9.3	6.7	4.0	2.5
SA-234	WPB	17.1	17.1	17.1	17.1	<b>15.6</b>	13.0	10.8	8.7	5.9	4.0	2.5
SA-105	-	20.0	19.6	18.4	17.8	17.2	14.8	12.0	9.3	6.7	4.0	2.5
SA-181	I	17.1	16.3	15.3	14.8	14.3	13.0	10.8	8.7	5.9	4.0	2.5
SA-350	LF1	17.1	16.3	15.3	14.8	14.3	13.0	10.8	8.7	5.9	4.0	2.5
SA-350	LF2	20.0	19.6	18.4	17.8	17.2	14.8	12.0	9.3	6.7	4.0	2.5
SA-53	B	17.1	17.1	17.1	17.1	<b>15.6</b>	13.0	10.8	8.7	5.9	-	-
SA-106	B	17.1	17.1	17.1	17.1	<b>15.6</b>	13.0	10.8	8.7	5.9	4.0	2.5
SA-193	B7s2½"	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	23.6	21.0	17.0	12.5	8.5	4.5
SA-194	2H											
SA-307	B											
SA-36	-	15.2	15.2	15.2	15.2	-	-	-	-	-	-	-
SA-36	-	16.6	16.6	16.6	16.6	<b>15.6</b>	13.0	10.8	8.7	5.9	-	-
<p>* The Stress Values in this table may be interpolated to determine values for intermediate temperatures. The values shown in bold obtained from time-dependent <i>properties</i>.</p>												
<p>The stress values shown in this table are used throughout this book. Pressure Vessel Handbook - 12th Edition</p>												

## Conductividades térmicas, calores específicos, gravedades específicas de metales y aleaciones

$$k = \text{Btu}/(\text{h})(\text{pie}^2)(\text{°F}/\text{pie})$$

Sustancia	Temp. °F	k*	Calor específico** Btu/(lb)(°F)	Gravedad específica
Acero	32	26	Ver Hierro	7.83
Acero	212	26	Ver Hierro	
Acero	1112	21	Ver Hierro	
Aluminio	32	117	0.183	2.55-7.8
Aluminio	212	119	0.1824	
Aluminio	932	155	0.1872	
Antimonio	32	10.6	0.0493	
Antimonio	212	9.7	0.0508	
Bismuto	64	4.7	0.0294	9.8
Bismuto	212	3.9	0.0304	
Cadmio	64	53.7	0.0550	8.65
Cadmio	212	52.2	0.0567	
Cinc	32	65	0.0917	6.9-7.2
Cinc	212	64	0.0958	
cinc	752	54	0.1082	
Cobre	32	224	0.1487	8.8-8.95
Cobre	212	218	0.1712	
Cobre	932	207	0.2634	
Hierro, vaciado	32	32	0.1064	7.03-7.13
Hierro, vaciado	212	30	0.1178	
Hierro, vaciado	752	25	0.1519	
Hierro, forjado	64	34.6	Ver Hierro	7.6-7.9
Hierro, forjado	212	27.6	Ver Hierro	
Latón (70-30)	32	56	0.1315‡	8.4-8.7
Latón	212	60	0.1488‡	
Latón	752	67	0.2015‡	
Magnesio	32-212	92	0.255	1.74
Mercurio	32	4.8	0.0329	13.6
Níquel	32	36	0.1050	8.9
Níquel	212	34	0.1170	
Níquel	572	32	0.1408	
Oro	64	169.0	0.030	19.25-19.35
Oro	212	170.8	0.031	
Plata	32	242	0.0557	10.4-10.6
Plata	212	238	0.0571	
Plomo	32	20	0.0306	11.34
Plomo	212	19	0.0315	
Plomo	572	18	0.0335	
Tántalo	64	32	0.0342	16.6

## Conductividades térmicas de los líquidos

$$k = \frac{1}{(h)(\text{pie}^2)} (\text{°F}/\text{pie})$$

Puede suponerse una variación lineal con la temperatura. Los valores extremos que se dan constituyen también los límites de temperatura en los cuales se recomiendan los datos.

Líquido	°F	k	Líquido	°F	k
<b>Aceites</b>			<b>Bromobenceno</b>	86	0.074
<b>Ricino</b>	68	0.104		212	0.070
	212	0.100	<b>Óxido de azufre</b>	5	0.108
<b>Oliva</b>	68	0.097		86	0.111
	212	0.095	<b>Bisulfuro de carbono</b>	86	0.093
<b>Acetato de etilo</b>	68	0.101		167	0.088
Alcohol 100%	68	0.105	<b>Tetracloruro</b>	32	0.107
80%	68	0.137		154	0.094
60%	68	0.176	<b>Cloruro de calcio, salmuera 30%</b>	86	0.32
40%	68	0.224	15%	86	0.34
20%	68	0.281	<b>Cloruro de sodio, salmuera 25.0%</b>	86	0.33
100%	122	0.087	12.5%	86	0.34
<b>Benceno</b>	86	0.086	<b>Clorobenceno</b>	50	0.083
	140	0.082	<b>Cloroformo</b>	86	0.080
<b>Bromuro</b>	68	0.070	<b>Cymene (para)</b>	86	0.078
<b>Eter</b>	86	0.080		140	0.079
	167	0.078	<b>Decano (n-)</b>	86	0.085
<b>Yoduro</b>	104	0.064		140	0.083
	167	0.063	<b>Diclorodifluorometano</b>	20	0.057
<b>Acetato de amilo</b>	50	0.083		60	0.053
Alcohol (n-)	86	0.094		100	0.048
	212	0.089		140	0.042
	86	0.088		180	0.038
	167	0.087	<b>Dicloroetano</b>	122	0.082
<b>Acetato butílico (n-)</b>	77-86	0.085	<b>Diclorometano</b>	5	0.111
Alcohol (n-)	86	0.097		86	0.096
	167	0.095	<b>Eter de petróleo</b>	86	0.073
(iso-)	68	0.091		167	0.073
<b>Acetona</b>	86	0.102	<b>Etilen glicol</b>	32	0.153
	167	0.095	<b>Gasolina</b>	86	0.078
<b>Acido acético 100%</b>	68	0.099	<b>Glicerina 100%</b>	68	0.164
50%	68	0.20	80%	68	0.189
<b>Acido esteárico</b>	212	0.0786	60%	68	0.220
<b>Acido láurico</b>	212	0.102	40%	68	0.259
<b>Acido oleico</b>	212	0.0925	20%	68	0.278
<b>Acido palmítico</b>	212	0.0835	100%	212	0.164
<b>Acido sulfúrico 90%</b>	86	0.21	<b>Heptano (n-)</b>	86	0.081
80%	86	0.25		140	0.079
30%	86	0.30	<b>Hexano (n-)</b>	86	0.080
<b>Agua</b>	32	0.330		140	0.078
	86	0.356	<b>Kerosena</b>	68	0.086
	140	0.381		167	0.081
	176	0.398	<b>Mercurio</b>	82	4.83
<b>Alcohol alílico</b>	77-86	0.104	<b>Nitrobenceno</b>	86	0.095
<b>Alcohol heptílico (n-)</b>	86	0.094		212	0.088
	167	0.091	<b>Nitrometano</b>	86	0.125
<b>Alcohol hexílico (n-)</b>	86	0.093		140	0.120
	167	0.090	<b>Nonano (n-)</b>	86	0.084
<b>Alcohol metílico 100%</b>	68	0.124		140	0.082
80%	68	0.154	<b>Octano (n-)</b>	86	0.083
60%	68	0.190		140	0.081
40%	68	0.234	<b>Paraldehído</b>	86	0.084
20%	68	0.284		212	0.078
100%	122	0.114	<b>Pentano (n-)</b>	86	0.078
<b>Cloruro</b>	5	0.111		167	0.074
	86	0.080	<b>Percloroetileno</b>	122	0.092
<b>Alcohol propílico (n-)</b>	86	0.099		212	49
	167	0.095	<b>Sodio</b>	410	46
Alcohol (iso-)	86	0.091	<b>Tolueno</b>	86	0.086
	140	0.090		167	0.084
<b>Amoniaco</b>	5-86	0.29	<b>1,1-tricloroetano</b>	122	0.077
<b>Amoniaco, acuoso, 26%</b>	68	0.261	<b>Tricloroetileno</b>	122	0.080
	140	0.29	Argentina (aguarrás)	59	0.074
<b>Anilina</b>	32-66	0.100	<b>Vaselina</b>	59	0.106
<b>Benceno</b>	86	0.092	<b>Xileno (orto-)</b>	68	0.090
	140	0.087	<b>Xileno (meta-)</b>	68	0.090

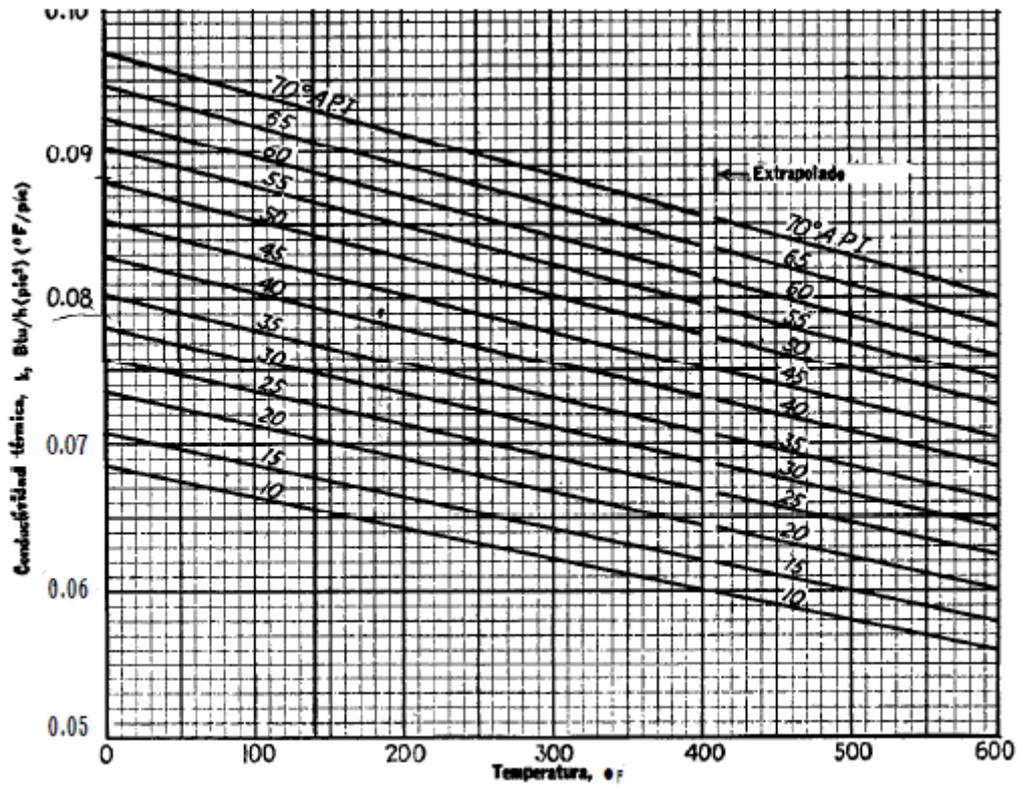
## Conductividades Térmicas De Gases Y Vapores

$$k = \text{Btu}/(\text{h})(\text{pie}^2)(^{\circ}\text{F}/\text{pie})$$

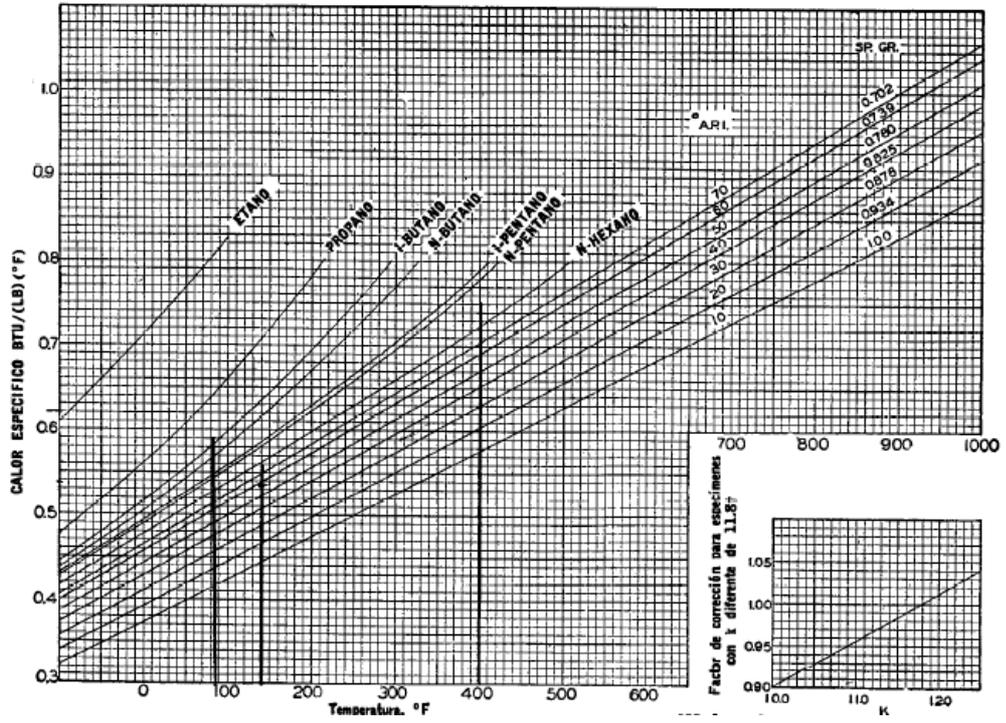
Los valores extremos de la temperatura constituyen el rango experimental. Para extrapolación a otras temperaturas, se sugiere que los datos consignados se grafiquen como  $\log$  de  $k$  vs.  $\log$  de  $T$  o que se haga uso de la suposición de que la razón  $k/\mu$  es prácticamente independiente de la temperatura (o de la presión, dentro de límites moderados).

Sustancia	°F	k	Sustancia	°F	k
Acetato de etilo	115	0.0072	Diclorodifluorometano	32	0.0048
	212	0.0096		192	0.0064
	363	0.0141		212	0.0080
Alcohol	68	0.0089		302	0.0097
	212	0.0124	tanq	-94	0.0066
cloruro	32	0.0088		-29	0.0086
	212	0.0095		32	0.0106
	363	0.0135		212	0.0175
Eter	413	0.0152	Etileno	-86	0.0064
	32	0.0077		32	0.0101
	115	0.0099		122	0.0131
	212	0.0131		212	0.0161
	363	0.0189	Heptano (n-)	392	0.0112
Acetona	413	0.0209		212	0.0103
	32	0.0057	Hexano (n-)	32	0.0072
	115	0.0074		68	0.0080
	212	0.0098	Hexeno	32	0.0061
	363	0.0147		212	0.0109
Acetileno	-103	0.0060	Hidrógeno	148	0.0065
	32	0.0108		-58	0.0083
	122	0.0140		32	0.100
	212	0.0172		122	0.115
Aire	-148	0.0095		212	0.129
	32	0.0140	Hidrógeno y bióxido de carbono	572	0.178
	212	0.0183	0% H <sub>2</sub>	32	0.0083
	392	0.0226	20%	0.0165	
	572	0.0265	40%	0.0270	
Alcohol metílico	32	0.0083	60%	0.0410	
	212	0.0128	80%	0.0690	
Acetato	68	0.0089	100%	0.10	
	32	0.0068	Hidrógeno y nitrógeno	32	0.0133
Amoniaco	-76	0.0095	0 H <sub>2</sub>	0.0212	
	32	0.0128	20%	0.0313	
	100	0.0157	40%	0.0438	
	212	0.0185	60%	0.0635	
Benceno	32	0.0052	80%	0.0922	
	115	0.0073	Hidrógeno y óxido nítrico	32	0.0092
	212	0.0103	0 H <sub>2</sub>	0.0170	
	363	0.0152	20%	0.0270	
Bióxido de azufre	413	0.0176	40%	0.0410	
	32	0.0069	60%	0.0650	
	212	0.0089	80%	0.0922	
Bióxido de carbono	-58	0.0068	Mercurio	392	0.0197
	32	0.0065	Metano	-148	0.0100
	212	0.0133		58	0.0145
	392	0.0181		32	0.0175
	572	0.0228		32	0.0215
Bisulfuro	32	0.0040	Nitrógeno	-140	0.0035
	45	0.0042		32	0.0140
Monóxido	-312	0.0041		122	0.0160
	294	0.0046	Oxido nítrico	212	0.0180
	32	0.0135		-94	0.0103
Tetracloruro	115	0.0041		32	0.0138
	212	0.0052	Oxido nitroso	-98	0.0067
	363	0.0065		32	0.0087
Butano (n-)	32	0.0078	Oxígeno	912	0.0088
	212	0.0135		-48	0.0095
Butano (iso-)	32	0.0080		-58	0.0119
	212	0.0139		32	0.0142
Ciclohexano	216	0.0095		122	0.0164
Cloro	32	0.0043		212	0.0195
Cloroformo	32	0.0038	Pentano (n-)	32	0.0074
	115	0.0046	(iso-)	98	0.0083
	212	0.0058		32	0.0072
	363	0.0077	Propano	212	0.0127
Cloruro de metileno	32	0.0039		32	0.0087
	115	0.0049	Sulfuro de hidrógeno	212	0.0151
	212	0.0063	Vapor de agua	32	0.0076
	413	0.0095		115	0.0120
Cloruro de metilo	32	0.0053		212	0.0137

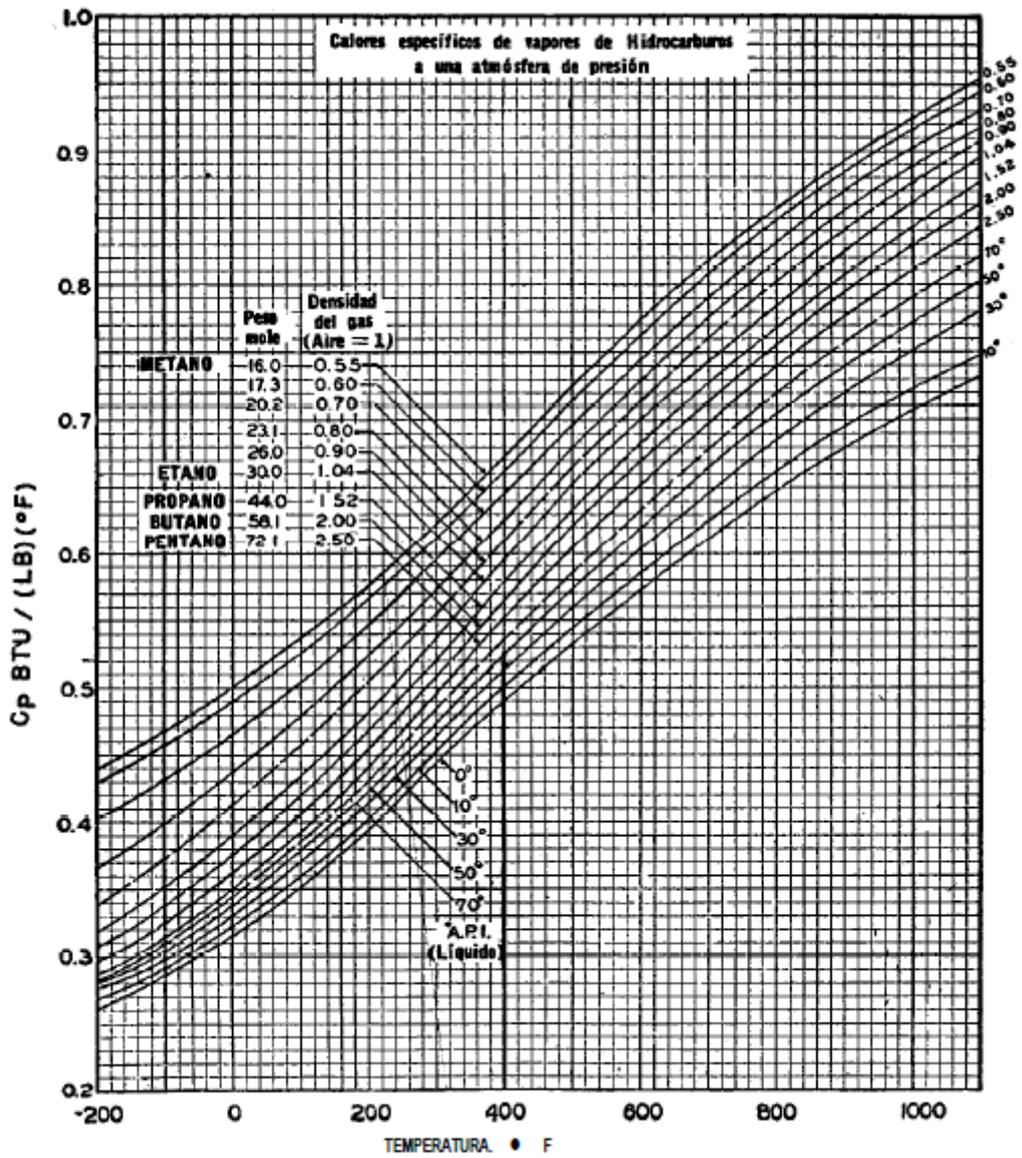
## Conductividades térmicas de hidrocarburos líquidos



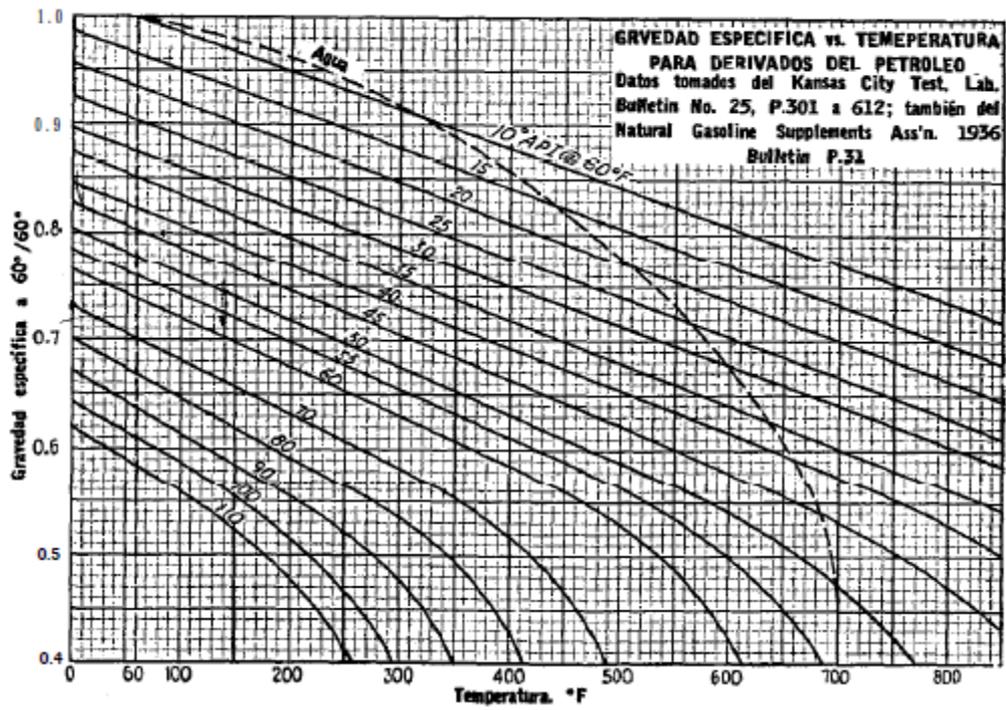
## Calores específicos de hidrocarburos líquidos



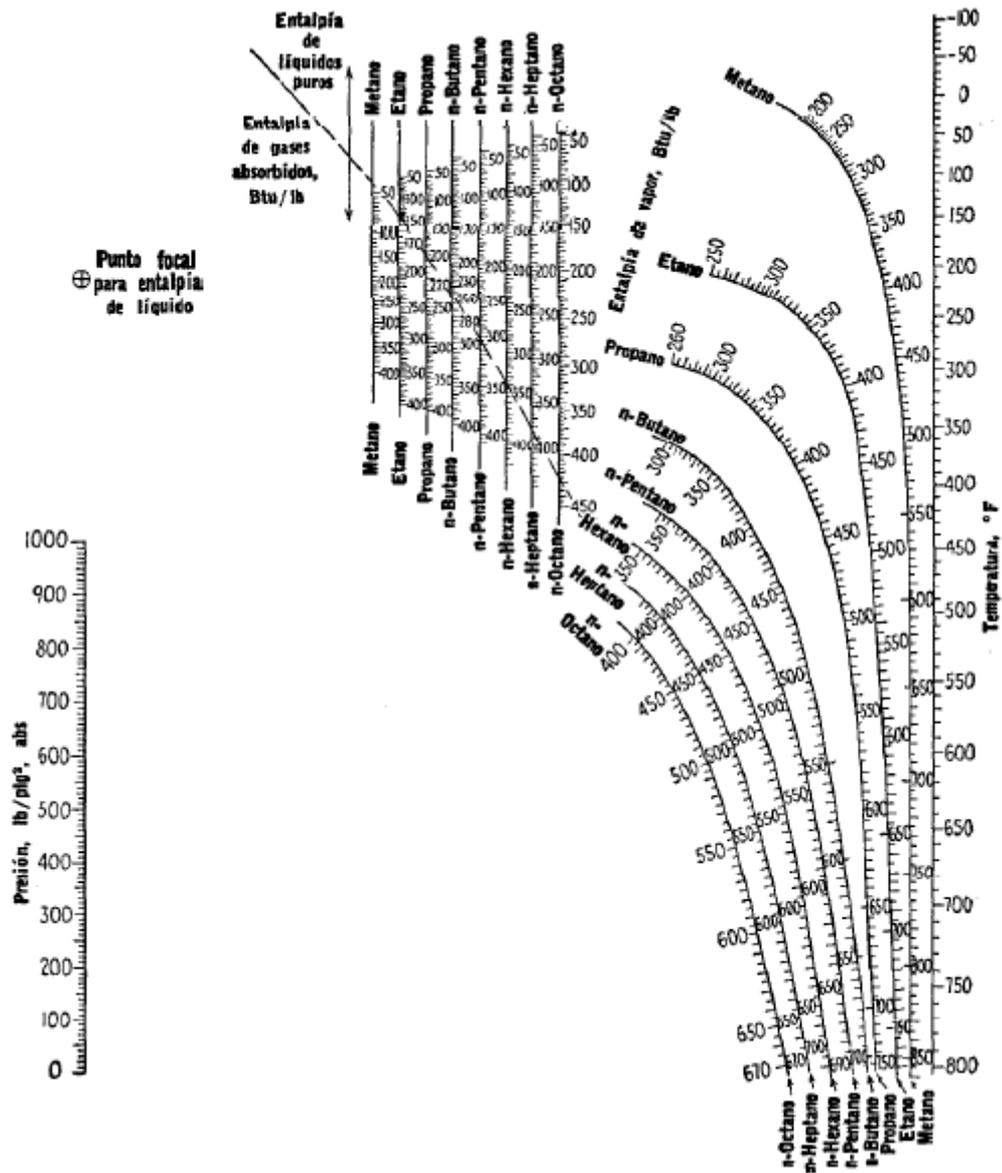
### Calores específicos de vapores de hidrocarburos a 1 atm.



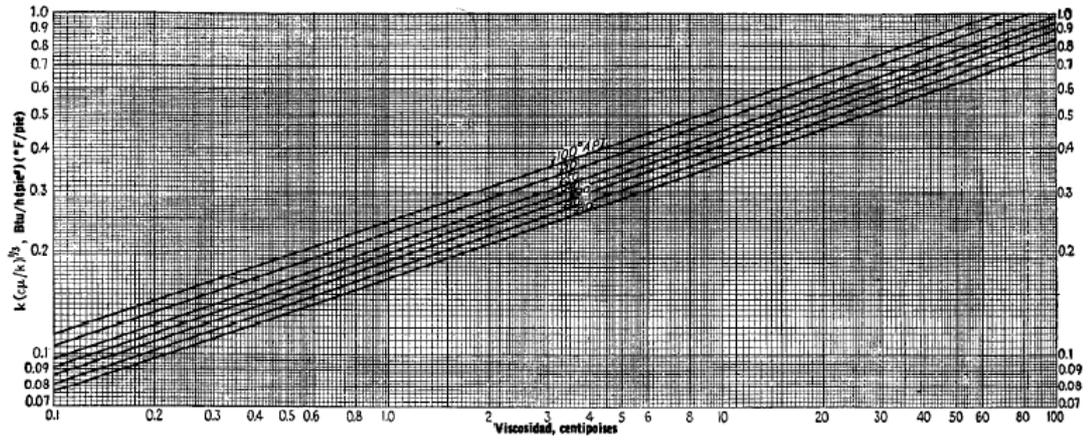
## Gravedades específicas de hidrocarburos



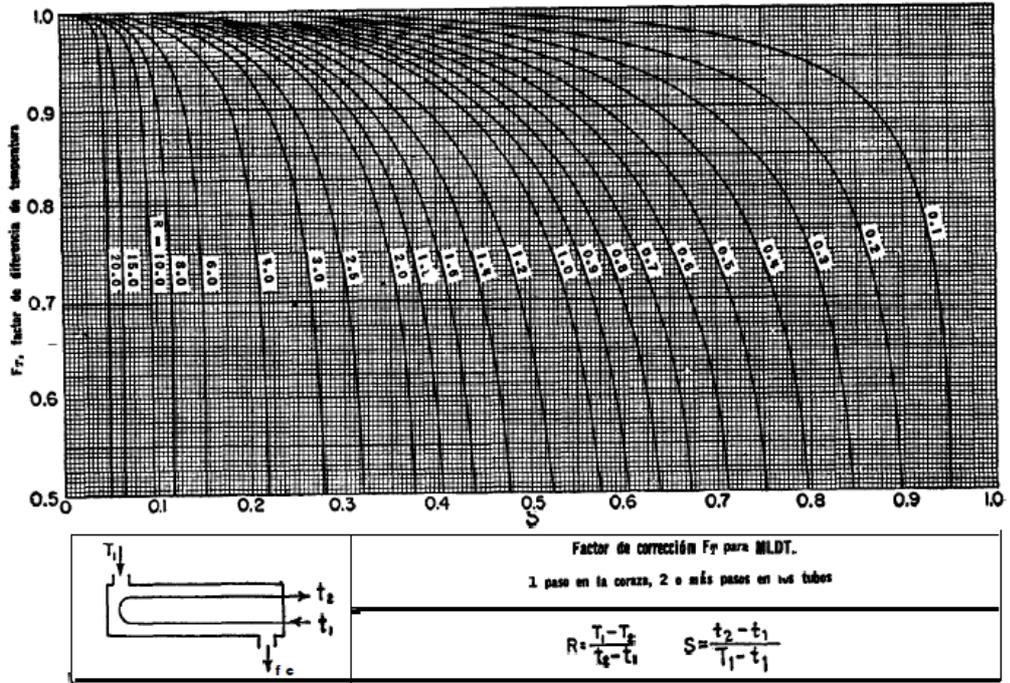
# Entalpías de hidrocarburos puros



## Valores de $k(c/u)^{1/3}$ para hidrocarburos



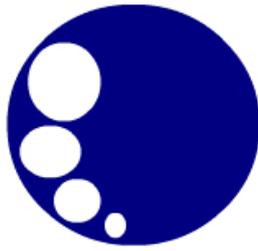
## Factores de corrección MLDT para intercambiadores 1-2.







**ANEXO B**  
**MANUAL DEL USUARIO DEL EQUIPO DE**  
**DESTILACIÓN**



**AV.CORP.**

**INGENIERIA LOGISTICA, EQUIPOS Y SERVICIOS**



**EQUIPO DE DESTILACIÓN CON CAPACIDAD DE 110  
GALONES DIARIOS PARA LA RECUPERACIÓN DE  
HIDROCARBUROS VOLÁTILES**

**MANUAL DEL USUARIO**

## CONTENIDO

Visión General del Equipo	_____	1
Seguridad Industrial	_____	1
Descripción del equipo	_____	2
Calentador	_____	2
Condensadores	_____	3
Sistema enfriamiento	_____	4
Sistema alimentación gas propano	_____	4
Riesgos en la operación del equipo	_____	5
Procedimiento para operar el equipo	_____	6
Hoja de control para la recuperación de efluentes contaminados	_____	8
Mantenimiento preventivo del equipo	_____	9

## **Visión general del Equipo**

El equipo de destilación de AV.CORP permite reutilizar los efluentes producidos tras el lavado de los tanques de 55 Glns mediante un proceso de destilación fraccionada. El contenido de este manual, detallará todos los procesos que se deberá llevar a cabo por parte del operador para utilizar este equipo.

Este proceso ayudará en la empresa a aprovechar en su totalidad los recursos disponibles que se tienen.

## **Seguridad Industrial para el equipo de destilación**

Este sistema al trabajar con hidrocarburos requiere que el personal se encuentre capacitado para enfrentar algunos riesgos de trabajo y también para disminuir el porcentaje de incidentes al manejar el equipo de destilación.

Se deberá realizar un curso de seguridad en el que se encontrará todo el personal de AV.CORP en el mismo se explicará el funcionamiento del equipo, los riesgos potenciales y se realizará un simulacro real.

## Seguridad Personal

El operador deberá usar:

- Casco de seguridad
- Guantes industriales
- Botas de seguridad
- Overol
- Mascarilla



Se deberá tener los extintores de fuego siempre a la vista de el operador, se contará mínimo con dos de estos elementos y se tendrá en cuenta la fecha de caducidad del producto de esta manera siempre tendremos este dispositivo listo para su accionar en cualquier caso de incendio.

### Descripción del equipo:

El recuperador de efluentes cuenta con 4 sistemas:

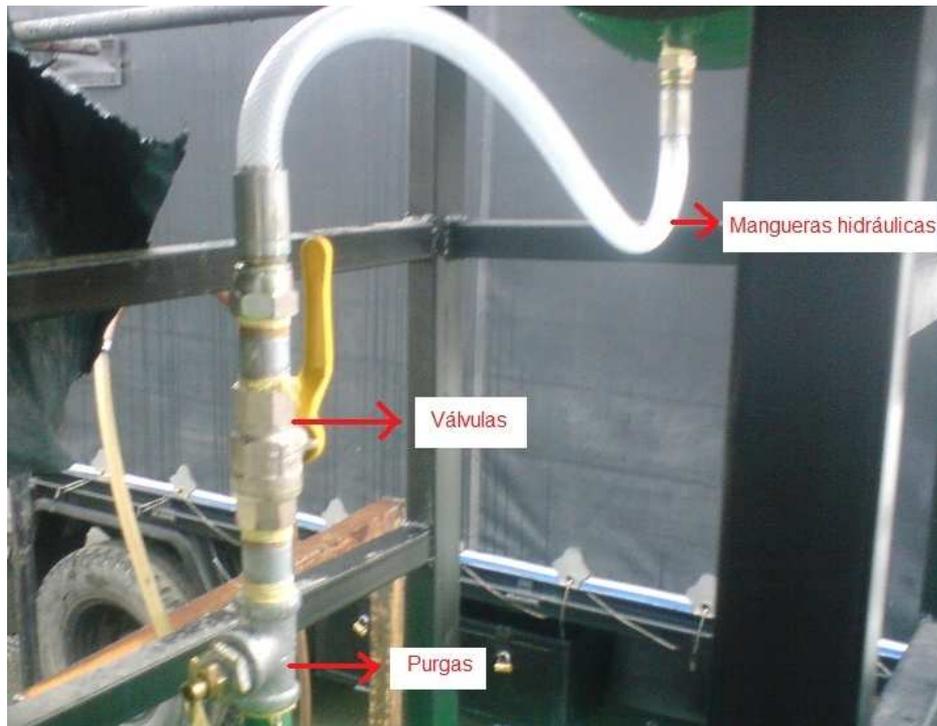
- Sistema de calentamiento de efluentes
  - Calentador.

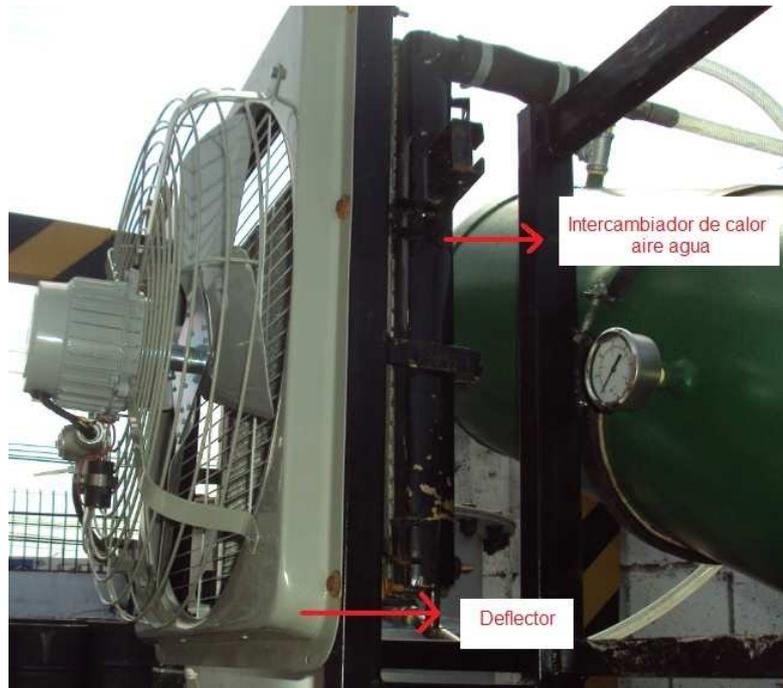


- Sistema de condensación de efluente
  - Condensador para efluentes livianos
  - Condensador para efluentes pesados.
  - Mangueras para hidrocarburos
  - Válvulas

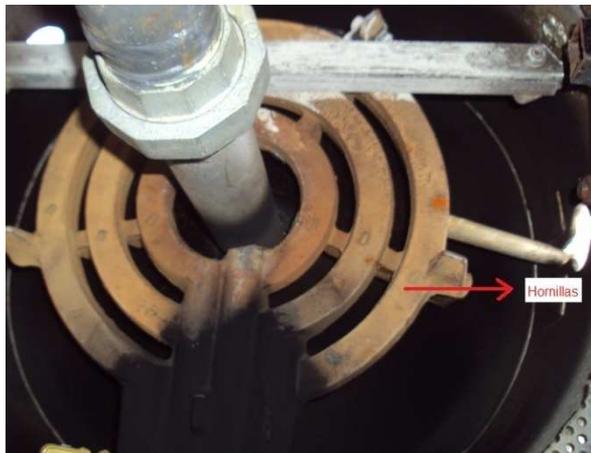


- Sistema de enfriamiento del agua
  - Bomba eléctrica
  - Mangueras hidráulicas
  - Intercambiador de calor aire-agua
  - Válvulas
  - Manómetros





- Sistema de alimentación de gas propano
  - Cilindro de gas propano
  - Tubería para gas
  - Válvula reguladora
  - Válvula de seguridad
  - Hornillas



## Riesgos en la operación del equipo

Es necesario identificar los riesgos que genera el trabajar con este equipo para prevenir accidentes.

- Inflamación del efluente
  - Causas
    - Derrames del efluente al cargar en el calentador
    - Mal ajuste de los pernos de las bridas
  - Qué hacer?
    - Utilizar el extintor ubicado bajo los condensadores
    - Utilizar la manguera de agua ubicada arriba de la bomba eléctrica
- Derrame de hidrocarburo recuperado
  - Causas
    - Recipientes de recolección deficientes
    - Mangueras en mal estado
  - Qué hacer?
    - Mantenimiento de emergencia
- Derrame de agua por el circuito eléctrico
  - Causas
    - Abrazaderas dañadas
    - Fugas en las conexiones hidráulicas
  - Qué hacer?
    - Mantenimiento de emergencia
- Caída del operador
  - Causas
    - Circular por zona no permitida
    - Distracciones
    - Objetos innecesarios en la plataforma
  - Qué hacer?
    - Tener despejado circuito de operación del operador
    - Estar pendiente siempre del proceso

### **Procedimiento para operar el equipo:**

1. Se deberá dejar reposar al menos un día el efluente contaminado para que las sustancias más pesadas como los aceites, tierra, entre otros reposen sobre la base del tanque mientras que las los hidrocarburos se sitúen en la parte superior del mismo.
2. El operador deberá colocar el efluente en el calentador por la brida destinada para este propósito, este proceso deberá ser realizado bajo estricto control, en el caso de derrames pequeños, el encargado deberá limpiar toda la zona para evitar accidentes por incineración del efluente y para conservar la vida útil del equipo.
3. Centrar el empaque que tiene la brida y ajustar los pernos en forma de cruz para que la fuerza sea uniforme en todos los pernos.
4. Purgar el sistema de enfriamiento del agua, para esto:
  - a. Verificar que todas las válvulas para el circuito del agua estén abiertas
  - b. Encender la bomba de agua
  - c. Abrir las válvulas de purga y eliminar el aire contenido en los dos condensadores
5. Abrir la válvula de paso de gas propano que se encuentra en la parte superior del cilindro.
6. Abrir la válvula de seguridad  $\frac{1}{4}$  de vuelta para el paso de gas propano
7. Encender el sistema de hornillas de gas
8. Abrir la válvula de seguridad hasta  $\frac{3}{4}$  de su abertura total para el proceso de calentamiento de gas.
9. Controlar la temperatura del efluente hasta llegar a una temperatura de gas de 65°C. mediante las pruebas realizadas en el equipo este procedimiento dura alrededor de 90 min.
10. Una vez obtenida la temperatura de 65°C y una presión de 5PSI, el operador deberá encender la bomba para la circulación del agua.
11. Abrir las válvulas de paso de gas al condensador de efluentes livianos
12. En la boca de salida, abrir lo mínimo posible para el paso de condensado.

13. Recoger el condensado en las canecas de 5Glns de capacidad.
14. Repetir el proceso para el condensador de efluentes pesados pero realizar este proceso con un condensador a la vez (no abrir los dos al mismo tiempo porque perderíamos la presión necesaria para empujar el hidrocarburo líquido que se encuentra en los condensadores).
15. En un período de media hora, cerrar la válvula de paso a los condensadores y dejar ganar presión al calentador.
16. Realizar el proceso de condensación por un tiempo alrededor de 2h y 30 min, pasado este tiempo, el operador observará que el gas ya no tiene fuerza esto indica que el volumen del efluente líquido es poco y es necesario terminar el proceso.
17. Recoger los efluentes obtenidos en los tanques de 55 Glns señalados tanto para efluentes livianos como para efluentes contaminados.
18. Cerrar la válvula de seguridad del paso de gas propano
19. Cerrar la válvula de paso de gas ubicada en la parte superior del cilindro.
20. Tras una hora de haber terminado el proceso, se deberá abrir la válvula de desfogue de residuos, recogerlos y almacenarlos en los desechos hidrocarburiíferos.



INGENIERIA LOGISTICA, EQUIPOS Y SERVICIOS

## Hoja de control para la recuperación de efluentes contaminados

<b>Nombre del Operador</b>	
<b>Fecha</b>	
<b>Hora de inicio</b>	
<b>Volumen de efluente a recuperar</b>	

**Tiempos necesarios para llegar a la temperatura:**

**Termómetro hidrocarburo estado líquido**

<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>40</b>	<b>45</b>	<b>50</b>	<b>55</b>	<b>60</b>	<b>65</b>	<b>70</b>

**Termómetro hidrocarburo estado gaseoso**

<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>40</b>	<b>45</b>	<b>50</b>	<b>55</b>	<b>60</b>	<b>65</b>	<b>70</b>

<b>Hora de culminación del proceso</b>	
<b>Hidrocarburo liviano recuperado</b>	
<b>Hidrocarburo pesado recuperado</b>	
<b>Residuos en el calentador</b>	

**Observaciones:**

---



---



---



---



INGENIERIA LOGISTICA, EQUIPOS Y SERVICIOS

Armonía entre  
Tecnología y  
Medio Ambiente



## Mantenimiento preventivo del equipo de destilación de efluentes contaminados.

Fecha mantenimiento: \_\_\_\_\_

A cargo de: \_\_\_\_\_

<b>CALENTADOR</b>		
Actividades	Realizado	No es necesario
Limpeza paredes		
Limpeza base		
Limpeza brida salida gas efluente pesado		
Limpeza cabeza del calentador		
Revisión empaque		
Revisión instrumentos de medición (termómetros manómetros)		
Ajuste pernos cabeza y brida de mantenimiento		
Otras actividades: _____		

<b>CONDENSADORES</b>		
<b>Actividades</b>	<b>Realizado</b>	<b>No es necesario</b>
Limpieza exterior condensador efluente liviano		
Limpieza exterior condensador efluente pesado		
Revisión de válvulas de entrada/salida Hidrocarburo		
Revisión válvulas de entrada/salida agua		
Revisión mangueras para hidrocarburo		
Revisión posible fugas circuito agua Efl. Liv.		
Revisión posible fugas circuito agua Efl. pesad		
Revisión fugas circuito hidrocarburo Ef. Liv.		
Revisión fugas circuito hidrocarburo Ef. pesad		
Otras actividades: _____		

<b>SISTEMA ENFRIAMIENTO</b>		
<b>Actividades</b>	<b>Realizado</b>	<b>No es necesario</b>
Revisión Bomba eléctrica		
Revisión mangueras hidráulicas		
Revisión de válvulas		
Limpieza tanque de reserva		
Revisión deflector		
Revisión intercambiador de calor		
Otras actividades: _____		

<b>SISTEMA ALIMENTACIÓN GAS</b>		
<b>Actividades</b>	<b>Realizado</b>	<b>No es necesario</b>
Revisión válvula de gas		
Revisión válvula de seguridad		
Revisión de circuito de gas		
Revisión hornillas de gas		
Otras actividades: _____		

<b>SISTEMA ELÉCTRICO</b>		
<b>Actividades</b>	<b>Realizado</b>	<b>No es necesario</b>
Revisión circuito eléctrico		
Revisión instrumentos		
Otras actividades: _____		

<b>REPUESTOS</b>		
<b>DETALLE REPUESTOS:</b>	<b>Cambiado</b>	<b>Reparado</b>

**\*Próximo mantenimiento:** \_\_\_\_\_  
**(6 meses a partir de esta fecha)**

\_\_\_\_\_  
**Firma de responsabilidad**

\_\_\_\_\_  
**Vicente Toledo**  
**Jefe de Mantenimiento**

**ANEXO C**  
**PLANOS DEL EQUIPO DISEÑADO**















## BIBLIOGRAFÍA

- KERN, D, Procesos de Transferencia de Calor. Traducido del inglés por Ing. Nicolas Marino Ambrossi. Primera ed. México, MacGraw Hill, 1992. pp. 660-661.
- INCROPERA, F y DE WITT, D, Fundamentos de Transferencia de Calor. Traducido del inglés por Ricardo Cruz. 4ta ed. México, Prentice Hall. 1999. pp. 2-25. pp. 44-50. pp. 284-331. p. 833.
- MOTT, R, Mecánica de Fluidos Aplicada. Traducido del inglés por Carlos Cordero Pedraza. 4ta ed. México, Prentice Hall, 1996. pp. 267-280, pp. 351-365, pp. 492-498.
- NONHEBEL, G y MOSS, A, El Secado de sólidos en la industria Química. Traducido del inglés por Marcelo Terrizazo. Primera ed. España, Reverté, 1979. 343p.
- Brooker D B. Bakker-Arkema F W and Hall C W, Drying Cereal Grains. Westport: Avi Publishing. 1974. 265 p.
- SHIGLEY, JE y MISCHKE, CR. Diseño en Ingeniería Mecánica. Traducido del inglés por Francisco Paniagua. 5ta ed. México, MacGraw Hill, s.f. pp 133-144.
- Yunus A. Çengel, José Hernán Pérez, Transferencia de calor Edición 2, Editor McGraw-Hill Interamericana, 2004, pp 793
- Autor Consejo Nacional de Desarrollo (Ecuador). Sección Hidrocarburos,  
• Hidrocarburos: estadísticas, Editor Sección Publicaciones, 1982, pp 20-116
- Manuel Romero García, Resistencia de materiales, Volumen 12 de Treballs d'Informàtica i Tecnologia, Editor Universitat Jaume I, 2002,pp 48-229
- [www.ambiente.gov.ec](http://www.ambiente.gov.ec)

- [www.pedrollo.com](http://www.pedrollo.com)
- [www.alambiques.com/tecnicas\\_destilacion.htm](http://www.alambiques.com/tecnicas_destilacion.htm)
- [patentados.com/inventos](http://patentados.com/inventos)
- [biblioteca.universia.net](http://biblioteca.universia.net)