

**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**

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

“Diseño y Construcción de un Sistema de Enfriamiento para  
Activación de Baterías utilizadas en Submarinos de la Armada  
Nacional del Ecuador”

**TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Presentada por:

Luis Gonzalo Laverde Naranjo

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

Año: 2008

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

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

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

---

Luis Gonzalo Laverde Naranjo

## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

---

Ing. Francisco Andrade S.

DECANO DE LA FIMCP

---

Ing. Ernesto Martínez L.

DIRECTOR DE TESIS

---

Ing. Manuel Helguero.

VOCAL

---

Ing. Jorge Duque R.

VOCAL

## DECLARACIÓN EXPRESA

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

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

---

Luis G. Laverde Naranjo

## AGRADECIMIENTO

A DIOS porque El es Bueno y Excelso al permitirme tener éxito en mis estudios.

A mi familia, especialmente mis padres, hermanos, mis sobrinos en especial Daniel por su ayuda en todo momento de mi vida.

A mi director de Tesis, Ing. Ernesto Martínez por su mano de apoyo siempre presta e incondicional, dispuesta a brindar su amistad y ayuda como formador de los futuros profesionales.

A la compañía ERMARLO S.A. y todo su personal, empresa en la cual me he forjado y me ha permitido desarrollar este tema de tesis.

A todos mis familiares, amigos y personas que me ayudaron y apoyaron para alcanzar mi objetivo.

DEDICATORIA

A DIOS

A MIS PADRES

GONZALO E ISABEL

## A MI FAMILIA

### RESUMEN

El presente trabajo consiste en dar una solución real a la necesidad actual y futura del enfriamiento de las baterías que se utilizan en los submarinos de la Armada Nacional del Ecuador, en el proceso de activación de éstas en tierra.

En el Capítulo Uno, se plantea las generalidades, detallando las partes constitutivas de los submarinos, características de las baterías que se utilizan en los submarinos, métodos de carga de las baterías y administración de la temperatura en el proceso de activación de éstas.

El Capítulo Dos, trata de la descripción del problema, en esta sección se describe los requerimientos dados por el fabricante de las baterías para que estas puedan entrar en funcionamiento, se plantea varias alternativas de solución que permita solucionar el problema planteado.

El Capítulo Tres,, se realiza el análisis térmico, de acuerdo a datos técnicos dados por los fabricantes de las baterías, que aplicando conocimientos de termodinámica y transferencia de calor se podrá plantear las ecuaciones adecuadas para tener resultados y poder dimensionar los equipos necesarios para lograr el objetivo planteado.

En el Capítulo Cuatro, conocidos los parámetros térmicos actuantes en el sistema, se procede a realizar la selección y diseño mecánico de los componentes involucrados en el funcionamiento del sistema de enfriamiento.

El Capítulo Cinco realiza, una evaluación técnica para la construcción y montaje de los equipos, la evaluación económica del proyecto y actividades de taller.

El Capítulo Seis se da conclusiones y recomendaciones a las que se llega como consecuencia del desarrollo de este trabajo. Además recomendaciones para que se implemente en un proceso de mejora continua.

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	I
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	VII
SÍMBOLOGIA.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
ÍNDICE DE PLANOS.....	XIV
ÍNDICE DE TABLAS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	1
<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>1. GENERALIDADES.....</b>	<b>4</b>
1.1 Descripción del sistema de poder de los submarinos.....	4

1.2 Características generales del submarino U - 209.....	6
1.3 Proceso de activación de las baterías para submarino.....	7
1.3.1 Análisis del sistema operativo.....	7
1.3.2 Características de las baterías.....	14
1.3.3 Capacidad de las baterías.....	16
1.3.4 Autodescarga.....	21
1.3.5 Almacenamiento.....	23
1.3.6 Principales métodos de carga.....	24
1.3.7 Control de carga.....	27
1.3.8 Control de la temperatura en las baterías.....	29

## **CAPÍTULO 2**

<b>2. DESCRIPCION DEL PROBLEMA.....</b>	<b>33</b>
2.1 Requerimientos para el proceso de enfriamiento.....	36
2.2 Consideraciones técnicas para la activación.....	
2.3 Alternativas de solución.....	37
	38
2.3.1 Sistema de enfriamiento directo.....	41
2.3.2 Sistema de enfriamiento con intercambiador enfriado por aire.....	42
2.3.3 Sistema de enfriamiento utilizando chiller.....	43
2.3.4 Sistema de enfriamiento utilizando intercambiador de calor y torre de enfriamiento.....	45
2.4 Selección mejor alternativa.....	47
2.5 Torres de enfriamiento y su clasificación.....	49
2.6 Selección de la torre a utilizarse.....	57

**CAPÍTULO 3**

<b>3. ANÁLISIS TÉRMICO.....</b>	<b>60</b>
3.1 Descripción del sistema de enfriamiento.....	60
3.2 Datos de operación del sistema de enfriamiento.....	64
3.3 Selección del intercambiador de calor.....	66
3.3.1 Método FLMTD.....	68
3.3.2 Uso de software para selección del intercambiador de calor.....	77
3.4 Diseño térmico de la torre de enfriamiento.....	86
3.5.1 Fundamento del enfriamiento por evaporación.....	87
3.5.2 Cálculos.....	89

**CAPÍTULO 4**

<b>4. DISEÑO Y SELECCIÓN DE ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO.....</b>	<b>105</b>
4.1 Componentes de la torre de enfriamiento.....	104
4.2 Determinación de la sección transversal de la torre.....	108
4.3 Selección de la columna de contacto.....	112
4.3.1 Altura de las bandejas.....	114
4.3.2 Área perforada.....	115
4.3.3 Dimensiones de las perforaciones.....	116
4.3.4 Espesor de las bandejas.....	117
4.4 Diseño del depósito de colección de la torre de enfriamiento.....	121
4.4.1 Selección del espesor de plancha.....	123
4.4.2 Carga en las paredes del depósito.....	124
4.4.4 Momento de inercia mínimo requerido.....	125
4.3.3 Distancia entre soportes del colector.....	125

4.4 Selección del ventilador.....	129
4.5 Selección de diámetro de la tubería.....	135
4.6 Selección de bombas.....	137

## **CAPITULO 5**

<b>5. MONTAJE DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO.....</b>	<b>138</b>
5.1 Diagrama de Gantt.....	138
5.1.1 Preparación de documentos, planos de taller y movilización.....	139
5.1.2 Fabricación en el taller.....	140
5.1.3 Montaje del sistema de enfriamiento.....	145
5.1.4 Preparación de superficie y pintura en sitio.....	148
5.1.5 Pruebas hidrostáticas de tuberías e intercambiador.....	149
5.1.6 Bombas de agua.....	150
5.1.7 Instalación eléctrica.....	151
5.2 Materiales y equipos requeridos.....	155
5.3 Resumen de costos.....	156

## **CAPITULO 6**

<b>6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>158</b>
6.1 Conclusiones.....	158
6.2 Recomendaciones.....	160

## APÉNDICES

## BIBLIOGRAFÍA

## ÍNDICE DE FIGURAS

		<b>Pág.</b>
Figura 1.1	Partes constitutivas del submarino U -209.....	7
Figura 1.2	Estado de descarga de un acumulador.....	12
Figura 1.3	Estado de carga de un acumulador.....	14

Figura 1.4	Variación de la capacidad según régimen de descarga.....	17
Figura 1.5	Variación de la capacidad según la temperatura.....	18
Figura 1.6	Variación de la capacidad según número de ciclos.....	19
Figura 1.7	Variación de la vida útil en función de la descarga.....	20
Figura 1.8	Variación de la capacidad por autodescarga	22
Figura 1.9	Reacción exotérmica.....	32
Figura 2.1	Trabajos preliminares.....	36
Figura 2.2	Esquema de enfriamiento de batería.....	37
Figura 2.3	Sistema de enfriamiento directo.....	41
Figura 2.4	Enfriamiento utilizando intercambiador enfriado por aire	43
Figura 2.5	Sistema de enfriamiento utilizando un chiller	44
Figura 2.6	Sistema de enfriamiento utilizando torre de enfriamiento e intercambiador de calor.....	46
Figura 2.7	Torre de enfriamiento de tiro forzado.....	53
Figura 2.8	Torre de flujo a contracorriente y tiro inducido.....	55
Figura 2.9	Torre de flujo cruzado y tiro inducido.....	57
Figura 3.1	Disposición de las baterías en el cuarto de activación.....	61
Figura 3.2	Disposición de tubería.....	61
Figura 3.3	Sistema de desplazamiento.....	62
Figura 3.4	Baterías en cuarto de activación.....	62
Figura 3.5	Sistema móvil para llevar el fluido de enfriamiento a las baterías.....	63
Figura 3.6	Diseño de forma del sistema de enfriamiento.....	66
Figura 3.7	Distribución de temperaturas en un intercambiador de calor de doble tubo en paralelo.....	69
Figura 3.8	Ventana de inicio del programa.....	77
Figura 3.9	Ventana de selección de tipo de intercambiador a utilizarse y definición de fluidos.....	78
Figura 3.10	Datos del material del intercambiador.....	80

Figura 3.11	Ventana de ingreso de datos de intercambiador de calor.....	81
Figura 3.12	Ventana de resultados en la presión de diseño.....	82
Figura 3.13	Ventana de resultados.....	83
Figura 3.14	Ventana de resultados.....	84
Figura 3.15	Disposiciones del haz de tubos.....	86
Figura 3.16	Idealización del fenómeno de transferencia.....	87
Figura 3.17	Flujo Específico.....	91
Figura 3.18	Diagrama del sistema para el diseño.....	92
Figura 3.19	Relaciones de agua y aire de una torre a contra flujo.....	93
Figura 3.20	Diagrama de operación de enfriamiento del agua.....	101
Figura 4.1	Diseño de Forma de la torre de enfriamiento.....	108
Figura 4.2	Diagrama de operación de una bandeja perforada.....	114
Figura 4.3	Disposición de agujeros en las bandejas.....	116
Figura 4.4	Tensión equivalente.....	120
Figura 4.5	Deformación.....	120
Figura 4.6	Factor de seguridad.....	120
Figura 4.7	Valores de alfa.....	122
Figura 4.8	Dimensionamiento del depósito de colección de agua.....	123
Figura 4.9	Cargas hidrostáticas.....	124
Figura 4.10	Distancia entre soportes.....	125
Figura 4.12	Tensión equivalente.....	128
Figura 4.13	Deformación.....	128
Figura 4.14	Factor de seguridad.....	128
Figura 4.15	Diagrama para seleccionar modelo de ventilador.....	131
Figura 4.16	Ventilador seleccionado.....	132
Figura 4.17	Tensión equivalente.....	134
Figura 4.18	Deformación.....	134
Figura 4.19	Factor de seguridad.....	134
Figura 5.1	Diagrama de Gantt	138

Figura 5.2	Sistema de deslizamiento.....	171
Figura 5.3	Alineación de piso donde se asentará la torre.....	172
Figura 5.4	Bomba de agua para torre.....	175
Figura 5.5	Tubería de succión.....	176
Figura 5.6	Tablero de control eléctrico.....	177
Figura 5.7	Intercambiador sumergido en colector de la torre de enfriamiento.....	178
Figura 5.8	Bandejas perforadas.....	178
Figura 5.9	Torre de enfriamiento instalada.....	179

## ÍNDICE DE TABLAS

		<b>Pág.</b>
Tabla 1.1	Características técnicas del submarino U -209.....	6
Tabla 1.2	Parámetros de almacenamiento.....	23
Tabla 2.1	Programa de carga eléctrica para la activación de las baterías de los submarinos.....	34
Tabla 2.2	Impurezas más comunes en el agua que afectan los sistemas de enfriamiento.....	40
Tabla 2.3	Matriz de decisión.....	48
Tabla 2.4	Clasificación de las torres de enfriamiento	49
Tabla 2.5	Matriz de decisión para seleccionar el tipo de torre de enfriamiento.....	58
Tabla 3.1	Escala de presión y valor U para tipos de intercambiadores de calor.....	75
Tabla 3.2	Área transversal de flujo y superficie para intercambiadores de calor.....	76
Tabla 3.3	Valores de entalpía.....	102
Tabla 3.4	Características de humidificación.....	103
Tabla 4.1	Dimensiones de zona sin perforar.....	115
Tabla 4.2	Informe de resultados del análisis de la bandeja perforada.....	119
Tabla 4.3	Informe de resultados del colector de agua.....	127
Tabla 4.4	Informe de resultados de la campana de extracción.....	133
Tabla 4.5	Velocidades y caídas de presión permisibles	135
Tabla 4.6	Densidad del fluido en función de la velocidad.....	136
Tabla 5.1	Lista de equipos y herramientas.....	155

## ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1	Torre de enfriamiento y sus partes
Plano 2	Bandejas perforadas
Plano 3	Campana de extracción
Plano 4	Tanque colector
Plano 5	Placa soporte
Plano 6	Dimensiones de estructura de torre de enfriamiento

## ABREVIATURAS

°C	Grados centígrados
Mg	Magnesio
Si	Silicio
m	Metros
cm	Centímetros
mm	Milímetros
kg	Kilogramos
t	Toneladas métricas
MVA	Mega voltamperios
kwh	Kilovatio hora
$\frac{kwh}{t}$	Kilovatio hora por tonelada
Nm <sup>3</sup>	Metro cúbico normalizado
FeMn	Ferromanganeso
MgO	Óxido de magnesio
$\mu m$	Micrómetro
NO <sub>2</sub>	Dióxido de nitrógeno
$\frac{g}{Nm^3}$	Gramos por metro cúbico de aire normalizado
$\frac{t}{h}$	Toneladas por hora
$\frac{g}{m^3}$	Gramos por metro cúbico

$mg/m^3$	Miligramos por metro cúbico
$g/pe^3$	Gramos por pié cúbico
$pe^3/min$	Pié cúbico por minuto
gal.	galón
CFM	Pies cúbicos por minuto
$\frac{Kg}{t}$	Kilogramos por tonelada
$m^3/h$	Metros cúbicos por hora
$\frac{m^3/h}{t}$	Metros cúbicos por hora por tonelada
$\rho_s$	Densidad del sólido
$\mu g/m^3$	Microgramos por metro cúbico
$kg/m^3$	Kilogramo por metro cúbico
$m/s$	Metros por segundo
$mmColH_2O$	Milímetros de columna de agua
atm	atmósferas
Pa	Pascales
FPM	Pies cúbicos por minuto
A	Área
V	Velocidad
Q	Caudal
$m^3/s$	Metros cúbicos por segundo

SP	Presión estática
VP	Presión dinámica
kPa	Kilopascales
MPa	Megapascales
$lb/pulg^2$	Libras por pulgadas cuadradas
$mm/año$	Milímetro por año
$m^3/m^2h$	Metros cúbicos por metro cuadrado por hora
psi	Libras por pulgada cuadrada
$\phi$	diámetro
ppm	Partes por millón
M	Momento
mpy	Milésimas de pulgada por año
Mw	Megavatios
$\Delta T$	Diferencia de temperaturas
$J/kg^\circ C$	Joules por kilogramo por grado centígrado
k	Conductividad
h	Coficiente de transferencia de calor por convección
$\sum R$	Sumatoria de resistencias
$f$	Factor de fricción
St	Número de stanton
$W/m^2K$	Vatios por metro cuadrado por grados kelvin

## INTRODUCCIÓN

La Armada del Ecuador a cargo de la Dirección de Mantenimiento de la institución, con el propósito de brindar mantenimiento al escuadrón de submarinos nacionales SS – 11 “Shyri” y SS – 12 “Huancavilca” tipo U – 209 de fabricación alemana, considera el cambio inmediato de las baterías de propulsión instaladas en dichos submarinos, por haber cumplido su ciclo de vida.

Las unidades submarinas son de propulsión diesel – eléctricas, las baterías son las encargadas de suministrar la energía necesaria para propulsar y alimentar la red abordo.

Las baterías operan desde el año 1997 tiempo de operación hasta la fecha de 11 años, que sobrepasan el tiempo de vida útil que es de 10 años lo que requiere un reemplazo inmediato de las baterías.

Es por eso que las baterías de propulsión fueron adquiridas a través de la Junta de Defensa Nacional a la compañía alemana Hawker GMBH una

remesa de 960 baterías, estas son del tipo plomo – ácido, las baterías se someten a un proceso de carga y descarga cuando están montadas en el submarino, este proceso genera calor y producción de hidrógeno en el ambiente.

Para controlar la generación de calor existe en el submarino un sistema de enfriamiento utilizando agua del mar, las baterías nuevas adquiridas no vienen activadas de fabrica para evitar problemas de danos y eliminar riesgos durante el viaje hasta las instalaciones de la Armada Nacional, es por eso que la institución a dispuesto un lugar estratégico donde se va a proceder a la construcción del sistema de activación de las baterías lo que conlleva a realizar trabajos preliminares para la puesta en marcha de estos equipos.

Como este proceso tiene que ser realizado en tierra, la Armada del Ecuador convoca a diferentes empresas para licitar en el diseño, construcción y montaje de un sistema de enfriamiento de agua que va a ser utilizada en la activación de 120 baterías a la vez.

ERMARLO S.A. empresa en la cual me desenvolvía en el departamento de proyectos, fue adjudicada la licitación, y fue asignado el proyecto de diseño y construcción del sistema de enfriamiento el cual es el objetivo de esta tesis.

Se utilizaran varios programas computacionales como Inventor 10, ESP plus con el fin de utilizarlos en la práctica con mayor destreza para solucionar problemas.

# CAPITULO 1

## 1. GENERALIDADES

### 1.1. Descripción del Sistema de Poder de los Submarinos.

A fin de clarificar ciertos aspectos importantes para comprender el sistema de propulsión de los submarinos se realizará una breve descripción generalizada de este tipo de buque.

El submarino tipo U – 209 es un buque diseñado exclusivamente para operar bajo el agua, esta afirmación puede parecer redundante, pero es necesaria para diferenciar los submarinos modernos de los usados durante la primera y segunda guerras mundiales que era propiamente

“sumergibles”, es decir los buques con capacidad de permanecer periodos relativamente cortos bajo la superficie, esto explica el diseño de estos con cañones en cubierta para la defensa aérea y de superficie.

Hasta la llegada de la [propulsión nuclear marina](#), la mayoría de los submarinos del siglo XX usaron [baterías eléctricas](#) para la navegación subacuática y [motores de combustión interna](#) para la superficie y recargar las baterías. Los primeros modelos usaban [gasolina](#) como combustible pero pronto se sustituyó por [parafina](#) y luego [gasóleo](#) gracias a su menor inflamabilidad. La combinación diesel-eléctrico se convertiría en el medio de propulsión estándar. Inicialmente el motor diesel o gasolina y el eléctrico, separados por [embraques](#), estaban en el mismo eje e impulsaban el propulsor. Esto permitía que el primero usase al segundo como generador para recargar las baterías e impulsar también al submarino si era necesario. Cuando el submarino se sumergía, se desembragaba el motor diesel de forma que se usase el eléctrico para girar la hélice. El motor eléctrico puede tener más de un [inducido](#) sobre el eje, estando eléctricamente acoplados en serie para velocidades bajas y en paralelo para velocidades altas.

## 1.2. Características Principales del Submarino U – 209.

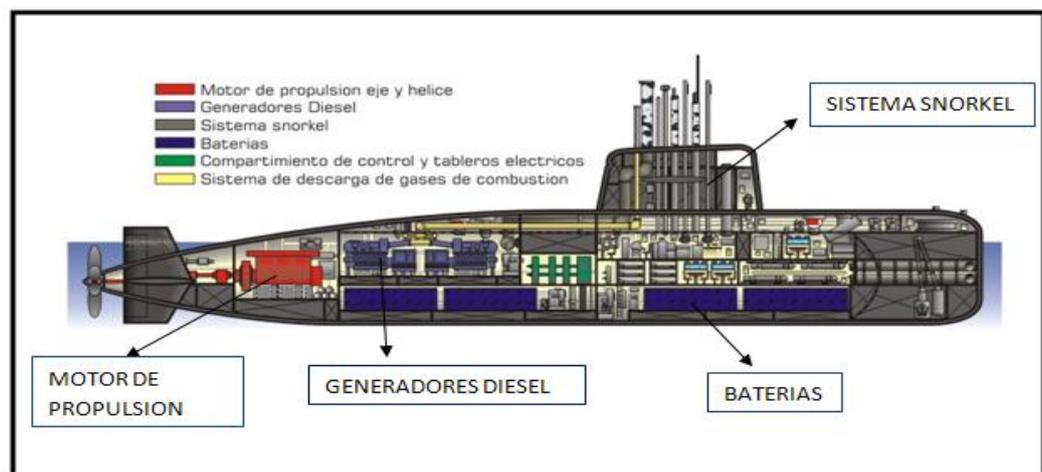
<b>Desplazamiento (sumergidos)</b>	<b>1285 Ton</b>
<b>Dimensiones</b>	<b>55.9 *6.3*5.5 m</b>
<b>Propulsión</b>	<b>4 MTU MD 12V992 Tb 90 diesel de 600 CV, un Siemens eléctrico de 5000 CV y 4 generadores eléctricos de 405 Kw</b>
<b>Tipo</b>	<b>Submarino diesel eléctrico de ataque SSK</b>
<b>Astillero de origen</b>	<b>Howaldtswerke, Kiel, Alemania</b>
<b>Desplazamiento</b>	<b>1265 ton (superficie) 1396 ton (inmersión)</b>
<b>Casco</b>	<b>Acero naval reforzado</b>
<b>Celdas</b>	<b>480 de 11500 Amp – h y un peso total de 257 ton</b>
<b>Combustible</b>	<b>108 ton</b>
<b>Profundidad máxima</b>	<b>500 metros</b>
<b>Armamento</b>	<b>553 mm torpedos en tubos (14) misil Sub-</b>

	Harpoon
Tripulación	33

**TABLA 1.1. Características técnicas del submarino U – 209**

El submarino posee 4 baterías de 120 celdas cada una.

Cada celda está diseñada para almacenar cargas con voltajes que no exceden los 2.75 voltios de corriente continua. Las 120 celdas están conectadas en serie, esto para cada batería.



**FIGURA 1.1. PARTES CONSTITUTIVAS DEL SUBMARINO U -209**

### 1.3. Proceso de Carga y Descarga de las Baterías en el Submarino.

Para activar las baterías antes de ser puestas en operación se requiere que se cumpla un determinado procedimiento el cual implica periodos de carga y descarga de acuerdo a un plan establecido.

### **1.3.1. Análisis del Sistema Operativo de las Baterías.**

El suministro de energía eléctrica dentro del buque tiene un solo responsable, estas son las celdas del buque.

Primeramente entiéndase por celdas al elemento unitario de energía eléctrica del buque, que básicamente es un acumulador de plomo y ácido o pila secundaria, que puede recargarse invirtiendo la reacción química.

La celda electrolítica que describiremos a continuación el acumulador de plomo.

Estos acumuladores constan de una serie de placas de plomo dispuestas una al lado de la otra y separadas entre sí por medio de los separadores.

Las placas son unas rejillas rectangulares en las que se efectúa una transformación de energía química en eléctrica o viceversa, según se descargue o cargue repetidamente el acumulador.

Existen dos clases de placas: las positivas constituidas a base de peróxido de plomo, cuyo color es negrozco y las negativas constituidas de plomo combinado con materiales inertes que no intervienen en la transformación, generalmente antimonio. Al peróxido de plomo y al plomo que componen las placas se les denomina materia activa del acumulador.

Las placas positivas están conectadas eléctricamente entre sí mediante una barra o lámina metálica, denominada puente de unión. Lo mismo ocurre para las placas negativas. Sobre ambos puentes se hallan los bornes del acumulador, uno positivo y otro negativo.

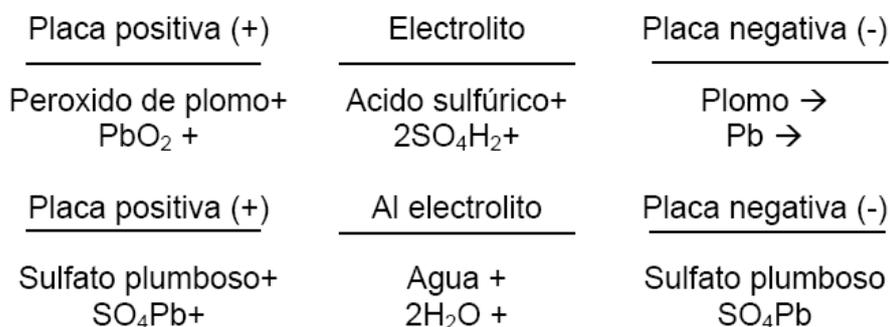
El conjunto de placas positivas y negativas alternadas, se encuentran sumergidas en agua acidulada, que es una mezcla de ácido sulfúrico y agua, que hace las veces de electrolito.

En las condiciones hasta ahora descritas, el acumulador se halla cargado, es decir que si entre sus bornes conectamos un consumidor, por ejemplo una lámpara, por ella circula corriente y por tanto se encenderá; ello es debido a que entre sus placas de peróxido de plomo y de plomo existe una diferencia de potencial capaz de producir corriente eléctrica, cuando circula esta corriente a través de un consumidor, el acumulador se está descargando.

Durante dicha descarga para la corriente desde la placa positiva a la negativa por el por el receptor o consumidor exterior a la batería y por el interior desde la placa negativa a través del electrolito a la placa positiva.

Al pasar la corriente por el electrolito se descompone la molécula del ácido sulfúrico en dos iones ( $\text{SO}_4^-$ ) y ( $2\text{H}^+$ ), con cargas negativas y positivas respectivamente, que reaccionan formando en la placa positiva peróxido de plomo ( $\text{PbO}_2$ ), mas agua en el recipiente. Esta agua se genera porque el oxígeno liberado de la placa positiva del peróxido de plomo se combina con el hidrógeno descompuesto del ácido sulfúrico.

De la misma manera se forma sulfato plumboso en la placa negativa y agua en el recipiente. La reacción de la descarga la podríamos resumir así:



A medida que se va descargando la concentración de ácido sulfúrico en el electrolito va disminuyendo lo que origina que sea menos conductor, provocando este fenómeno un aumento de la resistencia interior en el elemento, lo que produce una caída de tensión tan grande que deja la batería fuera del servicio útil.

Cuando ha sido atacado todo el peróxido de plomo y todo el plomo cesa la transformación y con ella la corriente eléctrica, el acumulador descargado, incapaz de producir más corriente eléctrica.

Si estando el acumulador descargado, aplicamos en sus bornes una diferencia de potencial se producirá la electrólisis del agua contenida en el recipiente y las transformaciones que habrán tenido lugar durante la descarga se invertirán, es decir, en las placas positivas se transformara el sulfato plumboso en peróxido de plomo y ácido sulfúrico, y en las negativas en plomo y ácido sulfúrico, con lo que el acumulador quedara nuevamente cargado y con la facultad de poder suministrar de nuevo corriente eléctrica.

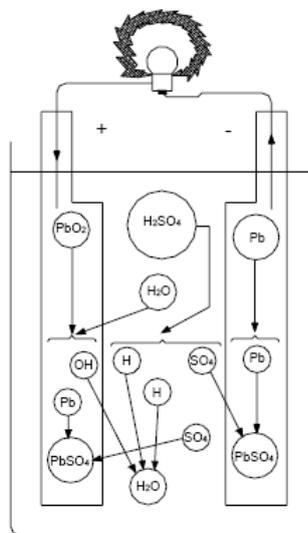
La reacción de carga se habrá efectuado así:

<u>Placa positiva (+)</u>	<u>Electrolito</u>	<u>Placa negativa (-)</u>
Sulfato plumboso+ $\text{SO}_4\text{Pb}+$	Agua + $2\text{H}_2\text{O} +$	Sulfato plumboso→ $\text{SO}_4\text{Pb} \rightarrow$
<u>Placa positiva (+)</u>	<u>Al electrolito</u>	<u>Placa negativa (-)</u>
Peroxido de plomo+ $\text{PbO}_2 +$	Acido sulfúrico+ $2\text{SO}_4\text{H}_2+$	Plomo Pb

Estos fenómenos químicos se llevan a cabo en el interior del acumulador se va intentar representarlos por una serie de figuras. Por ejemplo en la Figura 1.2. Se tiene una aproximación a un esquema de reacción química durante la descarga del acumulador. La lámpara representa el aparato consumidor que está recibiendo energía eléctrica en este momento. En el interior del acumulador se están descomponiendo del modo que indican las flechas, las moléculas de cada uno de los componentes de las placas conjuntamente y en colaboración con el electrolito y su composición química.

Obsérvese como en la parte baja de las placas se produce la presencia del sulfato de plomo ( $\text{PbSO}_4$ ) que es el indicio claro de la descarga. (En este esquema se mantiene el sentido electrónico de la corriente, es decir, el paso del negativo al positivo tal como ocurre en la realidad aunque se ha aceptado convencionalmente la inversa).

La descarga total del acumulador llegaría a producirse cuando ambas placas se hallaran saturadas de sulfato de plomo y el electrolito fuera prácticamente formado por agua destilada. La luz dejara de brillar en señal evidente de la falta de energía eléctrica.

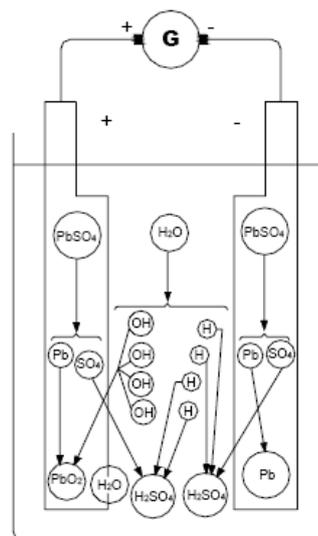


**FIGURA 1.2. ESTADO DE DESCARGA DE UN ACUMULADOR**

El proceso de carga podemos verlo en la Figura 1.3. La colocación de un generador de corriente continua entre los bornes del acumulador hace que la corriente circule entre placas y electrolito. Tal como puede verse en la parte alta de las placas, la presencia del sulfato plumboso (PbSO<sub>4</sub>) es general, lo que indica su estado de descarga; pero al paso de la corriente eléctrica proveniente del generador activa una reacción química en la que de nuevo ácido sulfúrico se recompone. Poco a poco la placa negativa recobra su

plomo inicial y la positiva su peróxido de plomo mientras el electrolito aumenta su densidad por encima de los valores casi del agua que tenía en el estado totalmente descargado, debido a su enriquecimiento de ácido sulfúrico [13].

Estas son pues, las transformaciones químicas mediante las cuales es posible convertir energía eléctrica en energía química y viceversa.



**FIGURA 1.3. ESTADO DE CARGA DE UN ACUMULADOR [13]**

### 1.3.2. Características de las Baterías

A pesar de su diversa constitución, todas las baterías pueden ser definidas mediante unas características comunes que se consideran seguidamente:

- **Resistencia interna.**- Formada por la resistencia óhmica de sus componentes (terminales, electrodos, soportes y electrolito) y por una resistencia virtual variable en función del estado de carga y de las distintas polarizaciones y concentraciones. Aumenta con las bajas temperaturas, con la descarga de la batería y con el envejecimiento.
- **Rendimiento.**- Es la relación entre la energía suministrada durante la descarga y la que se necesita para cargar plenamente la batería. Las pérdidas en una batería se deben sobre todo a una producción de energía calorífica en los procesos químicos que tienen lugar durante la carga y descarga.
- **Velocidad de carga y descarga.** - Las corrientes de carga y descarga a menudo se especifican con unos términos que indican la descarga completa en un período continuo de una hora. Estos términos son los regímenes C y sus múltiplos y submúltiplos son un medio muy cómodo para especificar las velocidades de carga y descarga. Por tanto, 10C es la corriente que descarga la batería en seis

minutos, mientras que  $C/10$  es la corriente que descarga la batería en diez horas.

- **Vida útil.** - La vida útil de una batería no se mide en años, sino por la cantidad de ciclos de carga - descarga que es capaz de realizar. Así, si se la somete a un régimen de trabajo de muchos ciclos diarios, probablemente sólo durará unos meses, mientras que si el régimen es de un ciclo al día o incluso más lento (como ocurre en el caso de iluminación de viviendas con energía solar) la batería puede durar al menos diez años.

### 1.3.3.

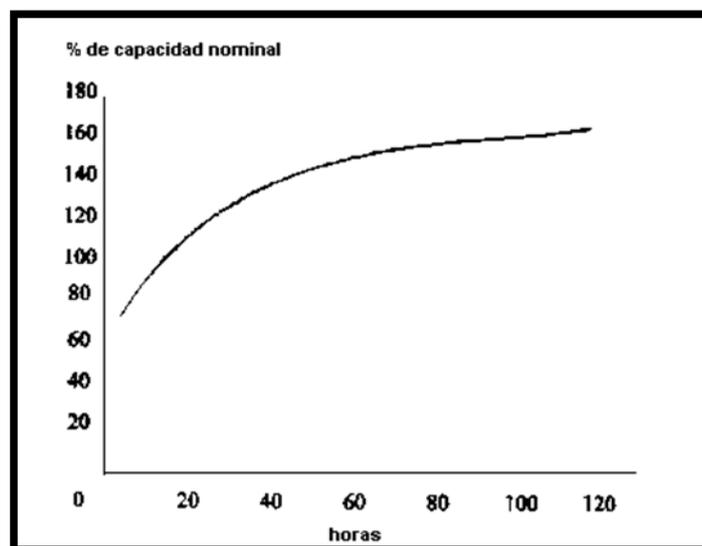
#### Capacidad de una Batería

Es la cantidad de electricidad que puede entregar cuando se descarga antes de que su tensión disminuya por debajo de un nivel mínimo. Su símbolo es  $C$  y se expresa en  $A \cdot h$ . Otro factor que también puede influir en la vida útil de una batería es la temperatura. Si es demasiado alta, la reacción química que tiene lugar en el acumulador se acelera demasiado y la vida se acorta. Si la temperatura es baja, la vida se prolonga, pero si baja demasiado puede correr el riesgo de congelación. En este caso, lo mejor será mantener la batería en un nivel de

carga alto, ya que cuanto mayor sea la concentración del electrolito el punto de congelación será más bajo.

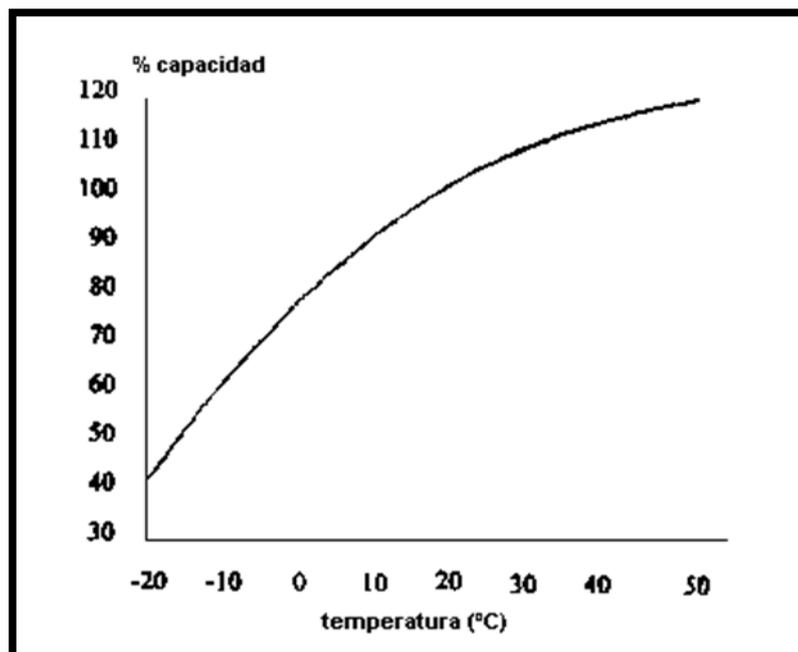
La capacidad de una batería varía según el régimen de descarga: aumenta a medida que la descarga es más lenta, y disminuye cuando esta es más rápida.

Por esta razón, el valor de C debe venir referenciado con el tiempo de descarga.



**FIGURA 1.4. VARIACION DE LA CAPACIDAD SEGÚN REGIMEN DE DESCARGA [13]**

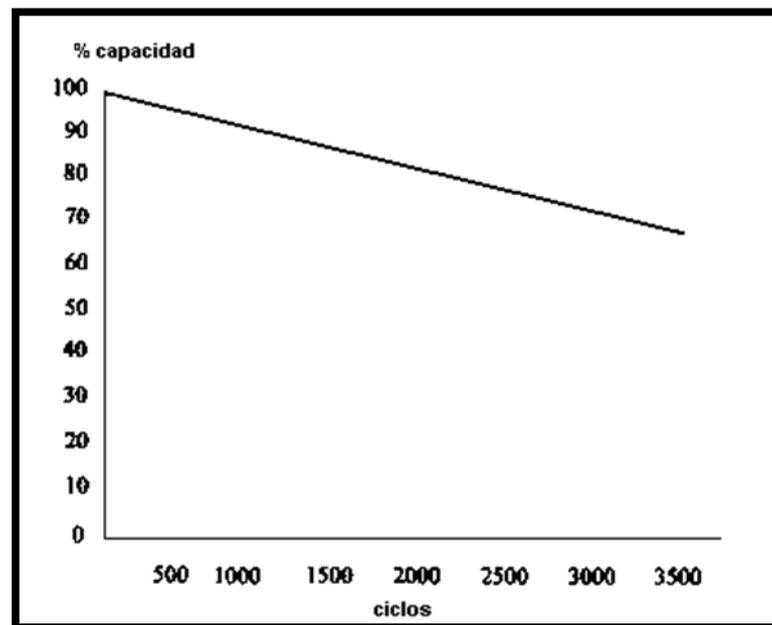
Un incremento de la temperatura, dentro de unos límites, aumenta la actividad de los procesos químicos y, por lo tanto, la capacidad de la batería. Por el contrario, a bajas temperaturas la actividad química es menor y la capacidad disminuye considerablemente.



**FIGURA 1.5. VARIACION DE LA CAPACIDAD SEGÚN LA TEMPERATURA [13]**

La historia de la batería afecta también a la capacidad. Si una batería lleva un largo período sin ser recargada en toda su capacidad se produce un efecto memoria que impide que recupere su capacidad nominal, siendo necesarios varios ciclos de carga y descarga para recuperarla. El envejecimiento de una batería merma su capacidad y va disminuyendo a lo largo de su vida en función del servicio de carga - descarga a que sea sometida. Para el cálculo de la capacidad nominal necesaria hay que tener en cuenta la vida útil que se desea para la batería: si se desea una vida útil de

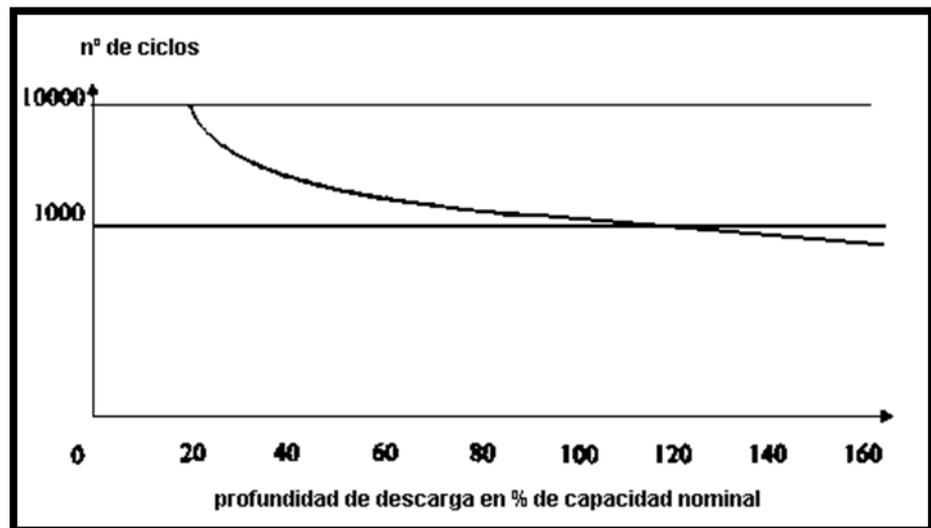
3 años y el fabricante indica que al final de este período sólo se mantiene el 50% de la capacidad, habrá que utilizar una batería de capacidad doble a la estimada necesaria.



**FIGURA 1.6. VARIACION DE LA CAPACIDAD SEGÚN  
NÚMERO DE CICLOS [13]**

Además de los ciclos de carga - descarga, también hay que considerar la profundidad de la descarga media que se produce en cada uno de ellos. Si dicha descarga es moderada, y sólo de vez en cuando se alcanza una profundidad elevada, el número de ciclos que soportará las baterías será elevado. A medida que se la someta a descargas más profundas, el número de ciclos que podrá realizar, y por tanto su vida útil, irá disminuyendo. En

cualquier caso la profundidad de descarga máxima admisible para un acumulador plomo - ácido es del 80%.



**FIGURA 1.7. VARIACION DE LA VIDA UTIL EN FUNCION DE LA DESCARGA [13]**

Con un régimen de descarga diaria del 25% de su capacidad, y un 80% de descarga 2 veces al año (condiciones que normalmente se dan en una instalación fotovoltaica), la batería solar puede alcanzar una vida útil de más de 11 años.

Otro factor que también puede influir en la vida útil de una batería es la temperatura. Si es demasiado alta, la reacción química que tiene lugar en el acumulador se acelera demasiado y la vida se acorta. Si la temperatura es baja, la

vida se prolonga, pero si baja demasiado puede correr el riesgo de congelación. En este caso, lo mejor será mantener la batería en un nivel de carga alto, ya que cuanto mayor sea la concentración del electrolito el punto de congelación será más bajo.

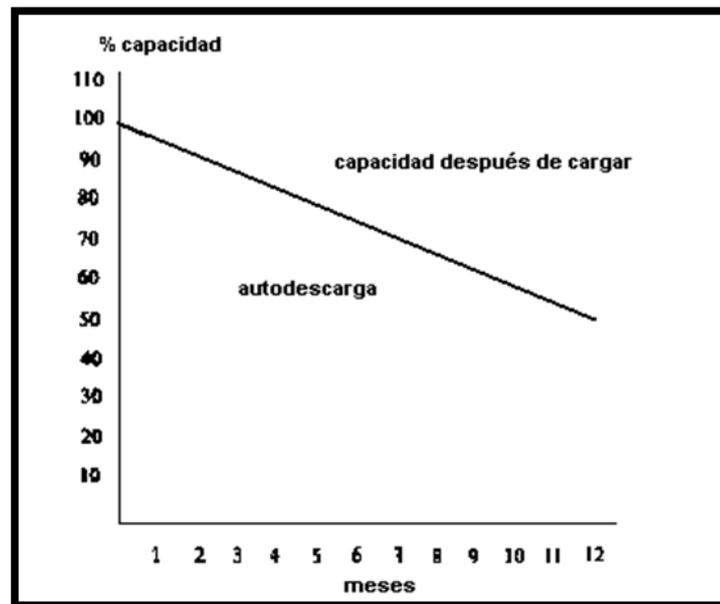
Las mayores formas de acortar la vida útil de un acumulador son:

- someterlos a cargas y descargas violentas y repetidas
- descargarlo hasta el agotamiento
- trabajar a temperaturas extremas

#### **1.3.4. Autodescarga**

La autodescarga de una batería consiste en la pérdida de energía por reacción entre los materiales que forman los elementos de la batería en condiciones de circuito abierto, es decir, cuando no hay carga alguna conectada al circuito de la batería. Depende del tipo de batería y muy directamente de la temperatura, aumentando con esta. Por ello, y dado que los valores estándar suelen venir referidos a una temperatura

media (unos 20 ó 25°C) es preciso tener en cuenta que este factor puede alterarse en algunos casos.



**FIGURA 1.8. VARIACION DE LA CAPACIDAD POR AUTODESCARGA [13]**

La autodescarga hay que considerarla como un consumo adicional, que demanda un cierto porcentaje de energía almacenada. Su valor es aproximadamente de un 0,5 a un 1% diario en baterías plomo - ácido.

### 1.3.5. Almacenamiento

Los fabricantes suelen dar recomendaciones para el almacenamiento.

Mostramos las condiciones recomendadas para aplicaciones solares

en la tabla siguiente:

Tipo de batería	Rango de temperatura	Humedad	Período de almacenamiento con electrolito	Período de almacenamiento sin electrolito
Plomo-ácido	-20 °C a +40 °C	< 95 %	sobre 0,5 año	1 - 2 años (carga seca)
Níquel-Cadmio	-40 °C a +50 °C	< 95 %	sobre 0,5 año	1 - 5 años (vacía)

**TABLA 1.2. PARAMETROS DE ALMACENAMIENTO [18]**

Las baterías almacenadas llenas y cargadas requieren un periodo de recarga antes de su instalación. El fabricante debe proporcionar las instrucciones acerca de los intervalos y métodos en los que debe efectuarse.

La exposición a alta temperatura y humedad durante el almacenamiento puede ocasionar una pérdida de capacidad. La temperatura de una batería guardada en un recipiente expuesto a la luz directa del sol, puede subir a 60 °C o más durante el día.

### 1.3.6. Principales Métodos de Carga

La vida útil de una batería y sus prestaciones dependen directamente de los procesos de carga a los que es sometida. Por esta razón hay que seguir en cada caso las recomendaciones que da el fabricante.

Los principales métodos de carga son:

1. Tensión constante
2. Corriente constante
3. Corriente descendente
4. Dos niveles de tensión constante

#### **Tensión constante**

El método de carga a tensión constante es el más usado para cargar baterías de plomo - ácido. Consiste en aplicar una tensión constante de 2.3, 2.4 ó 2.5 V/elemento, limitando la corriente inicial de carga a  $0.1C$  ó  $0.2 C$  amperios, siendo  $C$  la capacidad de la batería en amperios - hora. El tiempo de carga va de 40 horas a 10 horas y la tensión debe regularse según la temperatura ambiente si la temperatura es alta, la tensión de carga debe ser baja y viceversa.

Algunos fabricantes admiten la utilización de este método sin limitación de corriente, pues sus baterías están dimensionadas para fuertes corrientes. En este caso, si se inicia el proceso con 2.3V/elemento, la corriente inicial después de una descarga profunda será de 3C amperios y de un 0.5C durante un período largo.

### **Corriente constante**

El método de carga a corriente constante es recomendado por algunos fabricantes para las baterías de níquel - cadmio, limitando la corriente entre 0.25C y 0.05C amperios. En el caso de carga profunda se admiten corrientes de 1C amperios, pero vigilando la tensión de la batería o la temperatura.

La carga a corriente constante se utiliza como carga de igualación en baterías plomo - ácido para corregir diferencias de capacidad entre las baterías de un mismo grupo. Para evitar una sobrecarga que destruya la batería es necesario terminar cuando la batería alcance su máxima capacidad.

### **Corriente descendente**

Es el sistema de carga más económico y es utilizado por algunos fabricantes para sus baterías níquel - cadmio. Consiste en una carga sin regulación limitada por una resistencia serie, que en algunos casos es la propia resistencia del devanado del transformador de alimentación. A medida que la batería se va cargando, la corriente de carga va descendiendo gradualmente. Es un método antiguo y muy peligroso porque la tensión y corriente de carga dependen de las fluctuaciones de la corriente de la red, con lo que existe riesgo implícito de sobrecarga.

### **Dos niveles de tensión constante**

Es el método recomendado para cargar una batería de plomo - ácido hermética en un período corto de tiempo y mantener la batería en plena carga en situación de flotación. Inicialmente se carga a un nivel alto de tensión (2.45V/elemento), limitando la corriente. A partir de que esta disminuya por debajo de un nivel, se pasa a tensión constante permanente o de flotación. Este método es el más eficiente pues minimiza el tiempo de carga y la batería queda protegida de sobrecargas.

Después de una descarga profunda es necesario un tiempo de carga más largo de lo normal. Inicialmente la corriente que admite la batería es baja, ya que la resistencia interna tiene un valor elevado y no adquiere su valor normal hasta pasados unos 30 minutos. Por este motivo es necesario inhibir el control durante este período de tiempo, pues el cargador podría suponer que la batería está cargada y dejarla en flotación.

### **1.3.7. Control de Carga**

Para mantener el rendimiento óptimo de una batería es esencial que su carga se controle adecuadamente. Al comienzo del ciclo de carga la corriente debería limitarse para asegurar que no se produzca generación de gases a causa de un voltaje excesivo aplicado al vaso; mientras la capacidad se recupera, la corriente de carga debe limitarse para mantener el voltaje de los vasos en el umbral requerido para la generación de gases o ligeramente inferior; una vez recuperada la plena capacidad se debería aplicar una carga final a corriente constante por un período de tiempo fijo (carga de igualación). Aunque estas condiciones no puedan lograrse prácticamente en los sistemas de energía fotovoltaica, hay ciertas

circunstancias que se necesitan para minimizar el mantenimiento y mantener la vida de la batería. Los parámetros del regulador tendrán en cuenta los efectos del diseño del generador fotovoltaico, la carga, la temperatura y los valores límite recomendados para proteger la batería. Las de plomo-ácido o de níquel-cadmio tendrán el electrolito suficiente para cubrir el período entre, por lo menos, las visitas de mantenimiento planificadas [13].

La sobrecarga excesiva no aumenta la energía almacenada en la batería. En cambio, la sobrecarga afecta al intervalo de servicio debido al consumo de agua destilada en las baterías ácidas como resultado de la generación de gases. Para minimizar este efecto el voltaje de regulación de la carga debe compensarse con los cambios en la temperatura del electrolito, ya que esto afecta directamente al umbral de voltaje de generación de gases. Contrariamente a esto, la estratificación puede ocurrir en baterías de electrolito líquido, particularmente en sistemas fotovoltaicos donde la insolación es a menudo insuficiente para proporcionar generación de gases durante el funcionamiento normal. La estratificación se produce cuando capas menos densas de electrolito se depositan sobre capas más densas situadas en el fondo de los vasos, lo que produce una reducción de

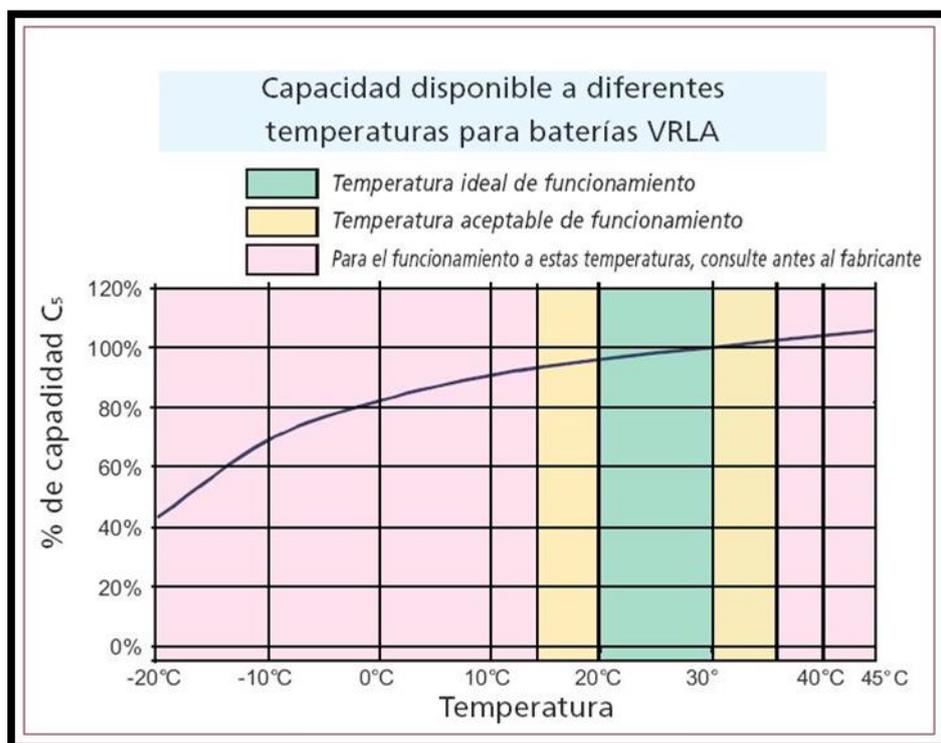
capacidad. Esto puede corregirse con la agitación que se produce durante el proceso de gasificación. Por consiguiente, el proceso de regulación de carga debe diseñarse para promover la generación de gases a intervalos regulares. Esto puede lograrse elevando el voltaje de control de carga durante un período y restableciéndolo una vez que se ha producido la generación de gases.

### **1.3.8. Administración de la Temperatura en las Baterías**

#### **Limites de temperatura de operación**

Todas las baterías dependen para su funcionamiento de un proceso electroquímico ya sea en carga o descarga y sabemos que estas reacciones químicas son en alguna manera dependientes de la temperatura. La capacidad nominal de una batería se especifica usualmente en algún punto dentro del rango de trabajo entre +20°C hasta +30°C (+68°F ~ +86°F) sin embargo la capacidad real puede desviarse substancialmente del valor nominal, si la batería es forzada a trabajar a mayores o menores temperaturas (Figura 1.8.). La Ley de Arrhenius dice que la velocidad a la cual una reacción química se produce, incrementa exponencialmente según la temperatura aumenta. Esto permite que se extraiga mayor potencia de la batería en un instante a mayores temperaturas que la de trabajo. Al mismo tiempo, las mayores temperaturas aumentan la movilidad de los electrones o iones, reduciendo así la impedancia interna de la celda por consiguiente aumentando su capacidad. Sin embargo, en el extremo superior de la escala, las altas temperaturas pueden también iniciar reacciones químicas no deseadas o irreversibles y/o pérdida de electrolito lo cual puede causar un daño permanente o falla completa de la batería. En el extremo inferior de la escala el electrolito se puede congelar, fijando un límite

para la capacidad a bajas temperaturas. Por debajo del punto de congelamiento del electrolito, la capacidad de la batería comienza a deteriorarse según la velocidad de la reacción química se reduce. Aún cuando una batería esté especificada para trabajar bajo los  $-20^{\circ}\text{C}$  ó  $-30^{\circ}\text{C}$  la capacidad a  $0^{\circ}\text{C}$  y por debajo de este punto disminuye considerablemente. Debemos tomar en cuenta que, el límite inferior de temperatura de trabajo de una batería puede depender de su estado de carga. Un sistema real puede por lo tanto necesitar ambos, calentamiento y enfriamiento ambiental forzado, para mantenerlo no sólo dentro de los rangos límite de trabajo especificado por el fabricante, sino dentro de un rango más limitado para alcanzar desempeño óptimo.

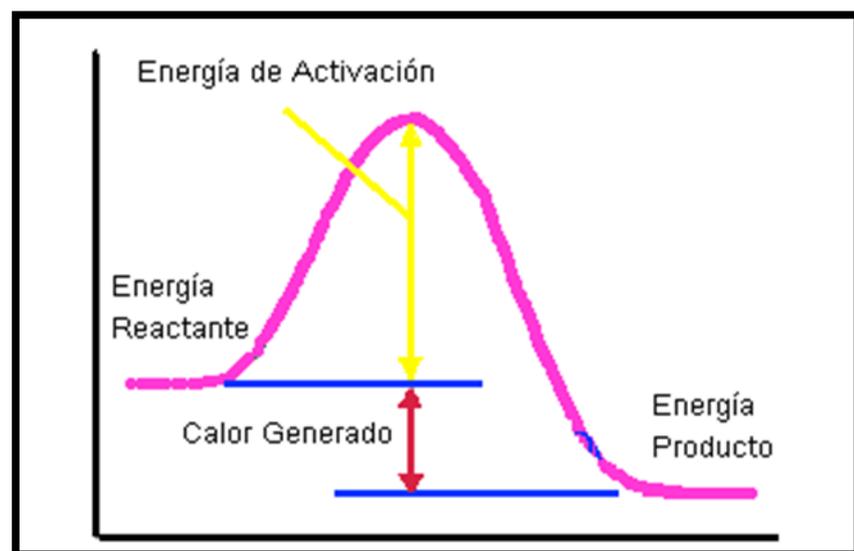


**FIGURA 1.8. CAPACIDAD DE CARGA DE BATERIAS PLOMO – ACIDO A DIFERENTES TEMPERATURAS**

**Efectos térmicos externos**

Efectos térmicos externos La condición térmica de la batería es también dependiente de su ambiente. Si su temperatura está sobre la temperatura ambiente, perderá calor por efecto de la conducción, convección y radiación. Si la temperatura ambiente es mayor, la batería absorberá calor de sus alrededores.

Cuando la temperatura ambiente es muy alta, el sistema de manejo de la temperatura debe trabajar muy duro para mantener la temperatura bajo control. Una sola celda puede trabajar muy bien a la temperatura ambiente de una sala por sí sola, pero si es parte de un paquete de baterías rodeada de celdas similares todas generando calor, aún si la carga es la misma para todas, podría exceder sus límites de temperatura.



**FIGURA 1.9. REACCION EXOTERMICA**

## **CAPITULO 2**

### **2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

Las unidades navales de la Armada del Ecuador dentro de los escenarios en tiempo de paz y conflicto, una de sus principales funciones es de mantener los equipos y sistemas operativos, como parte fundamental en la operatividad, como parte de estas funciones la Dirección de Mantenimiento de la institución es la encargada de realizar el cambio de las baterías del Escuadrón de submarinos de que son las encargadas suministrar energía eléctrica a todo el submarino.

Se adquiere una remesa de 960 baterías nuevas para él los submarinos a la empresa alemana Hawker GMBH ya que es necesario se efectúe la remoción de las baterías por cuanto su tiempo de vida útil fue alcanzado en el año 2006, estos equipos vienen realizados sus pruebas de control de calidad, pero no vienen eléctricamente cargadas, por lo que se requiere realizar la operación de activación en tierra antes de ser puestas en los submarinos.

Para esto se requiere construir un sistema que permita la carga de 120 baterías a la vez. Como se analizó en el Capítulo 1, existen tres parámetros que se debe controlar en el momento de carga o activación de estos elementos que son:

- Voltaje
- Corriente
- Temperatura

El parámetro de voltaje es necesario conocerlo para saber cuando las celdas necesitan recargarse o cuando una de las celdas esta averiada y tomar las acciones necesarias para continuar con el procedimiento de activación de los elementos.

El parámetro de la corriente es necesario conocerlo para saber qué cantidad de energía eléctrica está entregando o recibiendo las celdas, y de esta manera conocer los amperios – hora que está recibiendo las celdas.

El parámetro de temperatura es crítico y es el parámetro que esta tesis está encargada de controlar en este proceso de activación ya que se desprende hidrogeno y sabiendo que el hidrogeno es un gas inflamable y que al combinarse con el oxigeno en un determinado porcentaje es detonante, por este motivo se debe tener estricto control en la temperatura de las celdas y de la concentración de hidrogeno en el área de activación

El resultado de los efectos termo-eléctricos y termo-químicos, posiblemente aumentados por las condiciones ambientales es generalmente un aumento en la temperatura y como se dijo anteriormente esto provocará un incremento exponencial en la velocidad a la cual la reacción química se da. También sabemos que si el aumento de temperatura es excesivo muchas cosas desagradables pueden suceder:

- Los químicos activos se expanden causando que la celda se “hinche”
- Distorsiones mecánicas en los componentes de la celda pueden provocar corto circuitos o circuitos abiertos.

- Pueden darse reacciones químicas irreversibles las cuales causarán una reducción permanente en los químicos activos y por lo tanto en la capacidad de la celda.
- Operación prolongada a altas temperaturas puede causar roturas en partes plásticas de la celda.
- Se expelerán muchos gases de la celda, debido a lo cual aumenta la presión dentro de esta, lo que puede llevar eventualmente a una ruptura o explosión de la misma.
- Se podrían liberar químicos tóxicos o inflamables.

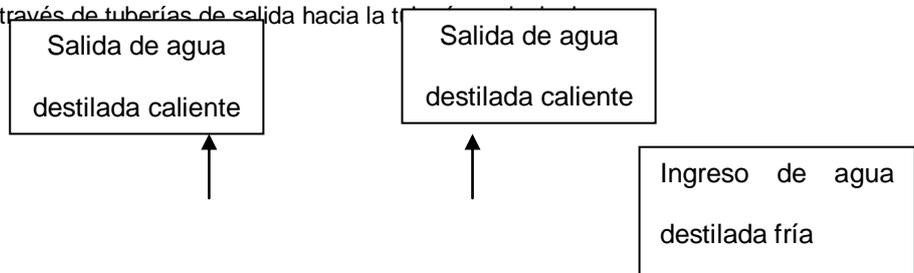
## **2.1. Requerimientos para el Proceso de Enfriamiento de las Baterías de los Submarinos**

Las baterías son colocadas en un cuarto de activación designado por la Armada del Ecuador, este cuarto debe ser adecuado para colocar 240 baterías colocadas sobre plataformas de carga 4 unidades por plataforma en fila, cada batería debe ser enfriada de acuerdo a los parámetros especificados por el fabricante.



**FIGURA 2.1 TRABAJOS PRELIMINARES**

El enfriamiento de los elementos de la batería se consigue haciendo pasar el agua destilada a través de los polos negativos y positivos, que son huecos, pasando desde aquí a través de tuberías de salida hacia la t



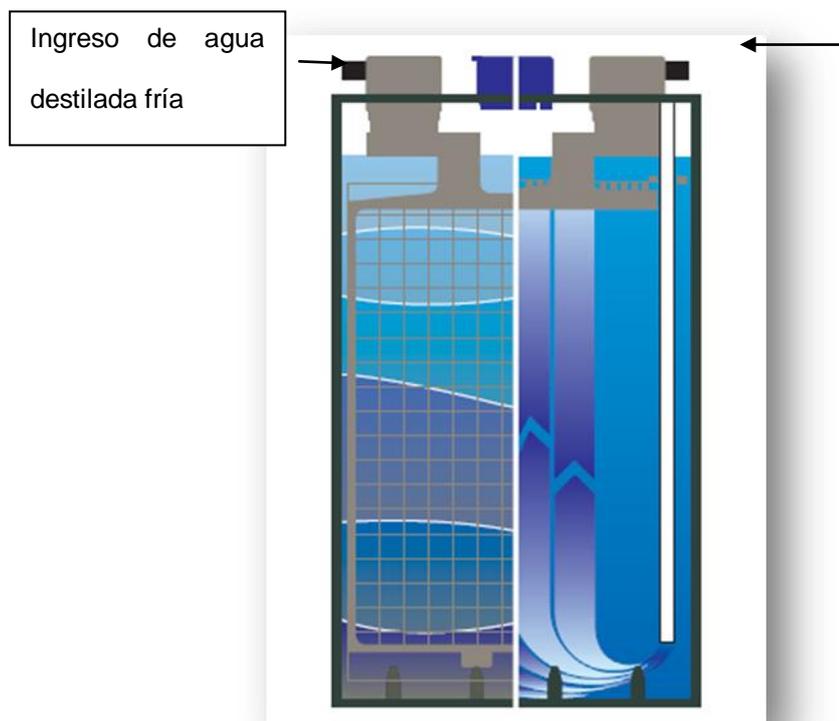


FIGURA 2.2. ESQUEMA DE ENFRIAMIENTO DE BATERIA POR MEDIO DE AGUA DESTILADA

## 2.2. Condiciones Técnicas para la Activación de las Baterías de Los Submarinos.

Por lo que debe cumplirse con los programas de carga y descarga, siendo la temperatura un parámetro a controlar principalmente en el periodo de carga.

Carga	10 h	590 A	5900 A-h
	40 h	435 A	17400 A-h

	4 h	Pausa	
	18 h	200 A	3600 A-h
<b>Descarga</b>	16 h	564 A	
<b>Carga aprox.</b>	31 h	Carga	Factor carga 1.25
	27	Cargar 2h	200 A/1h pausa
<b>Descarga</b>	20 h	564 A	
<b>Carga aprox.</b>	36 h	Cargar IUI	

**TABLA 2.1. PROGRAMA DE CARGA ELECTRICA PARA LA ACTIVACION DE LAS BATERIAS DE LOS SUBMARINOS**

### 2.3. Alternativas de Solución

Los procesos de enfriamiento del agua se cuentan entre los más antiguos que haya desarrollado el hombre. Por lo común el agua se enfría exponiendo la superficie al aire. Algunos de estos procesos son lentos, como el enfriamiento del agua en la superficie de un estanque, otros son comparativamente rápidos, por ejemplo, el rociado de agua hacia el aire, todos estos procesos implican la exposición de la superficie del agua al aire en diferentes grados.

Al enfriar agua es importante tener en cuenta consideraciones que mejoraran al modo de enfriamiento del agua y que pueden significar un mayor rendimiento en el proceso industrial. Por esta razón los métodos de enfriamiento pueden ser mejorados en base a estudios preliminares que cumplen con las normas existentes.

El agua en estado puro no existe y dependiendo de la fuente de donde provenga contiene un sin número de impurezas, a continuación enlistaremos solo las que nos afectan en el tratamiento interno de los sistemas de enfriamiento.

<b>Constituyente</b>	<b>Formula Química</b>	<b>Dificultad de causa</b>
Dureza	Sales de Ca y Mg	Fuente principal de incrustaciones en tuberías
Acidez mineral	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
Libre	HCl	Corrosión
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	Corrosión en las líneas de agua
Sulfatos	SO <sub>4</sub>	Aumenta el contenido de sólidos en el agua. Se combina con calcio para formar sales incrustantes de sulfato de calcio
Cloruros	Cl como NaCl	Aumento el contenido de sólidos e incrementa el carácter corrosivo del agua
Sílice	SiO <sub>2</sub>	Incrustación en sistemas de agua de enfriamiento
Hierro	Fe +2 ferroso Fe +3 férrico	Fuente de depósitos en las tuberías
Oxígeno	O <sub>2</sub>	Oxidación en tuberías
Sulfuro de hidrogeno	H <sub>2</sub> S	Corrosión
Sólidos disueltos		Elevadas concentraciones de sólidos son indeseables debido a que originan formación de lodos.
Sólidos suspendidos		Originan depósitos en equipos intercambiadores de calor y tuberías ocasionan formación de lodos o incrustaciones
Microorganismos	Algas, limo y hongos	Formación de adherencia suciedad biológica, corrosión, olores desagradables

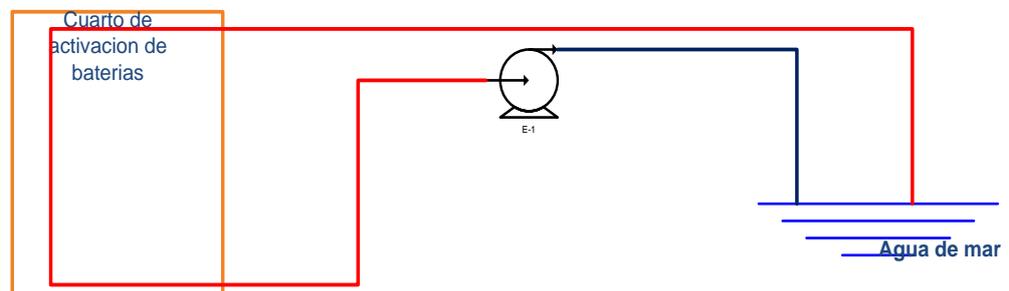
**TABLA 2.2. IMPUREZAS MAS COMUNES EN EL AGUA QUE AFECTAN LOS SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO.**

De acuerdo a las especificaciones indicadas anteriormente, principalmente se requiere remoción de calor de las baterías

mientras estas se encuentran en el proceso de activación en tierra para la cual se plantea algunas alternativas de varios sistemas de enfriamiento para posteriormente escoger la más óptima.

### 2.3.1. Sistema de enfriamiento directo

Las instalaciones donde se van a colocar las baterías para ser activadas están cerca del estero para lo cual se analizaran ventajas y desventajas de utilizar este sistema.



**FIGURA 2.3. ESQUEMA DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DIRECTO**

#### **Ventajas**

- Se tiene agua permanente y en gran cantidad tomada desde el estero.

- No se requiere instalaciones hidráulicas complicadas.

### **Desventajas**

- El agua que debe ingresar al sistema de enfriamiento de las baterías debe ser estéril, pero el agua del estero contiene cantidades apreciables de sales disueltas, lo que implica el que se tendría que pensar en una planta de tratamiento de agua.
- El agua caliente que sale como producto de la remoción de calor retorna al estero, se presenta el problema de contaminación térmica que puede ser tan grave como cualquier otra forma de contaminación, ya que el agua tibia estimula el crecimiento anormal de algas, que en cierto modo consume el oxígeno de uso animal.

### **2.3.2. Sistema de enfriamiento para Baterías de Submarino utilizando Intercambiadores Enfriados por Aire**

Consiste en una serie de tubos situados en una corriente de aire, que puede ser forzada con ayuda de un ventilador.

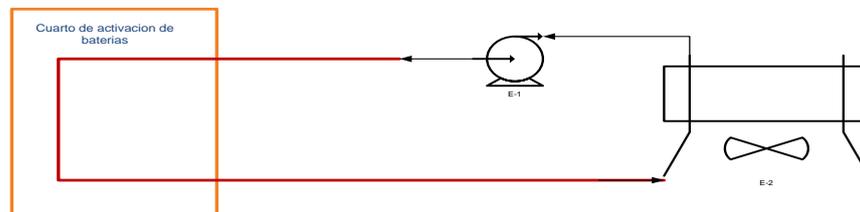
#### **Ventajas**

- Los tubos suelen tener aletas para aumentar el área de transferencia de calor.

- Pueden ser de hasta 12 m de largo y 2,5 a 5 m de ancho.
- Un intercambiador de aire, tiene una diferencia de temperatura de unos 12 °C.

### Desventajas

- En un intercambiador de calor enfriado por aire hay que considerar gastos de enfriamiento del agua es relativamente caro.



**FIGURA 2.4. ESQUEMA DE SISTEMA DE ENFRIAMIENTO UTILIZANDO INTERCAMBIADORES ENFRIADOS POR AIRE**

### 2.3.3. Sistema de Enfriamiento de Baterías de Submarino Utilizando Chiller

Un Chiller (o enfriador de agua) es un aparato industrial que produce agua fría para el enfriamiento de procesos industriales. La idea consiste en extraer el calor generado en un proceso por contacto con agua a una temperatura menor a la que el proceso finalmente debe quedar. Así, el proceso cede calor bajando su temperatura y el agua, durante el paso por el proceso, la eleva.

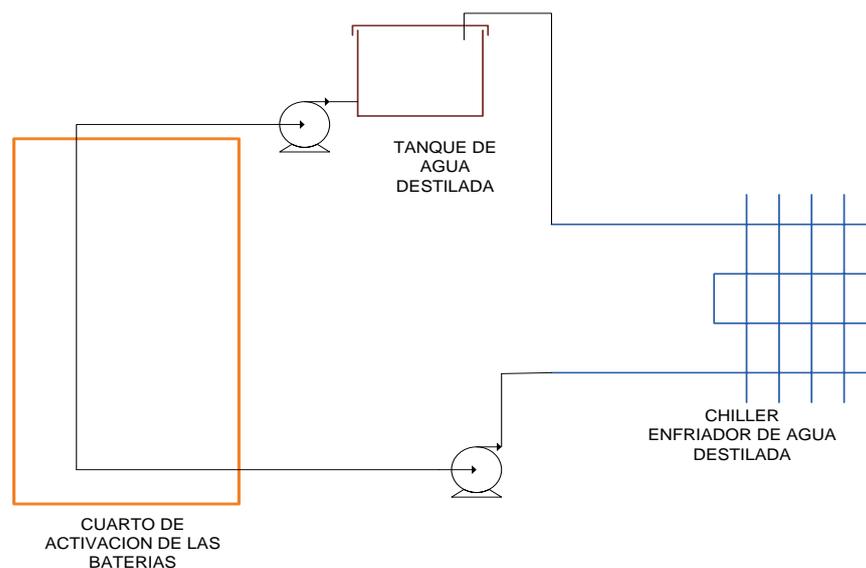
El agua ahora "caliente" retorna al chiller donde nuevamente se reduce su temperatura para ser enviada nuevamente al proceso.

### Ventajas

- El chiller es un sistema completo de refrigeración.
- Alimentación al sistema con diferentes caudales y presiones y temperaturas de agua.
- Alto rango de enfriamiento, inclusive temperaturas de congelación con adición de anticongelantes.

### Desventajas

- Mantenimiento costoso ya que incluye un compresor, un condensador, evaporador, válvula de expansión, refrigerante y tuberías.
- Consumo de energía.



**FIGURA 2.5. SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE BATERIAS PARA SUBMARINO UTILIZANDO UN CHILLER**

### 2.3.4. Sistema de Enfriamiento Utilizando Intercambiador de Calor y Torre de Enfriamiento.

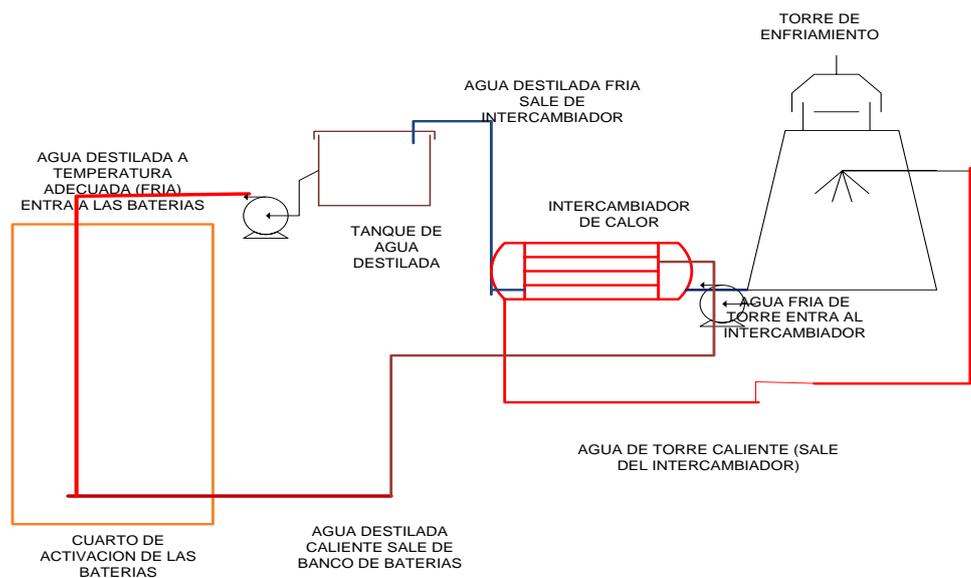
**Ventajas**

- Un intercambiador de calor es un equipo utilizado para enfriar un fluido que esta más caliente de lo deseado, transfiriendo este calor a otro fluido que esta frio y necesita ser calentado.
- La transferencia de calor se realiza a través de una pared metálica o de un tubo que separa ambos fluidos.
- Las torres para enfriamiento de agua son dispositivos cuya finalidad es extraer calor del agua a través del contacto directo con el aire.
- Las torres tienen múltiples aplicaciones, desde pequeñas instalaciones de aire acondicionado hasta en grandes complejos de generación de energía eléctrica.
- Se puede decir que su uso está justificado en sistemas que utilizan agua como medio refrigerante, donde sea necesario disipar grandes cantidades de calor a bajo costo y el salto de temperatura requerido sea del orden de 10°C.
- La Armada del Ecuador proporcionara el banco de tubos de un Intercambiador de Calor en desuso.

**Desventajas**

- Sistema ocupa mayor espacio físico.

- Tiempo de montaje relativamente largo.
- Sistemas sujetos a mayor corrosión.
- Alcanza diferenciales de temperatura bajos en relación a los otros sistemas.



**FIGURA 2.6. SISTEMA DE ENFRIAMIENTO UTILIZANDO INTERCAMBIADOR DE CALOR Y TORRE DE ENFRIAMIENTO**

#### **2.4. Selección de la Mejor Alternativa para el Sistema de Enfriamiento de las Baterías.**

Para la selección del sistema de enfriamiento para las baterías de los submarinos se utilizará una matriz de decisión de acuerdo a los parámetros descritos anteriormente tomando en cuenta las ventajas y las desventajas de cada sistema, se ha tomado en cuenta para esta operación los parámetros más significativos en el proceso de la solución del problema, asignando a cada uno un porcentaje de acuerdo a la importancia que este brinda para escoger la solución.

Para ingresar a la matriz a las alternativas se les reconocerá con sus iniciales.

- Sistema de enfriamiento directo: SED
- Sistema de enfriamiento utilizando Intercambiador enfriado por aire:

SEIEA

- Sistema de enfriamiento utilizando chiller: SECh
- Sistema de enfriamiento utilizando Intercambiador de calor y Torre de enfriamiento:

SEICTE

## Parámetros

1. Costos de los sistemas de enfriamiento:	3
2. Mantenimiento de equipos:	4
3. Cumple con especificaciones y requerimientos de la propuesta:	2
4. Facilidad para adquisición de equipos:	3
5. Durabilidad del sistema	1

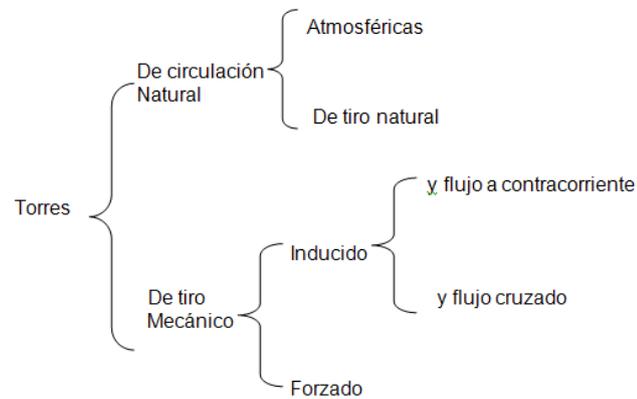
	1	2	3	4	5	Total
SED	2,5	2	0	1,5	0,5	6,5
SEIEA	1,5	1,0	1,0	1,0	0,5	5,0
SECh	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	4,5
<b>SEICTE</b>	<b>1,5</b>	<b>1,5</b>	<b>1,5</b>	<b>1,5</b>	<b>1,0</b>	<b>7,0</b>

**TABLA 2.3. MATRIZ DE DECISION**

De acuerdo a la matriz de decisión planteada la solución más adecuada es la propuesta del sistema de enfriamiento con intercambiador de calor y torre de enfriamiento.

Existen varias torres de enfriamiento que se podrían adaptar al sistema, a continuación se mencionaran cada una de estas para seleccionarla de por medio de otra matriz de decisión.

## 2.5. Torres de Enfriamiento y su Clasificación.



### 2.5.1. Torres de circulación natural

Estas no hacen uso de ventiladores para la circulación de aire, se clasifican en:

- torres atmosféricas
- torres de tiro natural

#### Torres atmosféricas

Sus características son las siguientes:

1. Utilizan las corrientes de aire de la atmósfera (son de flujo cruzado).
2. Son abiertas.
3. Deben instalarse en lugares muy despejados, de forma que ningún obstáculo pueda impedir la libre circulación de aire a través de la torre.
4. Tienen un costo inicial alto debido a su gran tamaño, pero el costo de mantenimiento es reducido, al no existir partes mecánicas móviles.
5. Se debe garantizar que funcionará habitualmente expuesta a vientos de velocidades iguales o superiores a los 8 km/h.
6. Si la velocidad promedio del viento es baja, los costos fijos y de bombeo aumentan mucho en relación a una torre de tiro mecánico y no compensan el ahorro del costo de ventilación. Actualmente, las torres atmosféricas están en desuso.

### **Torres de tiro natural**

Sus características son las siguientes:

1. El aire es inducido por una gran chimenea situada sobre el relleno.
2. La diferencia de densidades entre el aire húmedo caliente y el aire atmosférico es el principal motivo por el cual se crea el tiro de aire a través de la torre.
3. La diferencia de velocidades entre el viento circulante a nivel del suelo y el viento que circula por la parte superior de la chimenea también ayuda a establecer el flujo de aire.
4. Son altas y deben tener una sección transversal grande para facilitar el movimiento del aire ascendente.
5. Tienen bajos costos de mantenimiento y son muy indicadas para enfriar grandes caudales de agua.
6. Al igual que las torres atmosféricas, no tienen partes mecánicas.
7. La velocidad media del aire a través de la torre suele estar comprendida entre 1 y 2 m/s.
8. No es posible conseguir un valor de acercamiento pequeño y es muy difícil controlar exactamente la temperatura del agua.
9. En las torres de tiro -natural no se pueden utilizar rellenos de gran compacidad, debido a que la resistencia al flujo de aire debe ser lo más pequeña posible.
10. Estas torres son muy utilizadas en centrales térmicas; muy pocas veces son aplicables a plantas industriales debido a la fuerte inversión inicial necesaria.

#### **2.5.2. Torres de tiro mecánico**

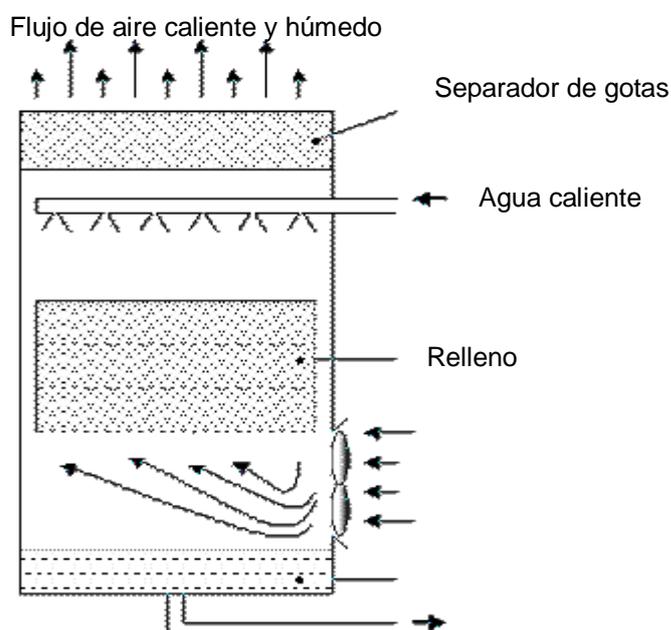
1. Proporcionan un control total sobre el caudal de aire suministrado.
2. Son torres compactas, con una sección transversal y una altura de bombeo pequeñas en comparación con las torres de tiro natural.
3. Valores de acercamiento muy pequeños (hasta de 1 a 2 °C, aunque en la práctica acostumbra a ser de 3 a 4 °C).
4. Si el ventilador se encuentra situado en la entrada de aire, el tiro es forzado.

5. Cuando el ventilador se ubica en la zona de descarga del aire, se habla de tiro inducido.

### Torres de tiro forzado

Sus características son las siguientes:

1. El aire se descarga a baja velocidad por la parte superior de la torre.
2. Son, casi siempre, de flujo a contracorriente
3. Son más eficientes que las torres de tiro inducido, puesto que la presión dinámica convertida a estática realiza un trabajo útil. El aire que se mueve es aire frío de mayor densidad que en el caso de tiro inducido.
4. El ventilador trabaja con aire frío y no saturado.
5. El equipo mecánico tendrá una duración mayor que en el caso de tiro inducido.
6. El inconveniente radica en la posibilidad de recirculación del aire de salida hacia la zona de baja presión, creada por el ventilador en la entrada de aire. En la siguiente figura se puede observar la distribución de sus partes constituyentes.



Flujo de aire frío no saturado

Bandeja colectora

————— Agua fría

**FIGURA 2.7. TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO FORZADO**

### **Torres de tiro inducido**

Estas torres son de gran importancia a nivel industrial, son solución económica a los requerimientos de enfriamiento; pueden ser de dos tipos:

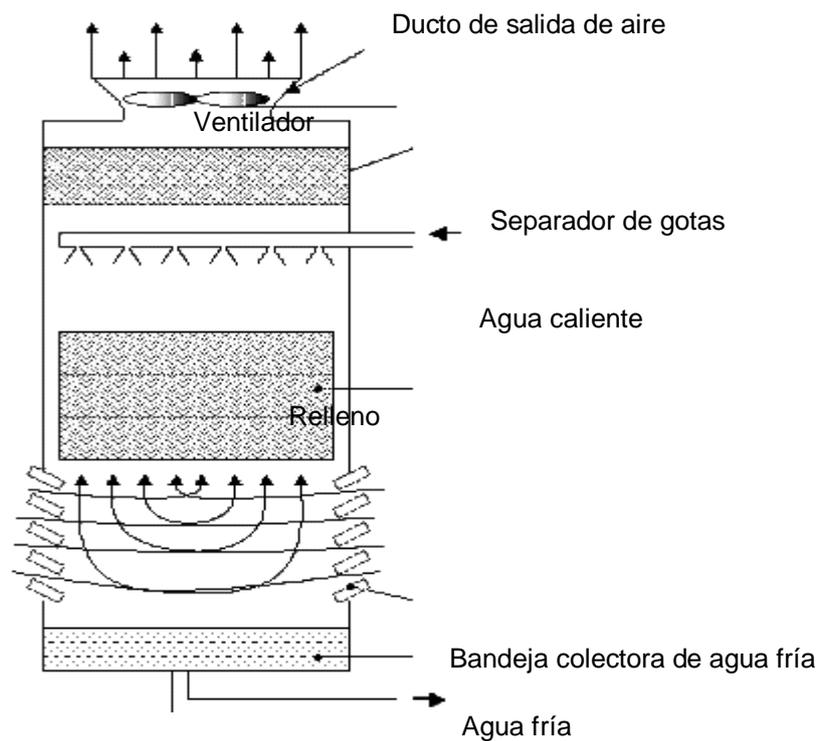
- De flujo a contracorriente.
- De flujo cruzado.

### **Torres de tiro inducido y flujo a contracorriente**

Sus características son las siguientes:

1. Tanto el agua como el aire van en la misma dirección pero en sentidos opuestos.
2. El agua más fría se pone en contacto con el aire más seco, lográndose un máximo rendimiento.
3. El aire puede entrar a través de una o más paredes de la torre.
4. Altura de entrada de aire reducida en comparación con las de tiro inducido y flujo cruzado. Existe el riesgo de arrastre de suciedad y cuerpos extraños dentro de la torre debido a la velocidad de entrada de aire.
5. La resistencia del aire que asciende contra el agua que cae se traduce en un aumento de la potencia de ventilación en comparación con otras torres. En la siguiente figura se observa la distribución de las partes constituyentes de este tipo de torre.

Flujo de aire caliente y húmedo



Acceso de aire frío no saturado

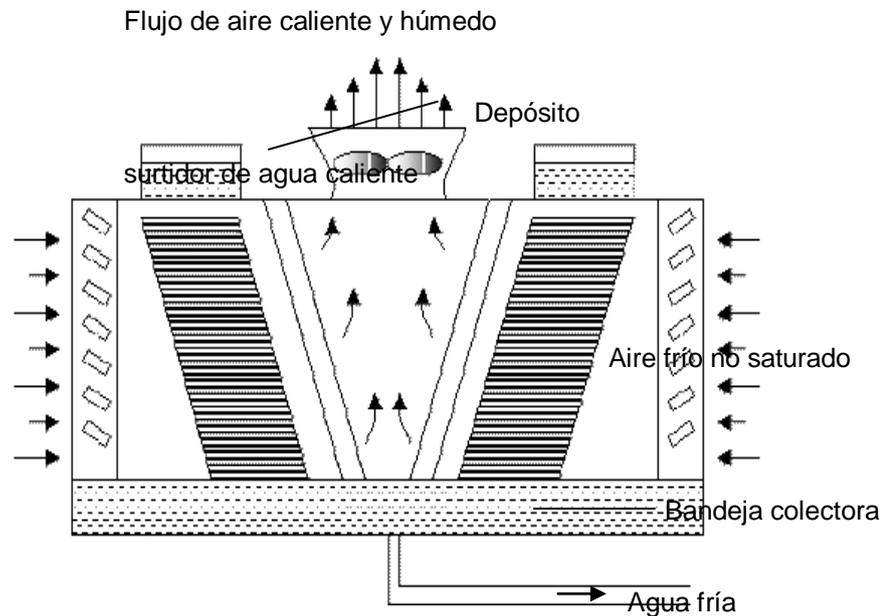
**FIGURA 2.8. TORRE DE FLUJO A CONTRACORRIENTE Y TIRO INDUCIDO**

**Torres de tiro inducido y flujo cruzado.**

Sus características son las siguientes:

1. El aire circula en dirección perpendicular respecto al agua que desciende.
2. Tienen una altura menor que las torres de flujo a contracorriente, ya que la altura total de la torre es prácticamente igual a la del relleno. Pero su diámetro o sección transversal es relativamente mayor a las de tiro inducido y flujo a contracorriente.
3. El mantenimiento de estas torres es menos complicado que en el caso de las torres a contracorriente.
4. Facilidad de inspección de los distintos componentes internos de la torre.
5. La principal desventaja de estas torres es que no son recomendables para aquellos casos en los que se requiera un gran salto térmico y un valor de acercamiento pequeño, puesto que ello significará más superficie transversal y más potencia de ventilación, que en el caso de una torre de flujo a contracorriente.

En la siguiente figura se observan sus partes:



**FIGURA 2.9. TORRE DE FLUJO CRUZADO Y TIRO INDUCIDO**

### 2.5.3. Especificación del Tipo de Torre de Enfriamiento a Usarse.

Para seleccionar el tipo de torre de enfriamiento adecuado empleo una matriz de decisión, en la que en la primera fila pondero al costo inicial, costo de operación, tamaño compacto, facilidad de mantenimiento, y sobre todo al espacio requerido para el montaje, como las características requeridas para solucionar el problema.

Las alternativas de solución son las 5 clases de torre de enfriamiento, a las que asigno una jerarquía del 1 al 10, en función de las características dadas en la anterior clasificación de las torres de enfriamiento.

De la sumatoria de los valores resultantes de la multiplicación de ponderación y jerarquía, de cada tipo de torre, se elegirá al tipo que posea mayor resultado.

Torre tipo	Costo inicial	Costo de operación	Tamaño compacto	Facilidad de mantenimiento	Área de montaje	Suma
<i>Factor de Peso</i>	0.25	0.20	0.20	0.15	0.20	1.00
Circulación Natural Atmosférica	1 0.25	8 1.6	1 0.2	6 0.9	1 0.2	3.15
Circulación De tiro Natural	2 0.5	8 1.6	2 0.2	6 0.9	1 0.2	3.4
<b>Tiro mecánico Inducido y flujo a contracorriente</b>	10 2.5	9 1.8	10 2	8 1.2	10 2	9.5
Tiro mecánico Inducido y flujo cruzado	6 1.5	8 1.6	9 1.8	7 1.05	8 1.6	7.55
Tiro mecánico Forzado	9 2.25	10 2	8 1.6	10 1.5	8 1.6	8.95

**TABLA 2.5. MATRIZ DE DECISION PARA SELECCIONAR EL TIPO DE TORRE**

Es evidente que la mejor opción es el tipo de torre de enfriamiento de tiro mecánico y flujo a contracorriente. Esto debido a que, comparativamente, tiene menor tamaño y área de montaje requerido; aunque no posea los menores costos iniciales y de operación, tal es el caso del tipo de torre de enfriamiento de tiro mecánico forzado. Esta es, relativamente, más difícil de limpiar, y realizar su montaje, razón por la que se descarta.

# CAPITULO 3

## 3. ANALISIS TÉRMICO

### 3.1. Descripción del Sistema.

A partir de la figura 2.6. implica algunos análisis para el diseño del sistema de enfriamiento y es así que:

Las baterías como se indico en los requerimientos del sistema van a ser cargadas 120 a la vez, esto se lo va a realizar en el galpón asignado por el personal encargado del proyecto por parte de la Armada del Ecuador.

En este sitio tiene capacidad para almacenar 240 baterías, como se vio en los requerimientos eléctricos las baterías tienen periodos de tiempo de carga y descarga por lo que se requiere realizar primeramente un diseño de un sistema que permita enfriar primeramente a 120 baterías por un tiempo y en el periodo de descarga llevar a cargar las 120 baterías que se encuentran a continuación.

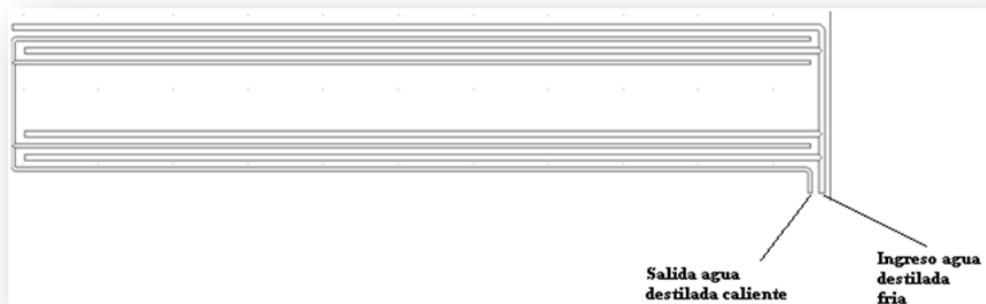


**Segundo bloque de 120  
baterías a ser activads**

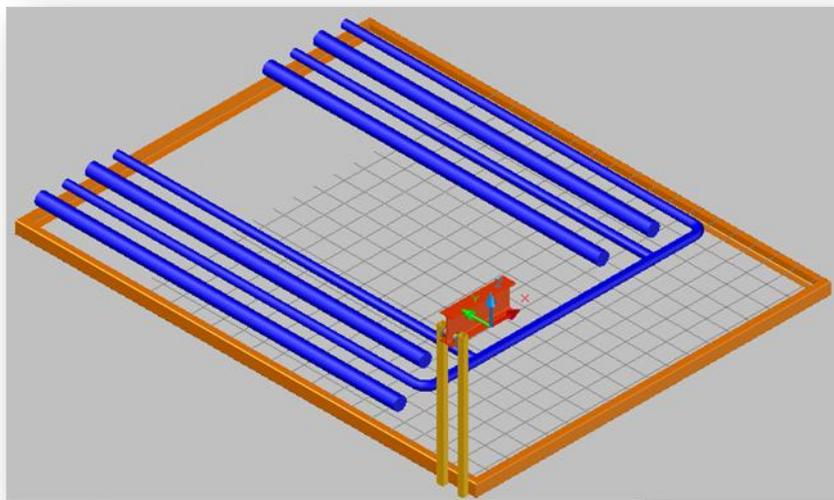
**Primer bloque de 120 baterías a  
ser activadas**

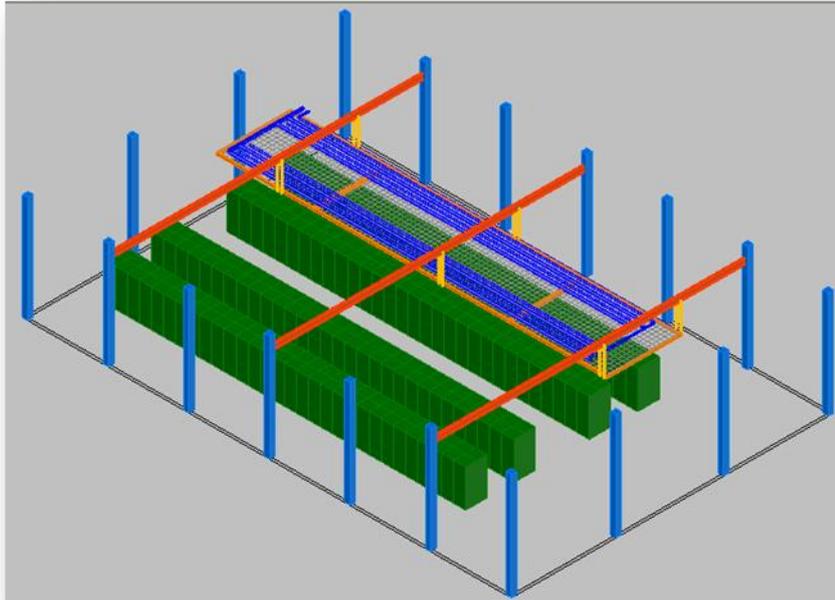
**FIGURA 3.1. DISPOSICION DE LAS BATERIAS EN EL CUARTO DE ACTIVACION**

Para ello se diseñó un sistema móvil que consta de parrillas suspendidas en ruedas, en esta parrilla se colocara las tuberías de circulación de agua destilada fría y saldrá de las baterías agua destilada caliente, se indica esta disposición en el Plano 1, la parte del diseño de la estructura móvil no será parte de esta tesis.



FI

**FIGURA 3.2. DISPOSICION DE TUBERIA****FIGURA 3.3. SISTEMA DE DESPLAZAMIENTO**



**FIGURA 3.4 DISPOSICION DE BATERIAS EN CUARTO DE ACTIVACION CON SISTEMA DE DESPLAZAMIENTO**



**FIGURA 3.5. SISTEMA MOVIL PARA LLEVAR FLUIDO DE ENFRIAMIENTO A LAS BATERIAS CONSTRUIDO**

Una vez que se ha descrito el sistema el cual va a llevar el agua destilada para el enfriamiento de las baterías se tiene que describir el sistema de enfriamiento en si del agua destilada, para ello la Armada del Ecuador doto de un intercambiador de calor que por el interior circulara agua destilada caliente para que por su exterior circule agua fría proveniente de la torre de enfriamiento cerrando de esta manera el circuito, cabe notar que el intercambiador de calor es del tipo tubo coraza pero el intercambiador adquirido no posee su coraza.

Antes de hacer el diseño se hizo un análisis de la factibilidad de construir este sistema en nuestro medio, se consulto en el mercado el costo de una torre de enfriamiento adquirida en una empresa importadora de estos equipos frente al análisis de una torre que se pueda construir en ERMARLO S.A., resultando más conveniente la construcción de la torre y el acondicionamiento en el sistema de enfriamiento, este análisis se demostrara en el capítulo de costos.

### 3.2.

#### A)

1)

2)

#### B)

1)

2)

#### C)

**ENTRADA**

#### Datos de Operación

##### FLUJO

Agua destilada:

15 m<sup>3</sup>/h

Agua de mar

15 m<sup>3</sup>/h

##### PRESION

Agua destilada

2,5 kg/cm<sup>2</sup>

Agua de mar

de la torre

##### TEMPERATURA DE

- |    |                         |
|----|-------------------------|
| 1) | Agua destilada<br>38 °C |
| 2) | Agua de mar<br>28 °C    |

**D) TEMPERATURA DE SALIDA**

- |    |                          |
|----|--------------------------|
| 1) | Agua destilada<br>33,1°C |
| 2) | Agua de mar<br>32,9 °C   |

**E) DATOS DEL AIRE**

- |    |  |
|----|--|
| 1) | Temperatura de bulbo seco<br>32,2 °C   |
| 2) | Temperatura de bulbo<br>húmedo<br>78,8 |

**3.3. Consideraciones del**

**Sistema**

- El sistema se instalara en un patio al aire libre.
- El intercambiador de calor debe permitir facilidades de limpieza y mantenimiento.
- El agua a usarse para la torre será agua potable.

- La velocidad del viento en Guayaquil es variable, así que el diseño de la torre no debe depender de la velocidad del viento.
- El intercambiador de calor dotado por parte de la Armada del Ecuador del tipo de haz de tubos y coraza, este dispositivo no posee la coraza.
- Para lo cual el intercambiador de calor se analizara sumergiendo él en la piscina de la torre de enfriamiento, esta disposición arrancara calor de los tubos del intercambiador para por el método de conducción térmica pasar calor al agua de la torre y hacerla circular.
- El agua destilada y el agua de la torre no deben mezclarse.

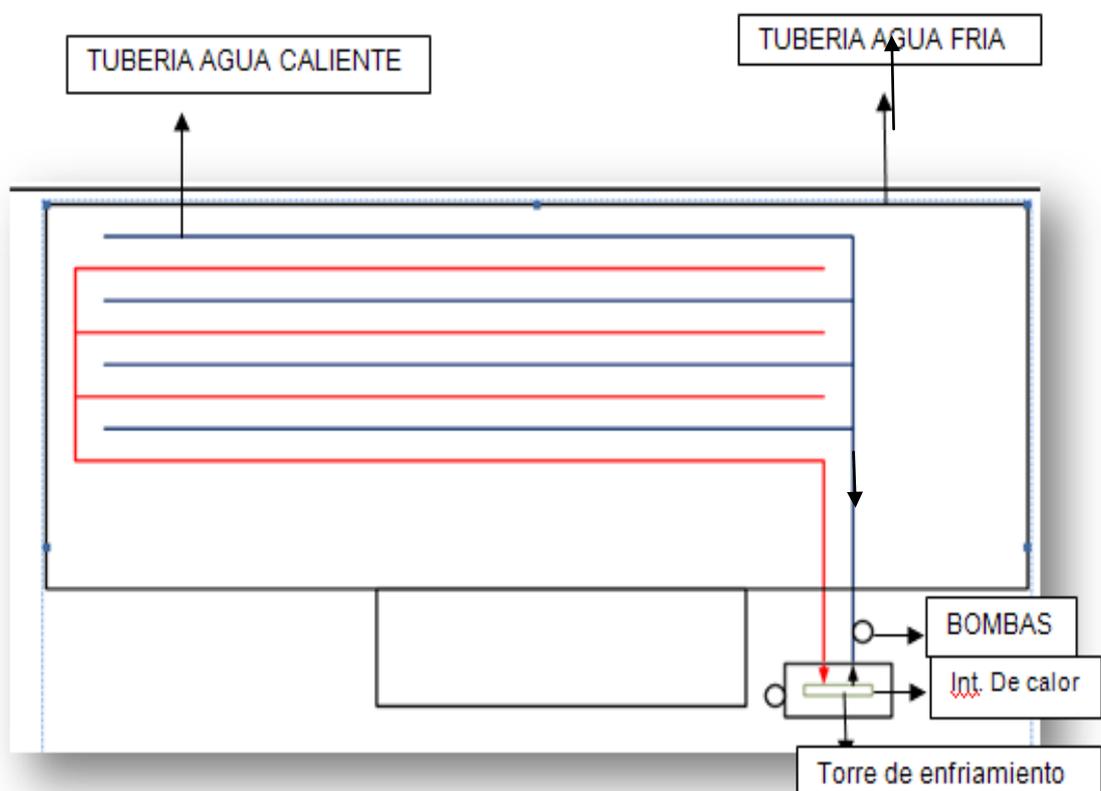


FIGURA 3.6. DISEÑO DE FORMA DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

## 3.4.

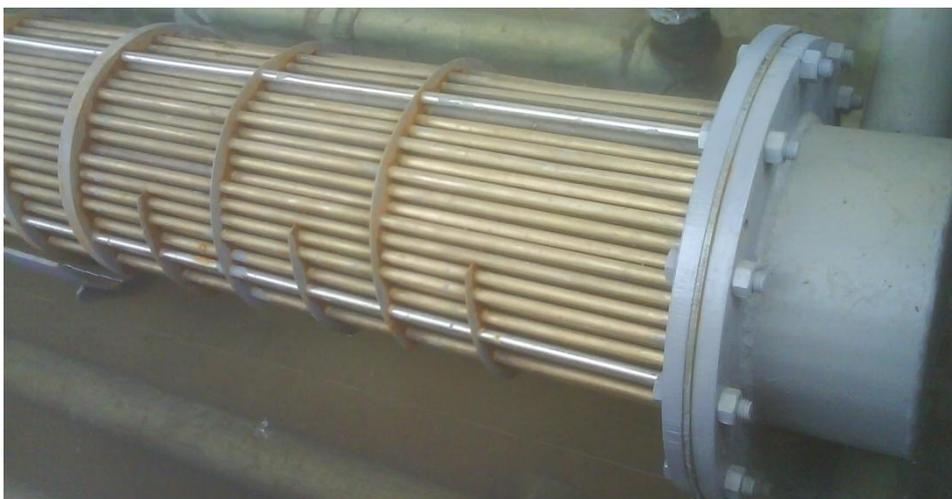
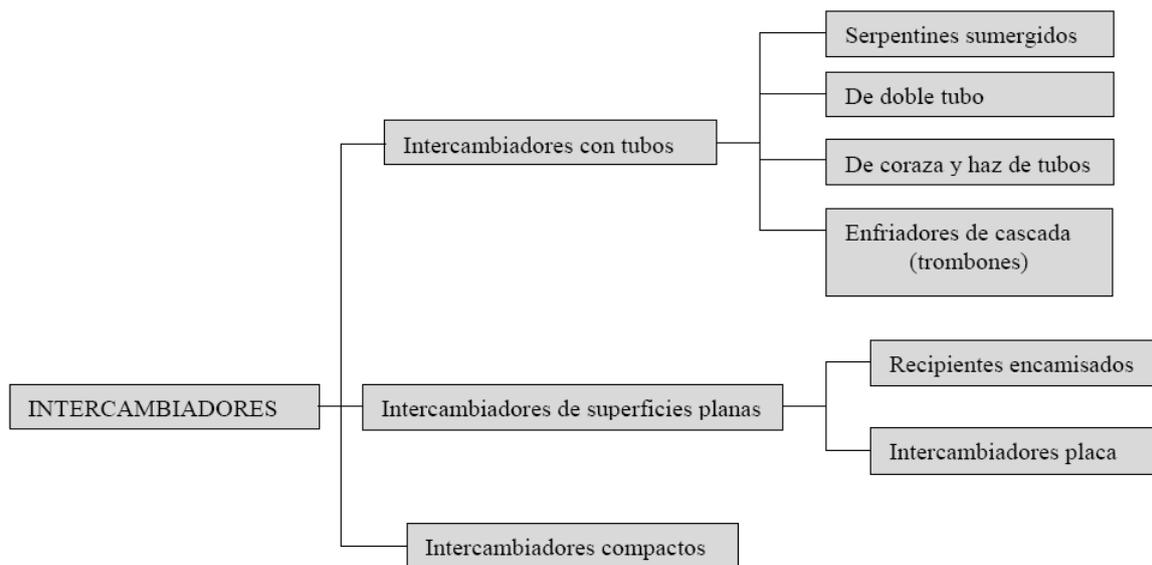
## Selección

## del

**Intercambiador de Calor**

Un intercambiador de calor es un dispositivo que efectúa la transferencia de calor de un fluido a otro que se encuentran a diferentes temperaturas y separados por una frontera sólida.

En forma muy general se pueden clasificar los intercambiadores de calor de acuerdo al tipo de superficie:



**FIGURA 3.6. INTERCAMBIADOR DE HAZ DE TUBOS**

En la primera etapa se toman en cuenta consideraciones referidas al tipo de intercambio de calor que se produce. En la segunda etapa se obtienen las propiedades de los fluidos en función de las variables conocidas y se calcula el coeficiente global U y el área de intercambio A. En la tercera etapa se elige un intercambiador adecuado para este servicio, teniendo en cuenta el coeficiente global U, el área de intercambio A y las características de los fluidos y de las corrientes. En la cuarta se vuelve a calcular el coeficiente global U y el área de intercambio A. Si no coinciden con el intercambiador previamente elegido se vuelve al paso tres. Si coinciden se da por terminado el proceso. [2]

### 3.4.1. Método F – LMTD para Seleccionar el Intercambiador de Calor

El balance de energía da como resultado:

$$[\text{Energía perdida por el flujo caliente}] = [\text{Energía ganada por el flujo frío}]$$

O bien:

$$m_h c_h (T_{h,i} - T_{h,o}) = m_c c_c (T_{c,i} - T_{c,o}) \quad \text{Ec.1}$$

Donde:

$m_h$  : Flujo másico del fluido caliente

$C_h$  : Calor específico del fluido caliente

$T_{h,i}$  : Temperatura de entrada del fluido caliente

$T_{h,o}$  : Temperatura de salida del fluido caliente

$m_c$  : Flujo másico del fluido frío

$C_c$  : Calor específico del fluido frío

$T_{c,i}$  : Temperatura de entrada del fluido frío

$T_{c,o}$  : Temperatura de salida del fluido frío

El producto  $(m \cdot c)$  aparece con frecuencia en el análisis de intercambiadores de calor y

es denominado, Capacidad calorífica,  $C$ ,

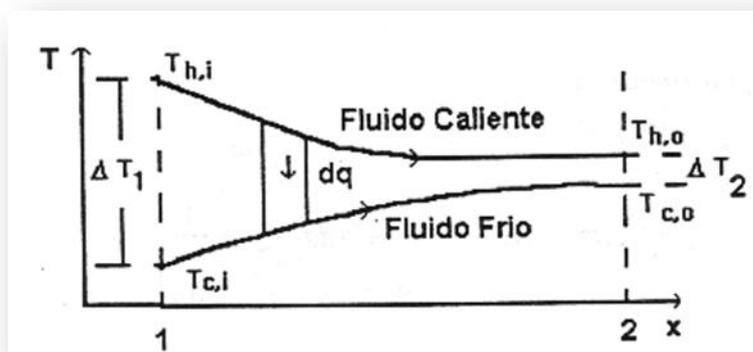
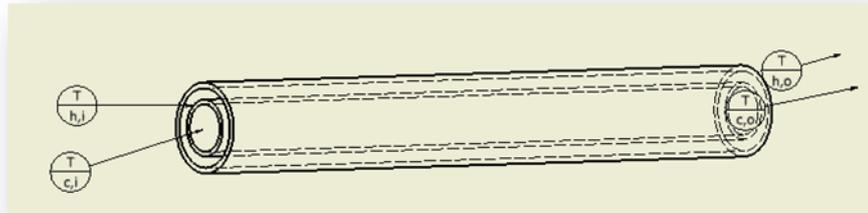
$$C = (m \cdot c).$$

Existen dos metodologías de análisis térmico de intercambiadores de calor.

1. Método F-LMTD

2. Método  $\varepsilon$  - NTU

A continuación se presentara el análisis F-LMTD para la selección del intercambiador de calor.



**FIGURA 3.7. DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS EN UN INTERCAMBIADOR DE DOBLE TUBO EN TUBO PARALELO[1]**

Se propone calcular el flujo de calor mediante:

$$q = UA\Delta T_m \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

q: Flujo de calor [W]

U: Coeficiente global de transferencia de calor [ $W/m^2K$ ]

A: Área de transferencia de calor consistente con U

$\Delta T_m$ : Diferencia de temperatura media

En la figura 3.7 se muestra la historia de las temperaturas de los fluidos fríos y calientes, de este modo un balance de energía nos da como resultado.

$$d_q = m_c C_c dT_c = -m_h C_h dT_h \quad \text{Ec. 3}$$

Incorporando la capacidad calorífica, y arreglando la ecuación tenemos:

$$dT_h = d_q / C_h \quad \text{Ec.4}$$

$$dT_c = d_q / C_c \quad \text{Ec.5}$$

Restando ambas ecuaciones,

$$dT_h - dT_c = d(T_h - T_c) = -dq \left( \frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right) \quad \text{Ec.6}$$

Sustituyendo la expresión de calor expresada por:

$$dq = U(T_h - T_c) dA \quad \text{Ec.7}$$

Se obtiene la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{d(T_h - T_c)}{T_h - T_c} = -U(T_h - T_c) \left( \frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right) dA \quad \text{Ec.8}$$

Integrando la ecuación anterior entre el punto 1 y el 2, se obtiene:

$$\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = -U \left( \frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right) A \quad \text{Ec.9}$$

Si

$$C_c = \frac{q}{T_{c,0} - T_{c,i}} \quad \text{Ec.10}$$

$$C_h = \frac{q}{T_{h,0} - T_{h,i}} \quad \text{Ec. 11}$$

De manera que sustituyendo las ecuaciones anteriores en la ecuación previamente integrada S:

$$\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = -\frac{UA}{q} (\Delta T_2 - \Delta T_1) \quad \text{Ec.12}$$

Que al despejar de la ecuación anterior, q, se tiene:

$$q = UA \frac{(\Delta T_2 - \Delta T_1)}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} \quad \text{Ec.13}$$

De la última ecuación se reconoce:

$$\Delta T_m = LMTD = \frac{(\Delta T_2 - \Delta T_1)}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}}$$

Donde LMTD son las siglas en ingles de Logarithm Mean Temperature Difference (Diferencia de temperatura logarítmica media).

Esta ecuación se aplica la misma expresión para LMTD, tanto en flujo paralelo, como en contra corriente.[1]

#### **Asignación de flujos.**

Las reglas aplicables para determinar que fluido va por el casco y cual por los tubos son:

- 1.- El fluido a mayor presión va en los tubos.
- 2.- El fluido más corrosivo va en los tubos.
- 3.- Los fluidos más sucios van en los tubos
- 4.- El fluido con menor pérdida de presión va en el casco.
- 5.- El fluido a condensar en el casco.

#### **Diagramas Térmicos**

Un diagrama térmico es la representación de la temperatura de las corrientes en función del calor transferido o de la longitud. Si existe cruce de temperaturas será necesario utilizar varios intercambiadores en serie.

#### **Diferencia de temperatura media corregida**

La diferencia media de temperaturas MTD en un intercambiador de calor de tubo coraza es la diferencia media logarítmica de temperaturas multiplicada por un factor F

$$MTD = F * LMTD \quad \text{Ec. 14}$$

De la ecuación 13 tenemos que:

$$\Delta T_m = LMTD = \frac{(\Delta T_2 - \Delta T_1)}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}} \quad \text{Ec.15}$$

Siendo: T: temperatura de fluido caliente; t: temperatura de fluido frio.

1: entrada, 2: salida.

El factor F se obtiene de las graficas que se darán en el **apéndice 1**. Un valor de  $F < 0,8$  no es admisible por diseño, hay que calcular P y R según las condiciones:

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad \text{Ec. 16}$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad \text{Ec.17}$$

### SELECCIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

Se tiene que obtener primeramente el calor removido por el intercambiador de calor para lo cual se utilizara la ec.1:

$$q = m_h c_h \Delta T \quad \text{Ec. 1.1}$$

$$C_h = 1 \text{ BTU/lb } ^\circ\text{F}$$

$$\Delta T = 8,8 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$m_h = Q \cdot \rho \quad \text{Ec. 1.2}$$

donde

$$Q = 15 \text{ m}^3/\text{h} = 529,7 \text{ ft}^3/\text{h}$$

$$\rho = 61,99 \text{ lb/ft}^3 \text{ Para } 100 \text{ } ^\circ\text{F} \text{ (ver anexo 1)}$$

Sustituyendo en la ec.1.2

$$m_h = 529,7 \text{ ft}^3/\text{h} \cdot 61,99 \text{ lb/ft}^3 = 32836,103 \text{ lb/h}$$

por lo tanto sustituyendo valores en la ec. 1.2:

$$q = 271825,39 \text{ BTU/h}$$

$$\mathbf{q = 79659,9 \text{ W}}$$

Con los datos suministrados se seleccionara el intercambiador de calor adecuado:

$$T_{h,i} = 100,4 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$T_{h,0} = 91,58 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$\dot{m}_c = 15 \text{ m}^3/\text{h} = 66,05 \text{ GPM}$$

$$T_{c,i} = 82,4 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$T_{c,0} = 91,2 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$q = 271825,39 \text{ BTU/h}$$

$$U = 150 \text{ BTU}/\text{pie}^2\text{ } ^\circ\text{F} \text{ obtenido de la tabla 3.1.}$$

INTERCAMBIADOR	ESCALA TÍPICA	
	Presion (lb/plg <sup>2</sup> )	U (Btu/plg <sup>2</sup> °F)
a. Tubo-Coraza (vapor - liquido)	0-500	20-60
b. Tubos–aire abierto (aire - liquido)	0-100	2-10
c. Tubo-Coraza (liquido - liquido)	0-500	40-150

**TABLA 3.1. ESCALA DE PRESION Y VALOR U PARA TIPOS DE INTERCAMBIADORES DE CALOR[16]**

De la Ec. 2 obtenemos el área de transferencia del intercambiador

$$A = \frac{q}{U \cdot MTD} \quad \text{Ec. 18}$$

MTD = LMTD \* F diferencia de temperaturas medias corregidas

LMTD = 9,18 °F este valor es obtenido de la Ec. 15

Para encontrar el factor de corrección F utilizamos el Apéndice C Ingresando los valores

P y R dadas en las ecuaciones 16 y 17 obtenemos:

$$P = 0,55$$

$$R = 1,17$$

$$F = 0,9$$

Por lo tanto

$$MTD = 9,18^{\circ}\text{F} * 0,9 = 8,2^{\circ}\text{F}$$

Por la Ec. 18 el área de transferencia de calor es:

$$A = 220,9 \text{ pie}^2 = 20,52 \text{ m}^2$$

Para calcular el número de tubos del intercambiador tubo coraza se plantea la siguiente ecuación:

$$Nt = \frac{A}{L * a''} \quad \text{Ec. 19}$$

$a''$  es un factor obtenido para el tubo  $\frac{3}{4}$  obtenido del **Apéndice E** y es 0,193 pie/pie<sup>2</sup> por el área de disponibilidad donde se construirá el sistema tiene una longitud de 8 pie.

Por lo tanto el número de tubos requeridos para el intercambiador de calor es:

$$Nt = 140,72 \text{ tubos de } \frac{3}{4}''$$

<b>Área transversal de flujo y Superficie para Tubos Calibre 16 BWG</b>		
Diámetro externo pulgadas	Número de tubos conteniendo 1 pie <sup>2</sup> de área transversal de flujo	Superficie por pie de longitud de haz conteniendo 1 pie <sup>2</sup> de área transversal de flujo
$\frac{1}{2}$	1340	175
$\frac{5}{8}$	746	122
$\frac{3}{4}$	476	94
$\frac{7}{8}$	330	76
1	242	63
$1\frac{1}{8}$	185	55
$1\frac{1}{4}$	146	48
$1\frac{1}{2}$	99	39

**TABLA 3.2. AREA TRANSVERSAL DE FLUJO Y SUPERFICIE PARA  
INTERCAMBIADORES DE CALOR [16]**

**3.5. Uso de Software para  
Selección de Intercambiador de Calor**

En este punto se pretende realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos mediante el método analítico frente al uso de un software mediante el cual se seleccionara el intercambiador de calor requerido para el sistema de enfriamiento que se trata.

El software que se utilizara es el ESP – PLUS V 2.0 HEAT EXCAHANGER, este software dará como resultados el tipo de intercambiador de calor que existe comercialmente.



**FIGURA 3.8. VENTANA DE INICIO DEL PROGRAMA**

**Selection Mode** [X]

Heat Exchanger Type:

Select with Regular Flow  
 Select with Split Flow

WU: Liquid to Liquid, U tube  
 HTWU: Liquid to Liquid, U tube, High Temp, High Pressure Hot Water  
 SU: Steam to Liquid, U tube  
 OC: Liquid OR Steam to Liquid, Straight, Removeable tube bundle  
 OF: Liquid OR Steam to Liquid, Straight, Fixed tube bundle

OK  
 Cancel  
 Help  
 Design Conditions...  
 Limiting Factors...  
 Select

Proposal No.:  Quantity:   
 Chosen Unit:  Tag:

View Performance... Remarks... Specification...  
 Select Materials... Submittal... Schedule File...  
 Select Steam Specialties For Heat Exchangers

**Selected Units**

Unit No.	Unit Selection	Area sqft	Fouling Provided	'U' Factor	Pressure Drop Shell	Pressure Drop Tube	Factory Standard?

FIGURA 3.8. VENTANA DE SELECCIÓN DE TIPO DE INTERCAMBIADOR A UTILIZARSE Y LOS TIPOS DE FLUIDOS

**Fluid Process Criteria**

Heat Load: 271825.39 Btuh

**Tubeside Properties**

Tubeside Fluid: Water

Glycol Percent:

Soft Water In Tubes

Inlet Temperature: 100.4 °F

Outlet Temperature: 91.2 °F

Flow Rate: 60.8 gpm

Steam Entering Unit:  pph

Steam Inlet Pressure:  psig

**Shellside Properties**

Shellside Fluid: Water

Glycol Percent:

Inlet Temperature: 82.4 °F

Outlet Temperature: 91.2 °F

Flow Rate: 60.7 gpm

Steam Entering Unit:  pph

Steam Inlet Pressure:  psig

OK

Cancel

Help

Calculate

FIGURA 3.9. VENTANA INGRESO DE DATOS TANTO PARA INTERCAMBIADOR COMO PARA EL FLUIDO CIRCUNDANTE, DA COMO RESULTADO LA TAZA DE FLUJO EN GPM

**Construction Materials (Optional Selections)** x

Small Tube Heat Exchanger Type

- CHX: Shell-Brass; Tubesheet-Brass; Bonnets-C.I.; Baffles-Brass; Tube-Copper
- CHXB: Shell-Brass; Tubesheet-Brass; Bonnets-C.B.; Baffles-Brass; Tube-Copper
- CHXS: Shell-316SS; Tubesheet-316SS; Bonnets-316SS; Baffles-316SS; Tube-316SS
- CHXS-J: Shell-316SS; Tubesheet-316SS; Bonnets-C.I.; Baffles-316SS; Tube-316SS

**Tubing Material**

- Copper \*Max temp. 375°F
- Steel
- 304 Stainless Steel
- 316 Stainless Steel
- Admiralty
- 90/10 Copper Nickel \*Max temp. 600°F
- 70/30 Copper Nickel
- Monel

**Double Wall Tubing Material**

- Copper (Copper inner + copper outer)
- 90/10 CuNi (90/10 CuNi inner + copper outer)
- Stainless Steel (316SS inner + copper outer)

**Tubing Diameter**

- 5/8"
- 3/4"

**Tubing Gauge**

- 20 (.035") Stainless Steel, Copper (3/4" & 5/8" dia. tubed HX standard)
- 18 (.049") Copper, Admiralty, 90/10 Copper Nickel, Stainless Steel
- 16 (.065") Steel, Copper, 90/10 Copper Nickel
- 14 (.083")
- 13.5 (.089") Double wall U tubes only

**OK**  
**Cancel**

FIGURA 3.10. SE INTRODUCE LOS DATOS DE MATERIALES DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

**Limiting Factors** x

Double Wall Heat Exchanger

Limit on total length of unit:  feet

Tubeside pressure drop limit:  psig

Shellside pressure drop limit:  psig

Limit on total length of bundle:  feet

Circulate Tank Fluid

Cement Lined Tank

Tubeside Fouling Factor:       Shellside Fouling Factor:

0.000 No fouling required	0.000 No fouling required
0.00025 Recirculated water	0.00025 Recirculated water
0.0005 Softened well water	0.0005 Softened well water
0.0005 Natural soft water	0.0005 Natural soft water
0.0005 Sea water	0.0005 Sea water

Total Fouling Factor:

FIGURA 3.11. VENTADA EN LA QUE SE INTRODUCE DATOS DE LONGITUD DEL INTERCAMBIADOR, PRESION INTERNA EN LOS TUBOS Y FACTOR DE FRICCION DENTRO DE LOS TUBOS.

**Materials** [X]

	Tubeside	Shellside
Fluid:	Water	Water
Design Pressure (psig):	150.0	150.0
Design Temperature (*F):	375.0	375.0

OK Cancel

**Material Types**

Standard Materials

Non-Standard Materials

---

**Front Head Material:** Steel

**Front Head Construction**

Bonnet

Channel

NPT

Flanged

**Shell Material:** Steel

**Shell Connection Size**

**Inlet Nozzle:** [Dropdown]

Standard Size: [Text]

Minimum Size: 3.00

**Condensate Nozzle:** [Dropdown]

Standard Size: [Text]

Minimum Size: [Text]

**Tubesheet Material:** 90/10 Copper Nickel

Tubeside Tubesheet Material: [Dropdown]

Shellside Tubesheet Material: [Dropdown]

**Tie-rod/SpacerMaterial:** Steel

**Gasket Material:** Compressed Fiber

**Baffle Material:** Steel

FIGURA 3.12. VENTANA RESULTADOS EN LA PRESION DE DISEÑO, MATERIAL DE TAPAS DEL INTERCAMBIADOR, MATERIAL DE LOS TUBOS Y TUBERIA DE INGRESO AL MATERIAL

Performance Data		
	Tubeside	Shellside
Fluid Circulated:	Water	Water
Inlet Temperature (*F):	100	82
Outlet Temperature (*F):	91	91
Total Flow (gpm):	60.8	60.7
Total Flow (pph):	30263.9	30249.5
Steam Pressure (psig):	0	0
Specific Gravity:	0.995	0.997
Specific Heat (Btu/lb-*F):	0.998	0.998
Viscosity (Centipoise):	0.719	0.771
Thermal Conductivity (Btu/hr-*F-ft <sup>2</sup> /ft):	0.36	0.357
Velocity (ft/sec):	0.55	1.38
Pressure Drop (psig):	0.02	0.41
Pressure Drop (ft H <sub>2</sub> O):	0.05	0.95
Minimum Nozzle Size:	2	3
Condensate Drain Size:	0	0

Close

FIGURA 3.13. VENTANA DE RESULTADOS

**Selection Mode**

Heat Exchanger Type:

WU: Liquid to Liquid, U tube  
 HTWU: Liquid to Liquid, U tube, High Temp, High Pressure Hot Water  
 SU: Steam to Liquid, U tube  
 OC: Liquid OR Steam to Liquid, Straight, Removeable tube bundle  
 OF: Liquid OR Steam to Liquid, Straight, Fixed tube bundle

Select with Regular Flow  
 Select with Split Flow

Proposal No.:  Quantity:   
 Chosen Unit:  Tag:

Select Steam Specialties For Heat Exchangers

Unit No.	Unit Selection	Area sqft	Fouling Provided	'U' Factor	Pressure Drop Shell	Pressure Drop Tube	Factory Standard?
1:	WU12 7-4 3	139.7	+0.00062	278	0.7 psi	0.4 psi	No
2:	WU12 7-6 3	120.7	+0.00046	308	0.6 psi	1.6 psi	No
3:	WU16 7-2 4	266.0	+0.00028	137	0.4 psi	0.0 psi	No

FIGURA 3.14. VENTANA DE RESULTADOS

De acuerdo a este software el intercambiador que se va a seleccionar es el WU16 7 – 2 4 que es la denominación comercial del constructor ITT Bell & Gosset creador de este software.

La denominación WU 16 7 – 2 4, cada letra y número tiene su significado técnico que a continuación se detalla:

WU: Serie de intercambiador de calor

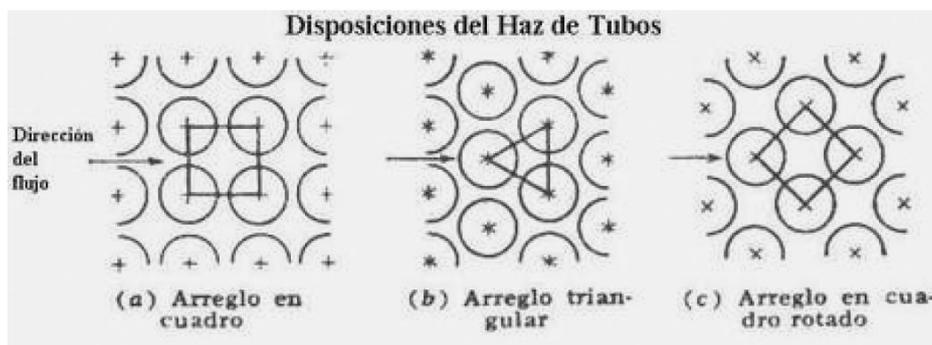
16: Diámetro de la coraza del intercambiador en unidades inglesas

7: Longitud de tubo

2: Numero de pasos del intercambiador de calor

#### 4: Espaciamiento de baffles

Al realizar el análisis comparativo con los métodos de selección se tiene que por el método analítico se tiene un área de  $221 \text{ ft}^2$ , frente al software que nos arroja un área de  $274 \text{ ft}^2$ , este valor diferencia notoriamente a que la selección del factor  $U$  en el método analítico se lo selecciono  $150 \text{ BTU}/\text{pie}^2\text{-}^\circ\text{F}$ , el software utiliza y factor de  $137 \text{ BTU}/\text{pie}^2\text{-}^\circ\text{F}$ , notando este parámetro relativamente la diferencia de área de los dos análisis serian casi indiferentes, con lo que estaríamos en capacidad de decidir si el intercambiador dotado por la Armada Nacional esta dentro de los parámetros requeridos dado que este consta de 160 tubos en disposición triangular dando un área de transferencia de calor de  $247,07 \text{ ft}^2$ , certificando de esta manera que el intercambiador que se posee entra en el rango requerido para el sistema por lo tanto se lo utilizara para el proceso requerido de enfriamiento del fluido caliente extraído del banco de baterías que están en el proceso de activación.



**FIGURA 3.15. DISPOSICIONES DEL HAZ DE TUBOS [9]**

Los resultados obtenidos del software se presentaran en el Anexo 3.

### 3.6.

### Diseño de la Torre de

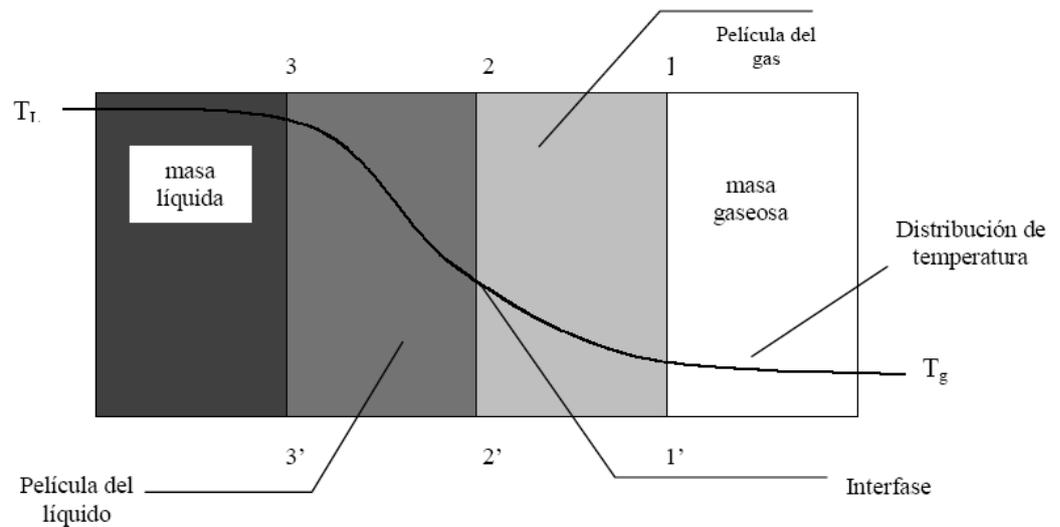
#### Enfriamiento

El proceso de termotransferencia que se produce en una torre para enfriamiento de agua, cualquiera fuese su tipo, es el resultado de la

interacción entre el medio gaseoso refrigerante (aire) y el fluido a enfriar (agua).

En las torres el agua se encuentra en contacto directo con el aire que la enfría y el proceso de transferencia de calor se realiza en parte por intercambio de calor sensible entre la fase líquida y la gaseosa, pero en mayor medida por la formación de vapor de agua en la interfase líquido/gas y su posterior difusión en el aire que la circunda.

El proceso de transferencia de masa entre el líquido y el aire, está íntimamente conectado con el de transferencia de calor. En efecto, con el cambio de fase desde líquido a vapor se absorbe calor lo cual da lugar a gradientes de temperatura en el aire adyacente a la superficie líquida. En muchos casos prácticos, las condiciones en que se desarrollan ambos procesos son tales que puede suponerse que la difusividad térmica y el coeficiente de difusión másico son iguales.



**FIGURA 3.16. IDEALIZACION DEL FENOMENO DE TRANSFERENCIA [10]**

### 3.6.1. Fundamento del Enfriamiento por Evaporación

El principio fundamental en que se basa el enfriamiento del agua por evaporación, es en el que, el agua para transformarse en vapor necesita calor (calor latente de vaporización), cuyo valor es alrededor de 1000 BTU/ lb de agua evaporada, valor que pone en manifiesto que pequeñas cantidades de agua evaporada, producen altos efectos de enfriamiento.

Este calor es tomado principalmente del líquido remanente, lo que produce un descenso de su temperatura.

La evaporación se produce poniendo en contacto directo agua caliente con aire atmosférico ambiente de humedad relativa

baja, en dispositivos especiales que varían en complejidad desde piscinas o lagunas abiertas hasta las torres de enfriamiento de tiro mecánico.

Cuando se requiere enfriar rápidamente y continuamente grandes cantidades de agua, las torres de enfriamiento son las técnicas más ventajosas y su función principal es la de reducir la temperatura del agua circulante a los valores más adecuados, según el tipo de operación que tenga.

Básicamente, el funcionamiento de una torre de enfriamiento convencional, es el siguiente:

El agua caliente llega por tuberías a un distribuidor situado en la parte superior de la unidad a una temperatura  $T_{h,o}$ , luego es distribuida en forma de pequeñas gotas a través de una instalación compleja de material de relleno de diferentes tipos y calidades, variando desde madera incorruptible, materiales de fibrocemento, PVC, cerámica, etc., los cuales son ubicados en forma de mallas o enrejados que dispersan la corriente descendente del líquido y de esta forma obtener una área máxima de transferencia con el aire atmosférico, el cual entra por parte inferior de la torre con una temperatura  $T_{c,i}$ , de bulbo

seco y una humedad absoluta  $Y'_1$  expresada en lb de vapor de agua/ lb de aire seco.

### 3.6.2. Cálculos

#### Datos para realizar el cálculo de la torre de enfriamiento.

- Flujo a ser enfriado L  
66 GPM
- Calor removido por el  
intercambiador q 271825,39 BTU/h
- Temperatura que  
sale del intercambiador de calor para entrar en la torre  $t_{L,2}$   
91,20 °F
- Temperatura del  
agua requerida luego del enfriamiento en la torre de  
enfriamiento  $t_{L,1}$  82,40 °F
- Temperatura de  
bulbo húmedo  $t_{b,h}$  78,80 °F
- Temperatura de  
bulbo seco del aire que entra  $t_{G,1}$  79,00 °F
- Temperatura del  
agua de la tubería de alimentación a la torre de enfriamiento  
 $t_m$  85,00 °F

Con los datos suministrados se desea obtener los siguientes valores:

- a. Valor teórico del coeficiente total de transferencia de masa  $K_y a$ .
- b. Calculo de la sección transversal de la torre A.
- c. Calculo del flujo de aire que circula por la torre Gs.
- d. Calculo de la zona empaquetada Z.
- e. Calculo de agua de compensación M.

Para realizar el diseño de la torre de enfriamiento se debe seguir ciertos pasos que darán la pauta para diseñar una torre de enfriamiento para cualquier necesidad o requerimiento.

## 1. Capacidad de la Torre de Enfriamiento

$$q=271825,39 \text{ BTU/h}$$

Este es el calor que remueve el intercambiador de calor y que es transmitido al agua de la torre.

La capacidad de la torre se mide en Toneladas de Refrigeración TR que es una unidad de potencia.

Es así que se tiene las siguientes relaciones para poder saber en términos de TR la capacidad de diseño para la torre de enfriamiento:

$$1\text{TR}=3517 \text{ W} = 3024 \text{ Kcal/h} = 3024 \text{ Frig/h} \quad \text{Ec. 20}$$

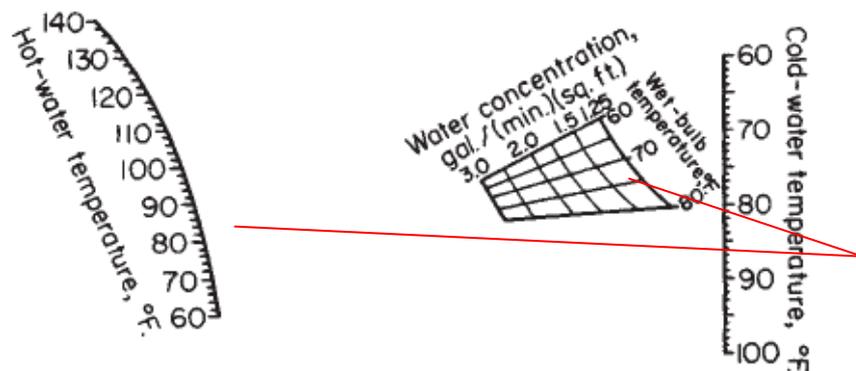
De donde:

$$271825,39 \text{ BTU/h} * 1 \text{ TR}/12000 \text{ BTU/h} = \text{capacidad de la torre}$$

**Capacidad de la torre = 22,62 TR.**

### Flujo específico L'

L es flujo de agua y L' es el flujo específico de agua que se encuentra en la figura 3.18. este valor se encuentra en función del rango de enfriamiento del agua ( $T_{h,o} - T_{h,i}$ ) y la temperatura de bulbo húmedo  $T_{b,h}$ .

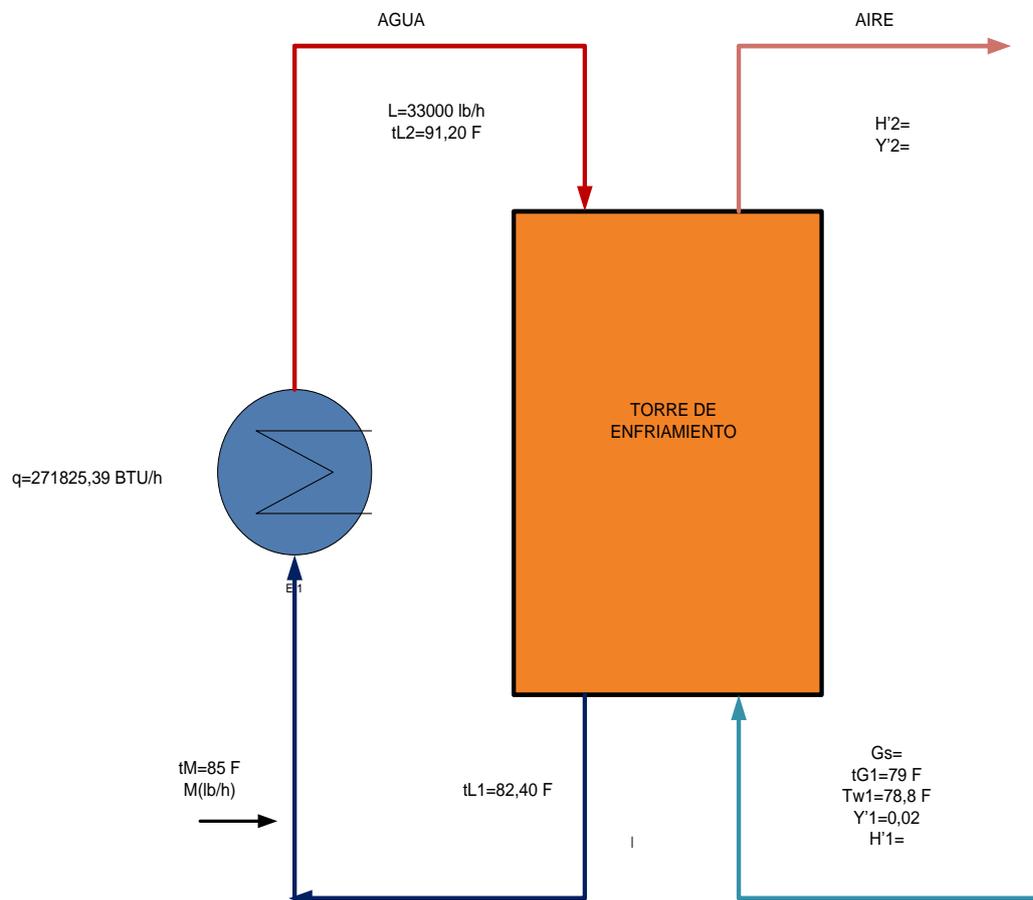


**FIGURA 3.17. FLUJO ESPECIFICO L' [7]**

El valor de flujo específico de agua que nos da la figura 3.17 es  $L'=2.0 \text{ gal/min ft}^2$

**L= 66 GPM**

**Datos para las condiciones de diseño de la torre de enfriamiento**

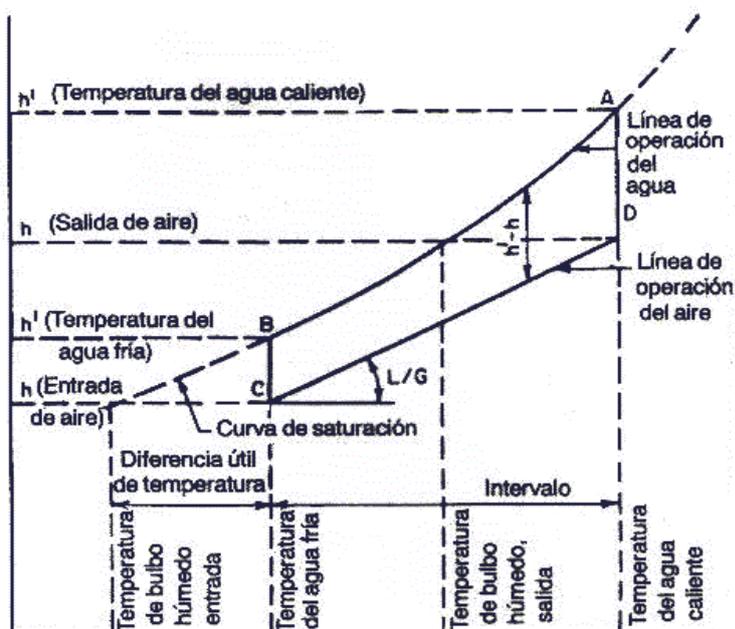


**FIGURA 3.18. DIAGRAMA DEL SISTEMA PARA EL DISEÑO**

### Análisis de la curva de equilibrio

La teoría del proceso de transferencia de calor en una torre de enfriamiento, es la que desarrolló el Dr. Merkel. Se basa en la diferencia del potencial de entalpía, entonces, se supone que cada partícula de agua está rodeada por una película de aire y que la diferencia de entalpía entre la misma y el aire circundante proporciona la fuerza impulsora para el proceso de enfriamiento.

A continuación, se ilustran las relaciones del agua, aire y el potencial impulsor que existe en una torre de contra flujo.



**FIGURA 3.19. RELACIONES DE AGUA Y AIRE DE UNA TORRE A CONTRA FLUJO [25]**

De la figura anterior: la operación del agua está representada por la línea AB y se especifica por medio de las temperaturas del agua de la torre en la entrada y salida. La línea de operación del aire inicia en C, verticalmente por debajo de B, y en un punto que tiene una entalpía correspondiente a la temperatura de entrada de bulbo húmedo. La línea BC, representa la fuerza impulsora inicial ( $h' - h$ ). El aire que sale de la torre se representa por medio del punto D y la gama de

enfriamiento es la longitud proyectada de la línea CD sobre la escala de temperaturas.

Resumiendo, la teoría del Dr. Merkel, como se observa en la figura 3.19, considera el flujo de masa y energía del agua a la interfase y de la interfase a la masa gaseosa. Cuando el flujo cruza estas dos fronteras, cada una ofrece una resistencia a la transferencia de materia y energía, que resulta en gradientes de temperatura, entalpía y de humedades.

El Dr. Merkel demostró que:

$$Q = K \cdot S \cdot (h_w - h_a) \quad \text{Ec.21}$$

$$S = a \cdot V \quad \text{Ec.22}$$

Donde:

Q: Calor total transferido en Btu/h ó kJ/h

K: Coeficiente total de transferencia en lb/h pie<sup>2</sup> ó kg/h m<sup>2</sup>

S: Área de transferencia en pie<sup>2</sup> ó m<sup>2</sup>, característica física.

a: Área de transferencia equivalente por unidad de volumen, 1/pie ó 1/m

V: Volumen efectivo de la torre, pie<sup>3</sup> ó m<sup>3</sup>.

h<sub>w</sub>: Entalpía de mezcla gaseosa a la temperatura del agua, Btu/lb ó kJ/kg.

h<sub>a</sub>: Entalpía de mezcla gaseosa a la temperatura de bulbo húmedo, Btu/lb ó kJ/kg.

Existen parámetros citados en la Ec.21 que no son constantes, tanto entalpías como temperaturas cambian a lo largo de la torre, luego derivándola:

$$dQ = d[K \cdot S \cdot (h_w - h_a)] = K \cdot (h_w - h_a) \cdot dS \quad \text{Ec.23}$$

Para la transferencia de calor del lado del agua:

$$Q = C_w \cdot L \cdot (t_{hw} - t_{cw}) \quad \text{Ec.24}$$

$$dQ = C_w \cdot L \cdot dt_w \quad \text{Ec.25}$$

donde:

$C_w$ : Calor específico del agua, kJ/(kg °K), BTU/lb F

$L$ : Flujo másico del agua que ingresa a la torre, kg/s, lb/h

$t_w$ : Temperatura del agua en contacto con el relleno, °K, °F

$t_{hw}$ : Temperatura del agua caliente que ingresa a la torre, °K, °F

$t_{cw}$ : Temperatura del agua fría que sale de la torre, °K, °F

Para la transferencia de calor del lado del aire:

$$Q = G^*(h_{oa} - h_{ia}) \quad \text{Ec.26}$$

$$dQ = G^*dh_a \quad \text{Ec.27}$$

Donde:

$G$ : Flujo másico del aire que ingresa a la torre, lb/h ó kg/s.

$h_{ia}$ : Entalpía de mezcla gaseosa que ingresa a la torre a la temperatura de bulbo húmedo, kJ/kg, BTU/lb.

$h_{oa}$ : Entalpía de mezcla gaseosa que sale de la torre a la temperatura de bulbo húmedo, kJ/kg, BTU/lb.

Haciendo uso de las ecuaciones 23, 25 y 27, se puede obtener el calor total por medio de las siguientes ecuaciones:

$$K^*(h_w - h_a)*dS = C_w * L * dt_w \quad \text{Ec.28}$$

$$K^*(h_w - h_a)*dS = G^*dh_a \quad \text{Ec.29}$$

Que se puede describir de la siguiente manera:

$$K^* dS = G^* \frac{dh_a}{h_w - h_a} \quad \text{Ec.30}$$

$$\frac{K^* dS}{L} = \frac{C_w dt_w}{h_w - h_a} \quad \text{Ec.31}$$

Integrando las Ecuaciones 30 y 31, se tiene:

$$\frac{KS}{L} = \frac{KaV}{L} = \frac{G}{L} \int_{h_{ia}}^{h_{oa}} \frac{dh}{h_w - h_a} \quad \text{Ec.32}$$

$$\frac{KS}{L} = \frac{KaV}{L} = C_w \int_{t_{cw}}^{t_w} \frac{dt_w}{h_w - h_a} \quad \text{Ec.33}$$

“Al término  $KaV/L$  se lo denomina la característica de la torre”

La curva característica es utilizada para determinar el buen funcionamiento de la torre.  $KaV/L$  es una medida del grado de dificultad para los requerimientos de enfriamiento del líquido. Esta curva también puede llamarse “Curva de Requerimientos de Diseño” puesto que es una medida del grado de dificultad para alcanzar los requerimientos de diseño.

## 2. **Calculo de la humedad absoluta $Y'_1$ y entalpia del aire entrando $H'_1$ para la temperatura $t_{bh}$ .**

De la carta psicométrica que se encuentra en el Apéndice H, se puede construir la siguiente tabla mostrada en la tabla 3.3, esta tabla nos indica valores de entalpias y humedades para mezclas de aire – agua a  $14,7 \text{ lb/plg}^2$ .

Interpolando se obtiene valores para:

**$Y'_1=0,022 \text{ lb de vapor de agua/lb de aire seco}$**

De las relaciones psicométricas para el sistema aire – agua se obtiene que:

$$H'_1 = (0,24 + 0,45Y'_1)(t_{G1} - 32) + 1075,8 Y'_1 \quad \text{Ec. 34}$$

**$H'_1 = 24,9 \text{ BTU/lb de aire seco}$** 

Con los datos de las temperaturas, entalpías encontradas se puede construir el diagrama de operación para esta torre de enfriamiento representada en la figura 3.20, con los valores de entalpía de la mezcla aire – vapor de agua como ordenadas y los valores de temperatura como abscisas, aquí se representa la curva de entalpía para el aire saturado dado en la carta psicométrica H la cual es construida con los datos de la tabla ubicada en el Apéndice H.

Para obtener la línea de operación sobre este diagrama, se ubica el punto N que representa las condiciones de entrada de la torre, esto es,  $t_{L,1} = 82,40^\circ\text{F}$  y  $H'_1 = 24,9 \text{ BTU/lb de aire seco}$ .

La línea de operación pasara por el punto N y terminara en algún punto sobre la ordenada trazada por el punto  $t_{L,2} = 91,20^\circ\text{F}$ . Para el mínimo valor de  $G_s$ , la línea de operación tendrá la mayor pendiente y tocara tangencialmente a la curva de equilibrio, por lo tanto pasara a través del punto O', en donde  $H'_2 = 52 \text{ BTU por lb de aire seco}$

Según lo anterior, la pendiente de la línea O'N será por lo tanto:

$$L C/G_{s \text{ min}} = H'_2 - H'_1 / t_{L,2} - t_{L,1} \quad \text{Ec.35}$$

$$\frac{33000 \frac{\text{lb} \cdot 1 \text{BTU}}{\text{h} \cdot \text{lb} \cdot ^\circ\text{F}}}{G_{s \text{ min}}} = \frac{52 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}} - 24,9 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}}}{91,2 \text{ } ^\circ\text{F} - 82,4 \text{ } ^\circ\text{F}}$$

$$G_{s \text{ min}} = 10715,86 \text{ lb de aire seco / h}$$

Para que la torre no sea muy alta se considera 1,5 veces  $G_s$  min.

$$G_{s \text{ real}} = 1,5 * 10715,86 \text{ lb de aire seco / h}$$

$$\mathbf{G_{s \text{ real}} = 16073,80 \text{ lb de aire seco / h}}$$

Una vez determinado el valor  $G_{s \text{ real}}$ , se puede hallar el valor de la relación de flujos líquido – aire.

$$L / G_{s \text{ real}} = 33000 \text{ lb/h} / 16073,80 \text{ lb/h}$$

$$\mathbf{L / G_{s \text{ real}} = 2,05}$$

Como ya se tiene el valor de la pendiente de la línea de operación L/G que se va a utilizar para el diseño, faltaría determinar el valor de la ordenada del punto de intersección entre la línea de operación y la vertical trazada por el punto  $t_{L,2}=91,2 \text{ } ^\circ\text{F}$ .

### Calculo de la entalpia del aire que sale $H'_2$ .

De la ec.22 tenemos que:

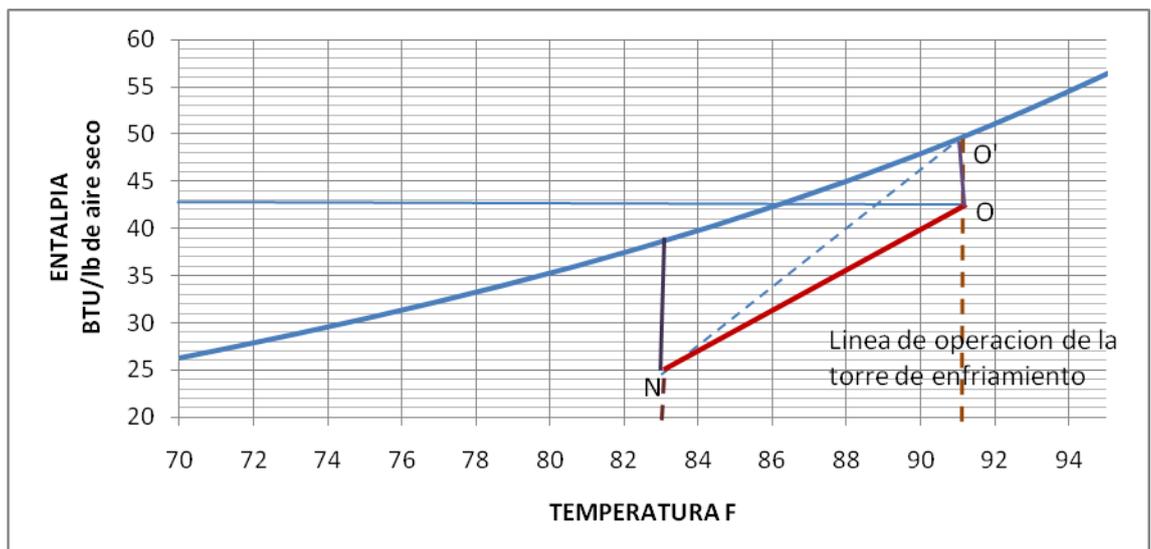
$$L C/G_{s \text{ real}} = H'_2 - H'_1 / t_{L,2} - t_{L,1}$$

Despejando el valor  $H'_2$  se tiene:

$$H'_2 = (L C/G_{s \text{ real}} * (t_{L,2} - t_{L,1})) + H'_1$$

$$H'_2 = 42,94 \text{ BTU/lb de aire seco}$$

Con los valores obtenidos se puede representar el punto O y finalmente la línea de operación será la línea ON representada en la figura 3.20.



### FIGURA 3.20. DIAGRAMA DE OPERACIÓN DE ENFRIAMIENTO DEL AGUA

#### 3. Calculo de la altura de la zona empaquetada Z

Utilizando el término  $KaV/L$  que nos representa la “Curva de Requerimientos de Diseño” dado en al ec. 33 se procede a calcular la altura de la zona empaquetada.

$$kya \frac{Z}{L'} = \int_1^2 \frac{dt}{H-H'}$$

Para determinar el valor del integral de la ecuación propuesta, el cual puede ser calculado por tres formas:

- a. Analíticamente si se conoce la relación  $f(t) = H - H'$
- b. Integración grafica
- c. Integración numérica

Como se tiene la relación  $f(t) = H - H'$  dado en la figura 3.20 se usara el método de integración numérica a intervalos de 2 °F.

t	H	H'	H - H'	(H - H')/2	At/(H - H')/2
80	25,1	18,5	6,6		
82	27,2	22,17	5,03	5,8	0,34
84	32,3	27,03	5,27	5,15	0,38

86	37,5	31,09	6,41	5,84	0,34
88	41,5	34,80	6,7	6,55	0,30
90	48,7	41,20	7,5	7,10	0,28
92	54,2	44,80	9,4	8,45	0,23

$$Kya \frac{Z}{L'} = \int_{t1}^{t2} \frac{dt}{H-H_i} \quad \mathbf{1,87}$$

### TABLA 3.3 VALORES DE ENTALPIA

$$Kya \frac{Z}{L'} = \mathbf{1,87}$$

El valor de kya se obtiene de la tabla 3.4 interpolando entre los valores de L 500 – 1000 y G 250 por lo tanto tenemos un  $Kya=347$ .

$$L' = 2\text{GPM} = 1000 \text{ lb de agua/h ft}^2$$

Por lo tanto el valor de Z es:

$$\mathbf{Z = 5,38 ft = 1,63 m}$$

<b>Empaque plg</b>	<b>Altura plg</b>	<b>L</b>	<b>G</b>	<b>k<sub>a</sub>y</b>
1Raschig	24	500	250	226
		1000	250	468
		1500	250	635
1½ Raschig	20.6	500	250	226
		1000	250	468
		1500	250	635
2 Raschig	19.1	500	250	226
		1000	250	468
		1500	250	635
½ Berl	15.5	500	250	226
		1000	250	468
		1500	250	635
1 Berl	20.3	500	250	226
		1000	250	468
		1500	250	635
1% Berl	22	500	250	226
		1000	250	468
		1500	250	635

**TABLA 3.4. CARACTERISTICAS DE HUMIDIFICACION [4]**

**4. Cálculo de la Cantidad de Agua de Compensación M.**

Realizando un balance de entalpías de acuerdo a la figura 3.18 se tiene:

$$q + M C_w (t_M - t_0) = G_s (H'_2 - H'_1) \quad \text{Ec.3.36}$$

donde:

$$q = 271825,39 \text{ BTU/h}$$

$$C_w = 1 \text{ BTU/lb } ^\circ\text{F}$$

$$t_M = 85 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$t_0 = 32 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$H'_2 = 42,94 \text{ BTU/ lb de aire seco}$$

$$H'_1 = 24,90 \text{ BTU/lb de aire seco}$$

Reemplazando valores se tiene:

$$271825,39 + M (53) = G_s (18,04)$$

De donde

$$M = G_s(18,04) - 271825,39 / 53 \quad \text{Ec. 3.36-1}$$

Haciendo un balance de liquido de acuerdo a la figura 3.18 se tiene:

$$M = G_s(Y'_2 - Y'_1) \quad \text{Ec.3.37}$$

$Y'_2$  no es conocido para determinarlo es necesario asumir que el aire que sale de la torre está saturado y su humedad  $Y'_2$  deberá ser la del aire saturado para  $H'_2 = 42,94 \text{ BTU/ lb de aire seco}$ .

Entrando a la curva psicométrica dada en el Apéndice H se tiene que:

$$Y'_2 = 0,024 \text{ lb de vapor de agua/lb de aire seco}$$

$$M = G_s(0,024 - 0,02) = 0,004 G_s$$

Sustituyendo la ec. 3.37 en la ec. 3.36 – 1 se tiene que:

$$0,004 G_s * 53 = G_s(18,04) - 271825,39$$

$$18,04 G_s - 0,004 G_s = 271825,39$$

$$G_s = 15071,26 \text{ lb de aire/h}$$

Reemplazando en la ec. 3.37 el valor  $G_s$ :

$$M = 60,28 \text{ lb de agua/h} = 27,4 \text{ lt/h}$$

## **CAPITULO 4**

### **4. DISEÑO Y SELECCIÓN DE ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO**

#### **4.1. Partes Componentes de las Torres de Enfriamiento**

Ya se ha definido que el mejor diseño para el sistema de enfriamiento requerido de acuerdo a los parámetros de evaluación es una Torre de Enfriamiento de Tiro Inducido Flujo en Contracorriente.

Este tipo de elementos, además del cuerpo vertical consta de los siguientes elementos:

Empaquetaduras, sistemas de distribución, depósito de colección, eliminadores de arrastre, ventilador, motor y estructura.

### **Empaquetaduras**

Su función es generar una mayor área de contacto entre el aire y el agua como sea posible, con una mínima presión de aire.

Existe variedad de empaquetaduras, que van desde sólidos muy fáciles de adquirir como piedras, botellas rotas, trozos de porcelana, hasta formas geométricas complejas y de alto costo económico.

### **Sistemas de Distribución**

Tiene como función principal distribuir el agua caliente en la parte alta de la torre, se recomienda atomizarla para facilitar el contacto con el aire.

La importancia de adecuado sistema de distribución sobre las empaquetaduras de una torre, es indispensable para una buena eficiencia en el enfriamiento.

### **Depósito de Colección**

Se trata de un recipiente donde es colectada el agua fría que sale de la torre.

Su construcción deberá ser tal que elimine el peligro de que la bomba absorba aire cuando opera con un mínimo de agua; y accesible, para remover la suciedad acumulada en el fondo.

**Estructura**

Es el soporte de la torre de enfriamiento.

Su forma y solidez dependen de las características de diseño de la torre, que tiene que ser con normas específicas que dependen de su capacidad de enfriamiento.

**Ventilador**

Tiene como objetivo mantener el flujo constante de aire a través de la torre. Para la torre seleccionada este aditamento se encontrará en la parte superior.

**Motor**

Es el que impulsará el ventilador. La transmisión se efectuará en forma directa.

Los elementos anteriores forman parte de la construcción interna de la torre de enfriamiento.

Sin embargo existen otros componentes externos a la torre, que juntos constituyen el sistema de enfriamiento deseado. Estos son:

**Bomba de Agua**

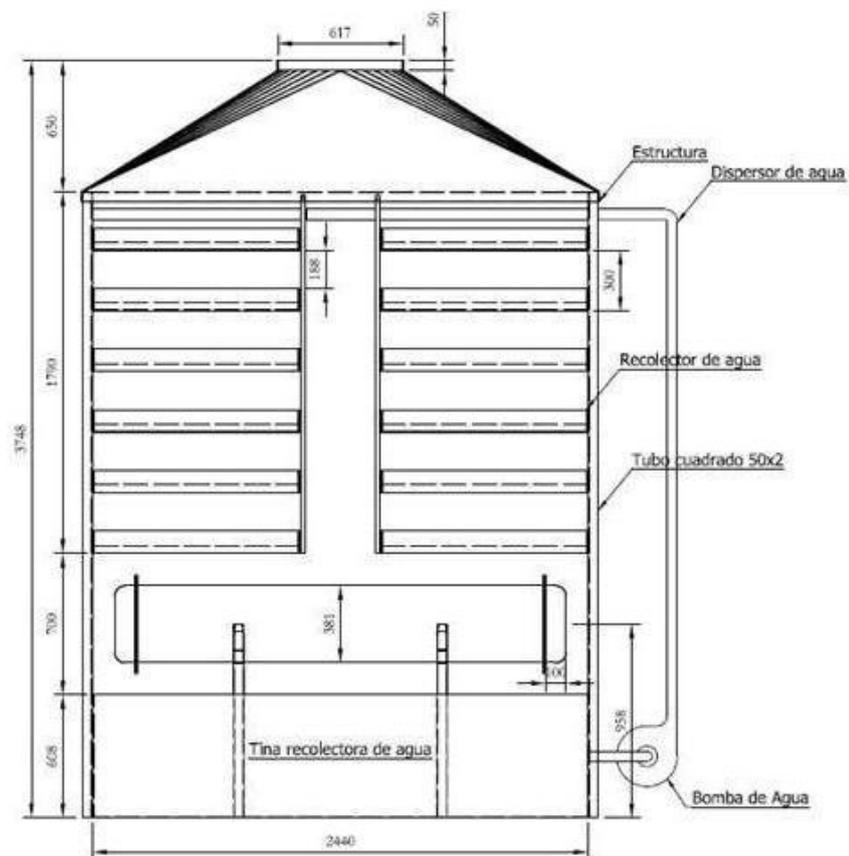
Es el equipo que adicionara energía al agua, para hacerla re circular a través de todo el sistema.

Su capacidad dependerá del sistema de operación en el que va a utilizar.

### Tuberías y Válvulas

Son los conductos – reguladores por los cuales fluirá el agua.

El material de la tubería y los tipos específicos de válvulas, estarán sujetos al aspecto técnico, económico y estético del sistema en cuestión.



## FIGURA 4.1. DISEÑO DE FORMA DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO

### 4.2. Determinación de la Sección Transversal de la Torre de Enfriamiento

#### Datos

Densidad del agua $\rho_L$	$62,22 \text{ lb/ft}^3 = 1010 \text{ Kg/m}^3$
Densidad del aire $\rho_a$	$0,077 \text{ lb/ft}^3 = 1,25 \text{ Kg/m}^3$
Relación de flujos L/G	2,05
Flujo de aire $G_{\text{real}}$	$4,46 \text{ lb/s} = 2,027 \text{ Kg/s}$
Tensión superficial del agua $\sigma$	2 dina/cm
Factor liquido - vapor $F_{LV}$	

#### Cálculos

Una aproximación para estimar las velocidades máximas permisibles ha sido presentada por Fair, la cual se basa en datos obtenidos con platos perforados y otros tipos de contactores de etapas finitas y toma en cuenta el efecto de la tensión superficial del liquido en la columna, la razón de flujo de liquido a flujo de gas, las densidades del; aire y el liquido, y dimensiones y arreglo del contactor. En este método, la

ecuación básica para velocidad del vapor máxima permisible, equivalente a la Ec. (4.1), es:

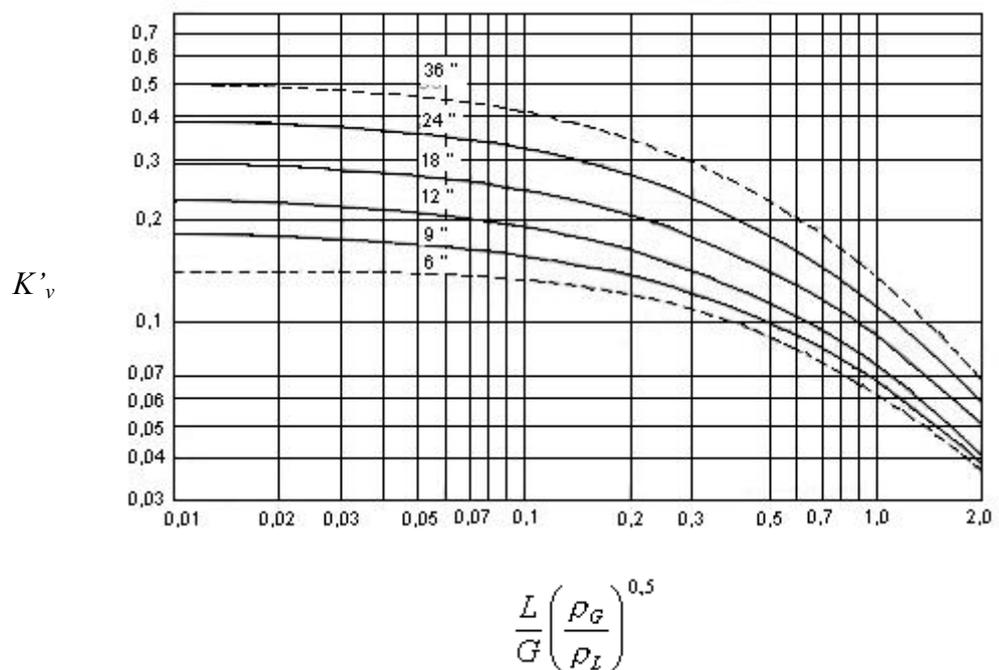
$$V'_m = K'_v \left( \frac{\sigma}{20} \right)^{0.2} \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_G}} \quad \text{Ec. 4.1}$$

donde

$V'_m$  = velocidad de vapor máxima permisible basada en área neta para el flujo de vapor, la cual usualmente es el área de sección transversal activa en ft/s.

$K'_v$  = constante empírica, ft/s

$\sigma$  = tensión superficial del liquido en la torre, dinas/cm.



**FIGURA 4.1 VALORES DE  $K_v$  EN FUNCION DEL ESPACIADO**

$$FLV = \frac{L}{G} \left[ \frac{\rho G}{\rho L} \right] \quad \text{Ec.4.2}$$

Sustituyendo valores en la ec. 4.2 se tiene que:

$$F_{LV} = 0,090$$

Se asume un espaciado entre platos de **7,40 plg = 188 mm.**

A partir de la [fig. 4.1](#)  $K_v = 0,17 \text{ ft/s}$

De la ec. 4.1

$$V'_m = 3,047 \text{ ft/s}$$

Velocidad másica del vapor  $G_m$ :

$$G_m = V'_m \rho_a = (3,047)(0,077) = 0,23 \text{ lb/s pie}^2 \quad \text{Ec.4.3}$$

Área de sección transversal de la torre A:

$$A = G_{\text{real}} / G_m \quad \text{Ec. 4.4}$$

Sustituyendo valores en la ec 4.4 se tiene que el área de la sección transversal de la torre de enfriamiento es:

$$A = 19,2 \text{ ft}^2$$

$$A = 8\text{ft} * 2,4\text{ft} = 2430 \text{ mm} * 731 \text{ mm}$$

#### **4.3. Selección de la Columna de Contacto de la Torre de Enfriamiento**

En esta sección se tratara de decidir el tipo de columna a utilizar ya sea de bandejas perforadas o de relleno en función de las características de la operación deseada y de los componentes en contacto en este caso liquido - aire, tomando para la decisión algunos aspectos.

La selección entre una columna de bandejas perforadas o una de relleno depende de conceptos económicos. Sin embargo en un estudio

preliminar podemos basar su selección en las siguientes ventajas e inconvenientes de cada una de ellas

- 1.- La eficiencia de una torre de relleno se basa en datos experimentales para cada tipo de relleno. La eficiencia varía no solo por el tipo y tamaño del relleno sino también por las propiedades del fluido, caudales, diámetro de columna etc.
- 2.- Si el flujo de líquido es pequeño comparado con el del aire es preferible utilizar columnas de platos pues necesitan menores factores de seguridad en el diseño por causa de la dispersión del líquido
- 3.- Las columnas de bandejas perforadas pueden manejar un rango más amplio de caudales sin inundación.
- 4.- Si los líquidos tienen sólidos en suspensión se prefieren torres de bandejas perforadas por la facilidad de limpieza.
- 5.- Si se necesita enfriamiento intermedio de la columna es preferible que sean de bandejas perforadas por la facilidad de la instalación del sistema de enfriamiento.
- 6.- El peso total de una columna de bandejas perforadas es menor que en una de relleno si están vacías, en cambio llenas tienen un peso similar.

- 7.- La información de diseño de una columna de bandejas perforadas es más accesible que en una de relleno.
- 8.- Si hay grandes cambios de temperatura son preferibles las columnas de bandejas perforadas pues el incremento de temperatura puede romper el relleno.
- 10.-Las columnas de rellenos son más fáciles de construir y mas baratas si se trabaja con fluidos corrosivos.
- 11.-Si se tiene líquidos con gran tendencia a formar espuma se deben utilizar torres empaquetadas
- 12.-El almacenamiento de líquido en la columna es muy inferior para las torres de relleno
- 13.-Las torres de relleno tienen menos pérdida de carga que las bandejas perforadas y el relleno previene contra el colapso, por lo que se utilizan en operaciones a vacío.

Por lo expuesto anteriormente se utilizara en el diseño de la empaquetadura de la torre de enfriamiento el sistema de bandejas perforadas.



**FIGURA 4.2 DIAGRAMA DE OPERACIÓN DE UNA BANDEJA PERFORADA**

#### 4.3.1 Altura de las Paredes de la Bandeja

La altura de la bandeja determina el volumen de líquido sobre la bandeja y es un importante factor para determinar la eficiencia de la bandeja con orificios. Una mayor altura incrementará la eficiencia de la bandeja pero a expensas de una alta caída de presión en la bandeja. Para columnas operando alrededor de la presión atmosférica, la altura de las paredes de la bandeja varía entre 40 a 90 mm (1,5 a 3,5 pulg) [7].

Para el diseño de estos elementos se tomara una altura de 90 mm para obtener una buena eficiencia de la bandeja ya que el

volumen de agua colocada en la bandeja por mayor tiempo tendrá mayor tiempo de contacto con el aire.

### **Área Perforada**

El área disponible para perforación se deducirá por la obstrucción causada por las partes estructurales (tales como soportes, anillos y vigas), y por el uso de zonas libres. Las zonas libres son espacios no perforados de la bandeja en los lados de salida y entrada. El ancho de cada zona es usualmente la misma; valores recomendados son:

Ancho de la columna	Ancho de la zona sin perforar
< 1,5 m	75 mm
>1,5 m	100 mm

**TABLA 4.1 DIMENSIONES DE ZONA SIN PERFORAR [17]**

De acuerdo a la tabla 4.1 se tomara una franja sin perforar de 75m

### **Dimensiones de las perforaciones**

Los platos perforados, tienen perforaciones de 2,5 mm a 12 mm (1/8 a 1/2 pulg.) de diámetro, siendo el tamaño común de 5 mm (3/16 pulg.) las perforaciones se hacen siguiendo un arreglo

triangular o cuadrado con una distancia entre centros entre 2 a 5 veces el diámetro de las perforaciones (el óptimo es 3,8) [17].

Se toma el valor recomendado del agujero de 3/16" por lo tanto el espaciamiento entre centros de los agujeros sería:

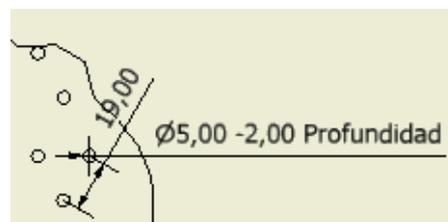
$$D = 90 \text{ mm}$$

Se escogerá un arreglo triangular para los orificios.

De acuerdo al área de la sección transversal de la torre 2430 mm\*731 mm y la disposición del diseño de forma se tiene unas dimensiones en las bandejas de:

$$\text{Bandeja} = 2000 \text{ mm} * 731 \text{ mm}$$

Al dejar una franja por los cuatro lados sin perforar de 75 mm



**FIGURA 4.3. DISPOSICION DE AGUJEROS EN LAS BANDEJAS**

Por lo planteado en el capítulo 3 se obtuvo que la altura de la zona empaquetada es de:

$$Z = 5,38 \text{ ft} = 2044 \text{ mm}$$

Para hallar el área de la sección transversal en el inciso 4.2 de este capítulo se asumió un espaciamiento entre bandejas de:

$$e = 7,40 \text{ plg} = 188 \text{ mm}$$

Por lo tanto se necesitaría 5 bandejas perforadas en la disposición dada en el diseño de forma de la fig. 4.1.

Para calcular el número de agujeros en la bandeja se recurre a la ecuación siguiente:

$$N_h = 4Ah/\pi d^2 h$$

**$N_h = 112$  orificios en la bandeja**

### **Espesor de las Bandejas**

Se considera un espesor del material para la bandeja de 1,4 mm.

Se considerara la presión que ejercería el agua, asumiendo la bandeja llena al 100%, la carga que ejerce el agua en el volumen de la bandeja es de 424,53 N.

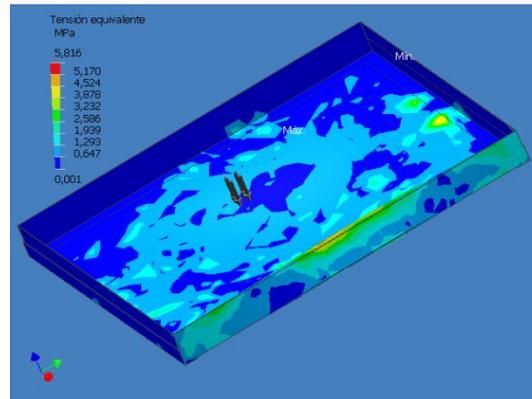
Se utilizara el software INVENTOR 10 para su análisis de esfuerzos y hallar el factor de seguridad.

## **Análisis de Resistencia mediante el Método de Elementos Finitos.**

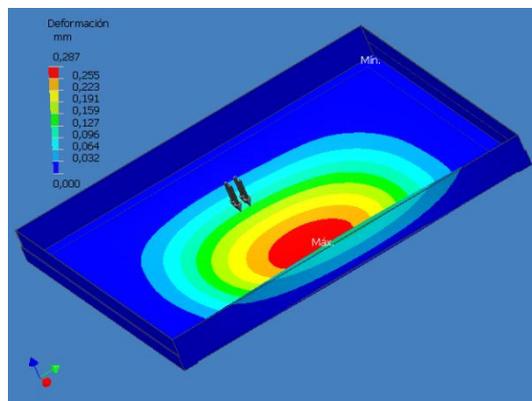
ANSYS en *INVENTOR 10* analiza: concentradores de esfuerzos, mecánicas de fracturas bajo cargas estáticas y dinámicas, así como frecuencias naturales y estabilidad. El programa ofrece distintos materiales a seleccionar para el análisis, con asunciones sobre su comportamiento: *Lineal* (la tensión es directamente proporcional a la presión); *Constante* (la temperatura de todas las propiedades es independiente); *Homogénea* (las propiedades no cambian en todo el volumen de la pieza); *Isotrópica* (las propiedades de los materiales son idénticas en todas las direcciones). El factor de seguridad se calcula utilizando el equivalente máximo de la teoría de falla de tensión para materiales dúctiles. A continuación se muestran los informes de los análisis practicados a las bandejas perforadas, las figuras indican en su parte superior izquierda la escala colorida con sus respectivos valores de Tensión Equivalente y Factores de seguridad mayores a **1.3**, *Aceptables* [19].

<b>INFORME DE ANALISIS DE BANDEJA</b>		
<b>PROPIEDADES</b>		
<b>MATERIAL</b>	ACERO	
<b>Masa de la pieza</b>	19,35 Kg	
<b>Volumen de la pieza</b>	2.465+006 mm <sup>3</sup>	
<b>Valor de relevancia de malla</b>	0	
<b>Nodos</b>	12079	
<b>Elementos</b>	6011	
<b>Módulo de Young</b>	2.1e+005 MPa	
<b>Coefficiente de Poisson</b>	0.3	
<b>Densidad de masa</b>	7.85e-006 Kg/mm <sup>3</sup>	
<b>Límite de elasticidad</b>	207. MPa	
<b>Resistencia máxima a tracción</b>	345. MPa	
<b>CARGAS APLICADAS</b>		
<b>Presión</b>	9,34e-4 MPa	
<b>Gravedad terrestre estándar</b>	9807 mm/s <sup>2</sup>	
<b>REACCION DE RESTRICCIÓN</b>		
<b>Restricción fija 1</b>	868,8 N	
<b>RESULTADOS ESTRUCTURALES</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
<b>Tensión equivalente</b>	1,042e-003 MPa	5,816 MPa
<b>Deformación</b>	0, mm	0,2868 mm
<b>Factor de seguridad</b>	<b>15</b>	N/A

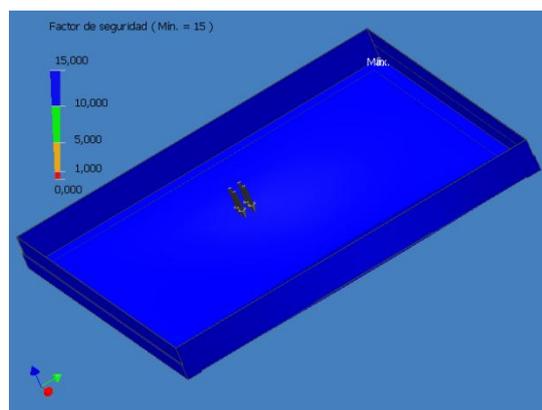
**TABLA 4.2. INFORME DE RESULTADOS DEL  
ANALISIS DE LA BANDEJA PERFORADA**



**FIGURA 4.4 TENSION EQUIVALENTE**



**FIGURA 4.5. DEFORMACION**



**FIGURA 4.6 FACTOR DE SEGURIDAD**

El diseño de la bandeja se lo presenta en el Plano N<sup>0</sup> 2 con las condiciones de la sección transversal de la torre.

### **Diseño del Depósito de Colección de la Torre de Enfriamiento**

Para determinar las dimensiones del depósito de colección de agua para la torre de enfriamiento, se debe conocer el tiempo que demora el agua en circular a través del sistema.

Se asume que el ciclo demora un minuto y se parte del dato que el depósito debería tener una capacidad mayor a la cantidad de agua que debe fluir por el sistema en un minuto y así evitar que esta se quede sin líquido además el mismo colector debe soportar el peso de la torre con sus accesorios.

Entonces el problema consiste en seleccionar dimensiones para la piscina que provean mayor economía y aseguren un buen funcionamiento. Por lo general se establece el área transversal del depósito un poco más grande que el área transversal de la torre de enfriamiento que permita el montaje de la tubería de succión o algún otro accesorio necesario.

Para el diseño de la piscina, se basará en el código ASME para recipientes a presión sección Div. 1, para tanques rectangulares que trabajan bajo presión atmosférica [15].

### **Notación**

$\alpha$ : Factor que depende del largo y ancho del tanque H/L fig.4.7.

E: Modulo de elasticidad, 30000000 psi para aceros al carbono.

G: Gravedad especifica del líquido. Agua=1.

I: Momento de Inercia,  $\text{plg}^4$ .

l: Máxima distancia entre soportes, plg.

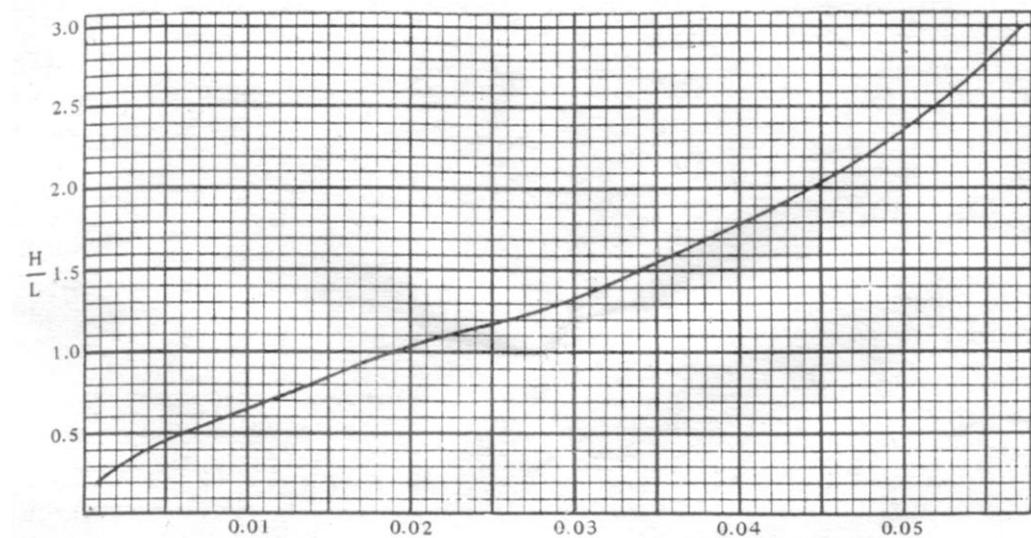
L: Largo del tanque, plg.

R: Reacción con subíndices indicando el lugar de aplicación, lb/plg.

S: Esfuerzo del material.

t: Espesor requerido de la plancha, plg.

w: Carga por unidad de longitud, lb/plg

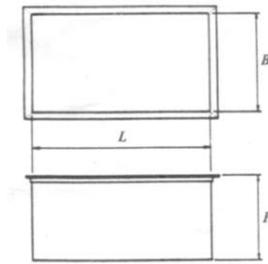


**FIGURA 4.7. VALORES DE  $\alpha$**

### **Selección del espesor de plancha**

$$t = 2.45L \sqrt{\frac{\alpha * H * 0.036G}{S}} \quad \text{Ec. 4.5}$$

El espesor se incrementara con el factor de corrosión para este caso se le aumentara 0,0645 plg o 1,63 mm.



**FIGURA 4.8 DIMENSIONES DEL DEPOSITO DE COLECCIÓN DE AGUA**

L=8 ft

H=2 ft

B=4 ft

Relación H/L = 0,25

De la figura 4.7 se obtiene el valor  $\alpha = 0,0010$

S=23200 lb/plg<sup>2</sup> para el acero estructural A – 36.

G=1 para el agua

Sustituyendo valores en la ec. 4.5 se tiene un espesor de plancha:

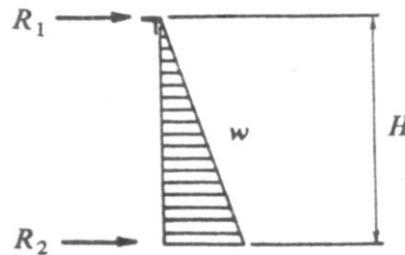
$t=0,00109$  plg.

A este valor se le suma el factor de corrosión  $0,0626$  plg.

Por lo tanto:

**$t=0,063$  plg** o  **$t=1,61$  mm** se utilizara plancha de **2mm** de espesor

### Carga en las paredes del depósito



**FIGURA 4.9 CARGAS HIDROSTATICAS**

$$W = \frac{0.036GH^2}{2}$$

Ec. 4.6

Sustituyendo valores se tiene que:

$$\mathbf{w=16,2 \text{ lb/plg}}$$

$$R1=0,3w$$

Ec. 4.7

$$R1=0,3*16,2=4,86$$

$$R2=0,7w$$

Ec. 4.8

$$R2=0,7*16,2=11,34$$

#### 4.4.2. Momento de Inercia mínimo requerido

$$I_{min} = 1.25 \frac{R1L^3}{E}$$

Ec. 4.9

Sustituyendo valores:

$$I_{min}=0,003 \text{ plg}^4 = 1248,6 \text{ mm}^4$$

#### 4.4.3. Distancia entre soportes de la piscina

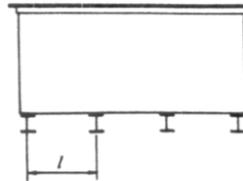


FIGURA 4.10 DISTANCIA ENTRE SOPORTES

$$t = \frac{l}{1,254 \sqrt{\frac{S}{0,036GH}}}$$

Ec. 4.10

Si el numero de soportes es 4 entonces  $l = 26 \text{ plg} = 660,4\text{mm}$ .

Sustituyendo en la ecuación 4.10:

$$t=0,141 \text{ plg}$$

Despejando el valor  $l$  de la ecuación 4.10 se tiene:

$$l = 1.254t \sqrt{\frac{S}{0,036GH}}$$

Sustituyendo valores:

$$l = 25,83 \text{ pulg}$$

Por lo tanto:

$$119,68 \text{ plg} / 25,83 \text{ plg} = \text{Numero de soportes} = N$$

**N=4,63** es decir se físicamente se necesitan 5 soportes con un espaciamiento de 25,83 plg.

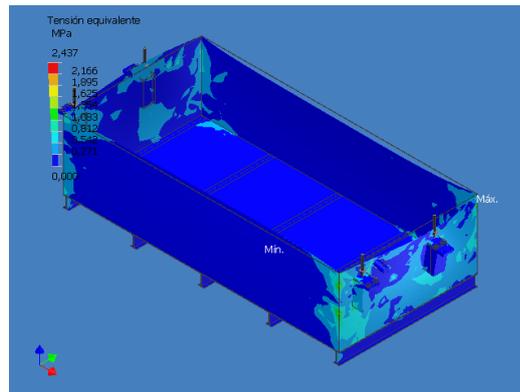
$$E=656 \text{ mm}$$

El diseño del depósito de colección de agua se encuentra en el Plano N 3.

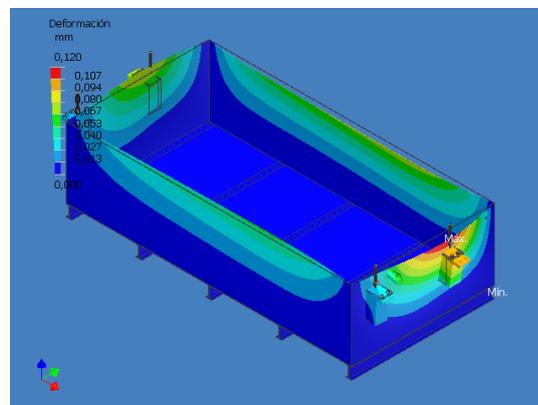
Se utilizará el software INVENTOR 10 para su análisis de esfuerzos y hallar el factor de seguridad del colector sometido a toda la carga de la torre con su peso propio y la carga de agua contenida en las bandejas.

<b>INFORME DE ANALISIS DEL COLECTOR DE AGUA</b>		
<b>PROPIEDADES</b>		
<b>MATERIAL</b>	ACERO	
<b>Masa de la pieza</b>	197,6Kg	
<b>Volumen de la pieza</b>	2.517+007 mm <sup>3</sup>	
<b>Valor de relevancia de malla</b>	0	
<b>Nodos</b>	47950	
<b>Elementos</b>	26630	
<b>Módulo de Young</b>	2.1e+005 MPa	
<b>Coefficiente de Poisson</b>	0.3	
<b>Densidad de masa</b>	7.85e-006 Kg/mm <sup>3</sup>	
<b>Límite de elasticidad</b>	207. MPa	
<b>Resistencia máxima a tracción</b>	345. MPa	
<b>CARGAS APLICADAS</b>		
<b>Fuerza</b>	1481 N	
<b>Gravedad terrestre estándar</b>	9807 mm/s <sup>2</sup>	
<b>REACCION DE RESTRICCIÓN</b>		
<b>Restricción fija 1</b>	0 N	
<b>RESULTADOS ESTRUCTURALES</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
<b>Tensión equivalente</b>	5,455e-005 MPa	2,437 MPa
<b>Deformación</b>	0, mm	0,102 mm
<b>Factor de seguridad</b>	<b>15</b>	N/A

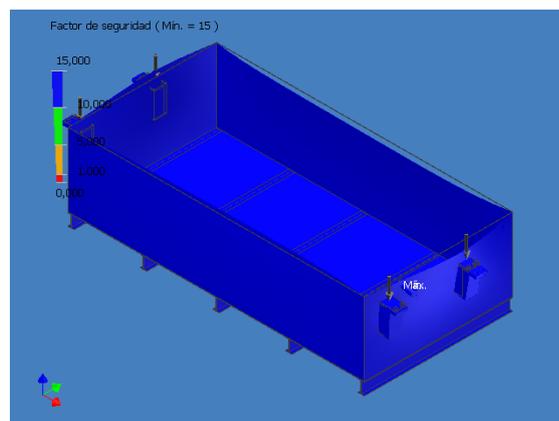
**TABLA 4.3. INFORME DE RESULTADOS DEL  
COLECTOR DE AGUA**



**FIGURA 4.12 TENSION EQUIVALENTE**



**FIGURA 4.13. DEFORMACION**



**FIGURA 4.14. FACTOR DE SEGURIDAD**

El diseño de la bandeja se lo presenta en el Plano N<sup>0</sup> 3 con las condiciones de la sección transversal de la torre.

#### 4.4. Selección del Ventilador

Para la selección del ventilador para la torre de enfriamiento es necesario conocer los siguientes datos:

1. Flujo de aire que circulara por la torre, en  $\text{ft}^3/\text{min}$
2. La presión estática o presión de resistencia contra la que debe operar el ventilador, expresada en plg. de agua.

Flujo de aire que circula por la torre  $G_s = 16056 \text{ lb/h}$ .

**$G_s = 267,6 \text{ lb/min}$**

Para determinar los pies cúbicos por minuto (pcm) de aire que salen a través del extractor, se divide las libras de aire seco por minuto, para la densidad del aire a la temperatura de operación.

$$\text{pcm} = G_s (\text{lb/min}) / \text{densidad de la temperatura de operación Ec.4.11}$$

Para determinar la densidad del aire a la temperatura de operación, es necesario calcular la temperatura a la que sale el aire de la torre.

Para esto, conociendo el valor de la humedad absoluta  $Y'2 \text{ lb}$  de vapor de agua por  $\text{lb}$  de aire seco, con que sale el aire, y asumiendo que el aire se encuentra cercanamente saturado 95%, se puede

entrar en la carta psicométrica Apéndice H y determinar dicha temperatura.

$$Y'2 = 0,024$$

Con una temperatura de salida de la torre:

$$T = 84 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Con este valor dado en la figura se encuentra que la relación de densidad del aire (RDA) a 84  $^\circ\text{F}$  y a nivel del mar es:

RDA = densidad del aire en condiciones estándar / densidad del aire en condiciones de operación  
Ec. 4.12.

$$\text{RDA} = 1,05$$

De la ec.4.11

$$1,05 = 0,077 \text{ lb/ft}^3 / \text{densidad del aire que opera a } 84 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$\rho_{84 \text{ } ^\circ\text{F}} = 0,075 \text{ lb/ft}^3$$

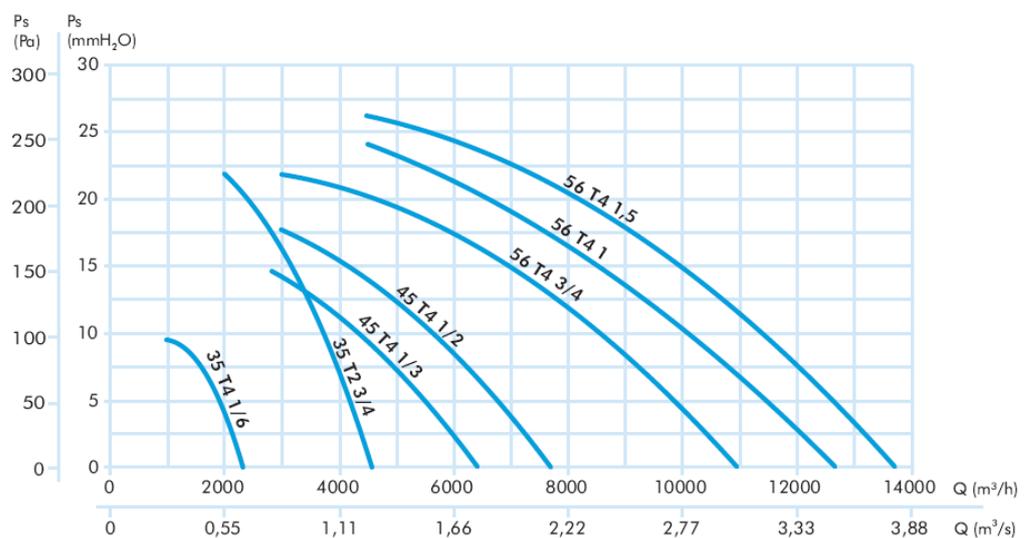
De la ec. 4.12 se tiene:

$$\text{pcm} = 3544,83 \text{ ft}^3/\text{min} = 11670,7 \text{ m}^3/\text{h}$$

Con respecto a la caída de presión estática, contra la que debe operar el ventilador, se vio que en torres de este tipo era ordinariamente menor que una pulgada de agua, por lo tanto, tomando en consideración la resistencia ofrecida al paso del aire por

la zona empaquetada y los separadores de gotas, se considera suficiente utilizar el valor de 0,5 pulH<sub>2</sub>O o 12,7 mmH<sub>2</sub>O valores que están dentro del rango de caída de presiones para este tipo de ventiladores.

Se ha escogido la curva del fabricante de la marca Ventiladores Casals y sus características se indican en el **Apéndice K**



**FIGURA 4.15. DIAGRAMA PARA SELELCCIONAR MODELO DE VENTILADOR**

Ingresando en el diagrama de la fig 4.15 con los datos planteados se selecciona el ventilador modelo 56 T4 1 con las siguientes características:

Diámetro = 650 mm

m<sup>3</sup>/h = 12700

Peso = 36 Kg

RPM max = 1525

Potencia = 0,75 Kw

Ruido = 73 db

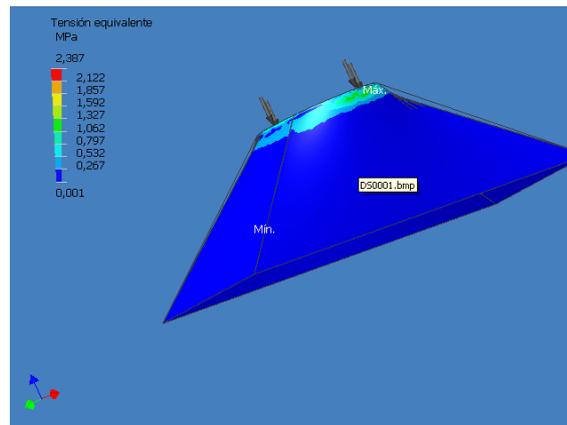


**FIGURA 4.16. VENTILADOR SELECCIONADO**

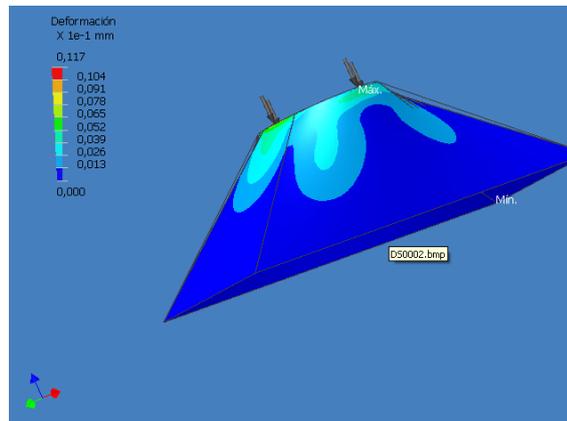
Con el peso del ventilador se diseñará la campana de extracción de vapor de agua se asumirá un espesor de 1,4 mm. Se utilizara el programa computacional INVENTOR 10 para analizar su deformación y el factor de seguridad de la campana.

<b>INFORME DE ANALISIS DE LA CAMPANA DE EXTRACCION</b>		
<b>PROPIEDADES</b>		
<b>MATERIAL</b>	ACERO	
<b>Masa de la pieza</b>	19,35Kg	
<b>Volumen de la pieza</b>	2,465+006 mm <sup>3</sup>	
<b>Valor de relevancia de malla</b>	0	
<b>Nodos</b>	12079	
<b>Elementos</b>	6011	
<b>Módulo de Young</b>	2.1e+005 MPa	
<b>Coefficiente de Poisson</b>	0.3	
<b>Densidad de masa</b>	7.85e-006 Kg/mm <sup>3</sup>	
<b>Límite de elasticidad</b>	207. MPa	
<b>Resistencia máxima a tracción</b>	345. MPa	
<b>CARGAS APLICADAS</b>		
<b>Presión</b>	9,348+-5 MPa	
<b>Gravedad terrestre estándar</b>	9807 mm/s <sup>2</sup>	
<b>REACCION DE RESTRICCIÓN</b>		
<b>Restricción fija 1</b>	0 N	
<b>RESULTADOS ESTRUCTURALES</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
<b>Tensión equivalente</b>	1,042e-003 MPa	5,816 MPa
<b>Deformación</b>	0, mm	0,2868 mm
<b>Factor de seguridad</b>	<b>15</b>	N/A

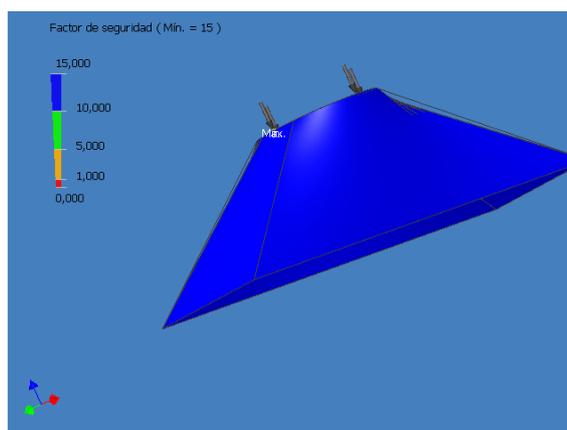
**TABLA 4.4. INFORME DE RESULTADOS DE LA CAMPANA DE EXTRACCION**



**FIGURA 4.17 TENSION EQUIVALENTE**



**FIGURA 4.18. DEFORMACION**



**FIGURA 4.19. FACTOR DE SEGURIDAD**

#### 4.5. Selección de Diámetro de la Tubería

Los criterios a utilizar para el cálculo del diámetro de la tubería son:

1. Si la energía necesaria para el movimiento del fluido es gratis, utilizar el diámetro mínimo que permita el caudal deseado.
2. Si el fluido ha de ser bombeado, hay que calcular el tamaño que permita tener los menores costes anuales (cálculo del diámetro económico)

Velocidades típicas y caídas de presión permisibles que pueden utilizarse para estimar el diámetro de la tubería son:

	Velocidad (m/s)	$\Delta P$ (kPa/m)
Líquidos bombeados (no viscosos)	1 – 3	0.5
Líquidos flujo por gravedad	-	0.005
Gases y vapores	15 – 30	0.02% presión de línea
Flujos a alta presión	30 - 60	

**TABLA 4.5 VELOCIDADES Y CAIDAS DE PRESION  
PERMISIBLES [4]**

Si se considera la densidad del fluido la velocidad óptima es:

Densidad del fluido (Kg/m <sup>3</sup> )	Velocidad del fluido (m/s)
1600	2,4
800	3,0
160	4,9
16	9,4
0,16	18,0
0,016	34,0

**TABLA 4.6 DENSIDAD DEL FLUIDO EN FUNCION DE LA VELOCIDAD [4]**

En la selección de las tuberías se tiene que considerar el caudal máximo no el nominal (aumentar 20 a 50%).

De acuerdo a la tablas 4.5 y 4.6 se tiene que:

Flujo de agua = 15 m<sup>3</sup>/h

Por lo tanto se escoge una velocidad:

$V = 2,475$  m/s este valor es interpolado de la tabla 4.3 para líquidos bombeados.

Conocido el caudal y la velocidad se puede encontrar el diámetro.

$$Q = A * V \quad \text{Ec.4.13}$$

$$A = \pi/4 D^2 = Q/V$$

Donde D diámetro de la tubería, despejando D, se tiene:

$$D = 0,0508 \text{ m o tubería de 2"}$$

#### 4.6. Selección de la Bomba para la Torre de Enfriamiento

Se tiene los siguientes datos para la torre:

$$Q = 15 \text{ m}^3/\text{h}$$

Altura de la torre se la torre 12m

Considerando las tablas del Apéndice J del manual del fabricante Golds Pumps, se selecciona la siguiente bomba:

Modelo 3196

STX 1x 1 ½ - 6

Capacidad 70 GPM, 3 ½ “, 1 ½ HP

Frecuencia: 60 Hz.

# CAPITULO 5

## 5. MONTAJE DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO PARA BATERIAS DE LOS SUBMARINOS

### 5.1. Diagrama de Gantt para la Ejecución del Proyecto

**Diagrama de Gantt.-** Para la planificación de la construcción montaje se contara con la ayuda del software Microsoft Project.

Que se lo muestra a continuación:

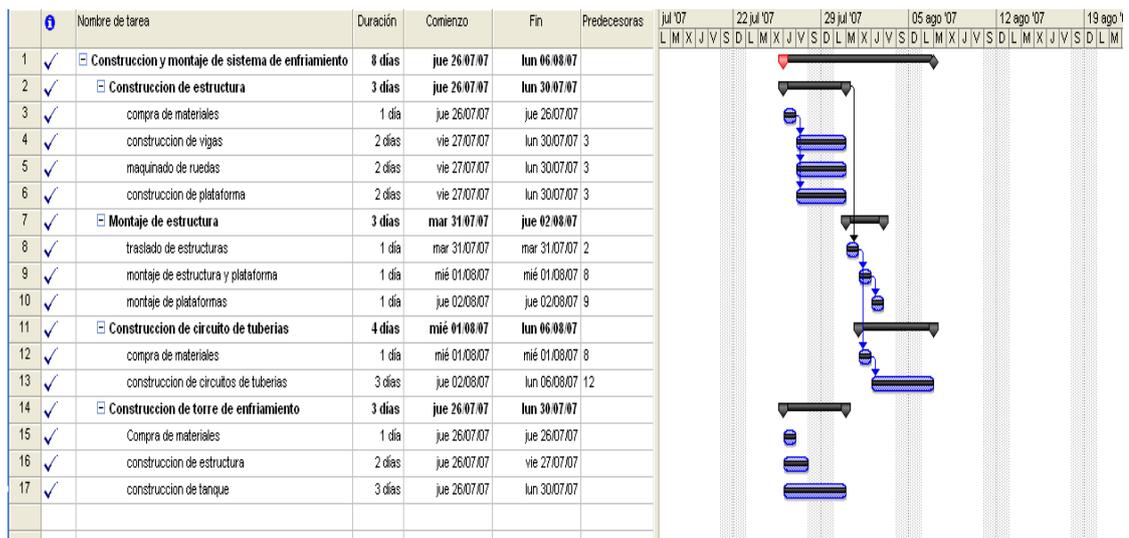


FIGURA 5.1. DIAGRAMA DE GANTT

El diagrama de la figura anterior, da los pasos que se siguieron, describiendo todo el proceso que se llevo a cabo en el proyecto utilizando óptimamente el recurso humano existente y el tiempo requerido para realizarlo.

**Levantamiento de planos del diseño de forma del sistema de enfriamiento.-** Este procedimiento se hizo para obtener una referencia del espacio disponible y con ello ver las posibles soluciones a implementar. Este proceso no consta en el diagrama de Gantt ya que lo hizo previo a la licitación ya que sería acreedora del contrato la empresa participante que presente su mejor propuesta y cotización, sin embargo se tomo 5 días para realizar este proceso.

#### 5.1.1. Preparación de Documentos, Planos de Taller y Movilización

**Elaboración de planos de taller.-** Se procederá al diseño del sistema mas optimo en este caso, torre de enfriamiento, certificación de intercambiador de calor, diseño de estructura móvil y de su estructura de soporte, a ser ejecutado para la alternativa seleccionada. Asimismo se procederá al diseño eléctrico bajo la responsabilidad ERMARLO S.A. Los planos serán sometidos a la aprobación del departamento encargado por parte de la Armada del Ecuador para iniciar los trabajos de construcción de acuerdo al cronograma presentado.

Ningún data sheet mostrado en la oferta podrá ser utilizado como base para la construcción del sistema en mención por parte de la Armada del Ecuador o terceros si la obra no se adjudica a ERMARLO S.A., con amparo a la ley de derechos de autor.

**Movilización.-** Durante el período de elaboración de planos, se procederá con la movilización de equipos, herramientas, material a las instalaciones de la Armada Nacional del Ecuador ubicada en la Base Sur. Se utilizarán baños portátiles con mantenimiento periódico. Además la logística del proyecto será reforzada con el apoyo de las oficinas e instalaciones de ERMARLO S.A. Ubicadas en la vía a Daule Parque industrial Inmaconsa.

#### **5.1.2. Fabricación en el Taller.**

El diseño, suministro de los materiales, prefabricación y pre pintura interior y exterior de las estructuras serán ejecutados por ERMARLO S.A. En el taller se construirá:

- Rieles de movilización para los soportes que llevaran la tubería de agua destilada fría y caliente con sus respectivos acoples.
- Construcción de la Torre de Enfriamiento y sus accesorios

Se ha contemplado la supervisión de un técnico de la Armada Nacional en los talleres de ERMARLO S.A., así mismo la supervisión en campo de un técnico durante la etapa de montaje. Para el efecto se ha considerado cubrir con todos los gastos relacionados con esta visita, salvo los honorarios de este técnico, los cuales correrán por cuenta de la institución contratante.

**1. Materiales.-** De conformidad con los planos de fabricación y especificaciones técnicas para la construcción de los rieles de deslizamiento y torre de

enfriamiento, se selecciona el material a utilizar verificando calidad, espesores y dimensiones generales de láminas y tuberías.

Principalmente para láminas de acero se verifican las marcas estampadas en cada plancha contra los certificados emitidos por el fabricante, de estar todo conforme se libera el material para fabricación.

## **2.- Fabricación**

**2.1.-Corte.-** Se posiciona la lámina seleccionada en la mesa de corte, procediendo al trazo y verificación conforme a medidas de plano de fabricación. Se transfieren las marcas originales de la lámina a cada parte y pieza a ser cortada para mantener su identificación durante el proceso de fabricación y en la torre de enfriamiento terminada. Se regulan los flujos de gases y velocidad de avance de la máquina de conformidad con el procedimiento específico de cada máquina y se procede a cortar el material. En esta etapa se define dentro del proceso de corte el tipo de bisel que se deja en el filo de las planchas para el posterior proceso de soldadura, todos los biseles tienen que estar detallados en los planos de fabricación. Una vez cortadas las piezas se realiza una limpieza mecánica de los bordes de la lámina, especialmente los biseles de soldadura, se inspecciona y libera el material para el siguiente proceso.

**2.2.-Conformado.-** Dependiendo de la parte de la torre que esté en proceso, las bandejas perforadas se las fabricara con este procedimiento. Adicionalmente todas las partes conformadas serán pre-ensambladas en taller para verificar su correcto dimensionamiento y agilizar el proceso de ensamble final en campo.

**2.3.-Soldadura.-** Se realizará soldadura en fábrica par elementos como patas, soportes de la cuba colectora de agua, tuberías de carga y descarga, conexiones para instrumentación de acuerdo con el requerimiento del cliente. Todas las

soldaduras de fábrica deben estar definidas en los planos de fabricación indicando el proceso de soldadura y parámetros generales que serán ejecutados. Todas las soldaduras se realizarán con procedimientos y soldadores calificados de conformidad con código ASME última edición. Los principales procesos a ser utilizados son SAW, GMAW, SMAW. Toda soldadura deberá ser inspeccionada y verificada cumpliendo los requerimientos del código ASME y condiciones particulares del Cliente si existieran.

**2.4.-Tratamiento de Superficies.-** Tanto las láminas de cuerpo como tuberías, soportes, plataformas serán preparadas y recubiertas de acuerdo con las especificaciones del cliente. En taller se realizará aplicará la primera capa de revestimiento y en campo se completara el sistema luego del montaje y pruebas del tanque. El procedimiento a seguir es el siguiente:

Se preparará la superficie utilizando chorro de granalla metálica hasta obtener un acabado SSPC - SP 10, metal casi blanco con un perfil de anclaje de 2 a 3 mils que garantice la adherencia y resistencia mecánica del sistema de pintura a aplicar. Se dispone con los equipos y condiciones adecuadas para garantizar una buena limpieza.

La pintura será aplicada conforme las recomendaciones y especificaciones de la hoja técnica del fabricante de pintura. Durante el proceso de aplicación se controla y registran los parámetros externos y condiciones de aplicación como temperatura ambiente, temperatura de la pieza, humedad relativa, punto de rocío, espesor húmedo y espesor seco.

**2.5. Factibilidad de construcción.-** Se quiere resaltar las ventajas de la fabricación de la torre de enfriamiento en Ecuador, ya que además del arancel que tendrá que pagarse sobre el tanque importado, cuando se trata de proyectos de interés público, de acuerdo a la Ley la Armada del Ecuador puede requerir la

aprobación de la importación de bienes de capital. El Ministerio encargado certificará si hay manufactura local o no para los bienes a ser importados. El producto local debe ser similar al importado, debe tener la misma función, precio competitivo, igual calidad y tiempo de entrega. Si los productos locales cumplen con los estándares de los productos importados, deben entonces ser comprados localmente, caso contrario el Ministerio no autorizará su importación.

### **5.1.3. Montaje del Sistema de Enfriamiento.**

El Supervisor de montaje será responsable de la eficiente coordinación del Proyecto, la Armada del Ecuador será informado continuamente de todas las acciones a tomar.

ERMARLO S.A. dispondrá de todos los equipos y herramientas necesarios para enfrentar adecuadamente los trabajos, incluyendo grúas, compresores, generadores, soldadoras, equipo para prueba hidrostática, etc.

El montaje del sistema de enfriamiento obedece a una secuencia establecida en los procedimientos y normas aplicables para este tipo de trabajos.

En resumen, las actividades principales que es necesario cumplir son las siguientes:

#### **Revisión de la fundación de las estructuras deslizantes y la torre de enfriamiento.**

Antes del montaje del sistema de guías para la estructura deslizante y para la torre de enfriamiento se verificarán

cuidadosamente la topografía e integridad estructural de las fundaciones. También se comprobará que el terreno esté adecuado para los diferentes movimientos de los equipos de montaje.



**FIGURA 5.3 ALINEACION DE PISO DONDE SE ASENTARA LA TORRE DE ENFRIAMIENTO**

### **Montaje de la estructura de soporte del sistema deslizante**

Una vez revisada y aprobada las estructuras donde se va a montar el sistema deslizante, la cual llevara las tuberías de agua destilada a las baterías, por parte de ERMARLO S.A., se procederá a la instalación de cada una de las vigas transversales donde se delizara el sistema de tuberías.



**FIGURA 5.2 SISTEMA DE DESLIZAMIENTO**

### **Soldadura en obra**

Las vigas del sistema de deslizamiento, la torre y sus estructuras serán soldados por cualquiera de los procesos SMAW y SAW, utilizando los equipos adecuados. La soldadura puede ser manual, semi-automática o automática, de conformidad a lo que establezca el procedimiento de soldadura correspondiente.

Se tendrá una revisión estricta de las condiciones de los biseles, eliminación de escoria antes de efectuar el siguiente cordón, inspecciones visuales de la soldadura, inspecciones radiográficas de acuerdo al Código se es necesario.

Las láminas del cuerpo, en juntas de tope, serán alineadas en su posición antes de soldar las mismas.

#### **5.1.4. Preparación de Superficie y Pintura en Sitio**

Con el fin de asegurar la culminación del proyecto dentro del tiempo especificado, así como para minimizar los daños ambientales y proteger los materiales prefabricados durante su transporte, se ha considerado realizar la preparación y pre pintura de superficies exterior e interior de las estructuras en taller.

Las capas finales de pintura serán aplicadas en el campo, de acuerdo a las especificaciones establecidas propuestas por ERMARLO S.A.. Las áreas de pintura que deban repararse o terminarse en se las reparará en obra.

#### **5.1.5. Prueba Hidrostática del Sistema de Tuberías e Intercambiador de Calor.**

Una vez instalado y pintado la torre de enfriamiento con el intercambiador de calor sumergido en la piscina recolectora de la torre se procederá a realizar la prueba hidrostática y la posterior desinfección del mismo de acuerdo a lo especificaciones en las bases de licitación entregada por la Armada del Ecuador.

#### **5.1.6. Bombas de agua.**

Existen dos bombas a ser montadas, véase la figura 5.3. La bomba 1, para el sistema de agua destilada de circulación por las baterías y al intercambiador de calor, la bomba 2 figura 5.4., para la recirculación del agua en la torre de enfriamiento. Las características de todas ellas han sido ya establecidas, en capítulos anteriores.

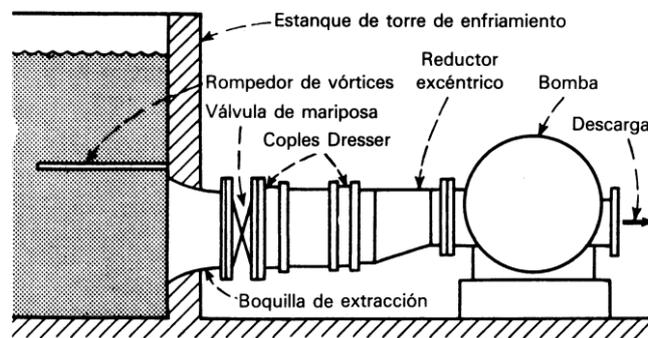


**FIGURA 5.3. BOMBA PARA AGUA DESTILADA QUE ENTRA EN LAS BATERIA**



**FIGURA 5.4. BOMBA DE AGUA PARA TORRE DE ENFRIAMIENTO**

Para el montaje se deben respetar las especificaciones dadas, ya sea por las normas respectivas o, seguir recomendaciones técnicas. En este caso se hará lo posible por cumplir las recomendaciones dadas[12]. Para el caso de la tubería de succión, se da la figura 5.5.



**FIGURA 5.5. TUBERIA DE SUCCION [12]**

Otra recomendación dada radica en que se debe evitar, para el transporte, el uso de tuberías de igual diámetro al de ingreso o salida del agua de la bomba; deben ser las inmediatas superiores. Esto se cumple, con los cálculos, solo cuando la bomba está bien dimensionada; pero no en el caso de la bomba 2, debido a que esta se encuentra sobredimensionada. Por ello, el diámetro de la tubería de salida es igual diámetro de la tubería de transporte de agua; en el ingreso, caso igual, se usa una tubería de 2".

#### 5.1.6. Instalación Eléctrica.

Se ha contemplado el diseño, instalación, suministro y pruebas de un sistema eléctrico el mismo que tendrá los controles y mandos para activar ventilador de la torre, activación de las bombas de agua, control de ventiladores del cuarto de activación.



**FIGURA 5.6.TABLERO DE CONTROL ELECTRICO**

Toda tubería eléctrica se asegurará con abrazaderas o soportes de acero a la estructura de la torre o a las paredes por donde crucen los cables.

#### **5.1.7. Graficas Representativas del Montaje de la Torre de Enfriamiento**



**FIGURA 5.7. INTERCAMBIADOR SUMERGIDO EN COLECTOR DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO**



**FIGURA 5.8. BANDEJAS PERFORADAS INSTALADAS EN LA TORRE DE ENFRIAMIENTO**



**FIGURA 5.9. TORRE DE ENFRIAMIENTO INSTALADA**

**5.2. Lista de materiales y equipos requeridos para el montaje.**

En las siguientes tablas se listan los materiales y equipos requeridos para el montaje realizado, adicionalmente se indica si se empleó algo usado o nuevo, así como su cantidad.

## EQUIPOS Y HERRAMIENTAS

	<b>Equipo/herramienta</b>	<b>Tamaño/especificación</b>	<b>Condición</b>
01	Arco para sierra	Estándar de 12"	En bodega
02	Broca para acero	HSS, Ø 3/8" x 4"	En bodega
03	Broca para cemento	Percusión, Ø 3/8" x 4"	En bodega
04	Broca para cemento	Percusión, Ø 1/2" x 6"	En bodega
06	Cepillo de acero	6 hileras.	En bodega
07	Destornillador plano	5 mm. x 150 mm.	En bodega
08	Emulsión lubricante	Proporción 1/20	En bodega
09	Flexómetro	8 m. x 25 mm.	En bodega
10	Guantes de cuero	Par / manga corta (10")	En bodega
11	Hoja de sierra	12" x 1/2" x 1/32"	Comprada
12	Hoja de sierra	24" x 1 1/4" x 1/16"	Comprada
13	Llave mixta	3/8"	En bodega
14	Llave mixta	9/16"	En bodega
15	Llave mixta	5/8"	En bodega
16	Llave para tubo	Largo 12", abre hasta 2"	En bodega
17	Llave para tubo	Largo 24", abre hasta 3 1/2"	En bodega
18	Llave para tubo	Largo 36", abre hasta 5"	En bodega
19	Nivel	Aluminio, largo 24"	En bodega
20	Pie de amigo	De 24" de ángulo de 3/4"	Construido
21	Piola de algodón	Rollo de 50 gramos.	Comprado
22	Prensa para tubo	De tornillo, para Ø 4"	En bodega
23	Sierra alternativa	Para aserrar acero	En taller

24	Taladro de mano	Capacidad ½" ≈ 13 mm.	En bodega
25	Taco Fisher	F10	Comprado
26	Tarraja para tubo	Manual, para Ø ½" a 2"	En bodega
27	Teflón	Rollo, 19mmx15mx0.2mm	Comprado
29	EPP		Comprado
30	Material de aporte	E6011, E6013, etc	Comprado
31	Equipo de oxicorte	Acetileno, oxígeno, manom	En bodega
32	extintores	Polvo químico seco	En taller
33	tecle	2 Ton	En bodega
34	<b>Maq. De soldar</b>		<b>En bodega</b>

**TABLA 5.1. LISTA DE EQUIPOS Y HERRAMIENTAS**

### 5.3. RESUMEN DE COSTOS

ITEM	MATERIALES	Cantidad	unidad	mater	peso	V Unitario	V Venta
------	------------	----------	--------	-------	------	------------	---------

#### Soportaría fija y estructura móvil

Correa G 125 x 50 x 15 x 3	6	unid		33.24	32.91	197.45
plancha 4	1	unid		93.34	92.41	92.41
ángulo laminado 40 x 3	9	unid		11.00	10.89	98.01
ángulo laminado 50 x 4	3	unid		23.55	23.31	69.94
Correa G 80 x 50 x 15 x 3	9	unid		24.06	23.82	214.37
malla electro ARMEX R- 131 (5.15)	52	mc		1.00	2.00	104.00
perno expansión 5/8" x 3"	24	unid		0.12	0.60	14.40

Pintura	4	galón		1.00	15.00	60.00
ruedas para correas	12	unid		1.00	25.00	300.00
ángulo laminado 25 x 3	6	unid		7.06	6.99	41.94
Materiales estructura					1,192.52	
Mano de obra estructura					715.51	
Total estructura					<b>1,908.03</b>	

### Sistema de tuberías y accesorios

tubo PVC 2"	20	unid		1.00	14.00	280.00
accesorio T 2"	2	unid		0.30	2.40	4.80
tapón 2"	4	unid		0.20	1.60	6.40
unión 2"	10	unid		0.20	1.60	16.00
bushing 2" x 1/4"	4	unid		0.20	1.60	6.40
manguera 2"	6	m		1.00	35.00	210.00
acople para manguera 2" x 2"	4	unid		2.00	16.00	64.00
abrazaderas 2"	8	unid		1.00	6.00	48.00
manguera 1/4"	300	m		1.00	2.50	750.00
abrazadera 1/4"	480	unid		1.00	0.30	144.00
tubo galvanizado 1 1/4"	7	unid		1.00	33.60	235.20
codo pvc 2"	4	unid		0.20	1.60	6.40
codo galvanizado 1 1/4"	4	Unid		0.20	1.80	7.20
nudo 2"	4	unid		0.30	2.40	9.60
acoples para manguera 1/4"	240	unid			1.00	240.00
Materiales sistema distribución agua enfriamiento / aire					2,028.00	
Mano de obra sistema distribución agua					811.20	

enfriamiento					
Total sistema distribución				<b>2,839.20</b>	

**Torre de enfriamiento**

tubo cuadrado 80 x 3	4	unid	45.21	44.76	179.03
ángulo laminado 50 x 3	8	unid	14.30	14.16	113.26
ventilador axial para torre enfriamiento	1	unid		1,200.00	1,200.00
plancha 3 para deposito de agua torre	2	unid	70.40	69.70	139.39
control nivel de agua torre	1	global		15.00	15.00
plancha galvanizada para bandejas	8	unid	42.24	59.14	473.09
plancha galvanizada para paredes	8	unid	32.85	45.99	367.92
bomba de circulación 80 gpm – 30 psi	1	unid		1,200.00	1,200.00
arrancador para bomba de circulación y ventilador	1	global		320.00	320.00
difusores y encausadores de torre	1	global		350.00	350.00
tubería y válvulas de control de circulación	1	global		235.00	235.00
Material torre				4,592.69	
Mano de obra torre				1,561.51	
Total torre				<b>6,154.20</b>	

**EQUIPOS SUMINISTRADOS POR ARMADA DEL ECUADOR**

Intercambiador de calor de haz tubular	0.00
Bomba PN 50 – 32 – 145 para agua des-ionizada	0.00

**NOTA** no se encuentra agregado el valor del IVA.

# CAPITULO 6

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. Conclusiones

1. El método usado por el texto de Procesos de transferencia de calor de Kern, y al comparar con el programa computacional para la selección del intercambiador de calor son similares, concluyendo que el programa funciona correctamente y este caso el intercambiador disponible cumple con los requerimientos para reducir la temperatura requerida para el sistema.
2. El equipo diseñado cumple con lo establecido en el análisis del problema y las restricciones.
3. El método de construcción utilizado, especialmente los procesos de soldadura garantizan el buen funcionamiento del equipo.
4. Se ha adquirido mas conocimientos sobre las torres de enfriamiento y sobre su valor característico  $KaV/L$ . A mayor valor, mayor dificultad para lograr el enfriamiento deseado. Adicionalmente se ratifico los conocimientos adquiridos.

5. Se ha utilizado varios sistemas computacionales para comprobar los resultados adquiridos e implementar estos programas en el trabajo diario dentro del departamento de proyectos de ERMARLO S.A.
6. Se ha utilizado tablas, normas y códigos de selección y diseño, de esta manera logrando un método de selección más rápida para la ejecución de un proyecto.
7. El control de calidad dentro del proceso de construcción y montaje es muy importante en la entrega final del trabajo, para la satisfacción del cliente y realzar el nombre de la empresa constructora.
8. Una gran experiencia de trabajo en equipo tanto con el personal encargado de la construcción como la interacción con el personal de la Armada del Ecuador.

## **6.2. Recomendaciones**

1. Cuando se desee realizar la evaluación de un intercambiador de calor o una torre de enfriamiento, se debe seguir un sin número de especificaciones, para tenerlas a mano. Personalmente me pareció muy buena la guía del texto Procesos de Transferencia de Calor.
2. Se requiere implementar un estudio detallado, para el manejo de todos los desechos generados.
3. Se tendría que hacer un plan de mantenimiento para los equipos constitutivos del sistema de enfriamiento.
4. Revisar permanentemente las instalaciones eléctricas ya que se tiene un ambiente explosivo por las emanaciones de hidrogeno de las baterías al estar activándose.

5. La pintura de la torre de enfriamiento debería estar en control para evitar corrosión en la estructura.
  
6. En la construcción y el montaje se recomienda el correcto uso del Equipo de Protección Personal, así como los implementos para realizar trabajos en altura, trabajos en caliente o lugares confinados, para evitar lesiones por parte de los integrantes del proyecto.
  
7. Tener en consideración todas las normas de seguridad que tiene la institución (Armada del Ecuador) para evitar sanciones al personal que está ejecutando el proyecto.
  
8. Implementar un mejor sistema de ventilación en el cuarto de activación de baterías ya que este tiene demasiados contaminantes en el ambiente.

## BIBLIOGRAFIA

1. Gonzalez Jorge, "Aplicación de la Investigación de Operaciones al Diseño Óptimo de un Intercambiador de Calor" (Tesis, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1970).
2. Kern Donald, Procesos de Transferencia de Calor, Editorial CECSA, 1995.
3. Hickstyler, Manual de Cálculos para las Ingenierías, Tercera Edición, Tomo II, McGraw Hill, 1998.
4. Torres Alberto, "Diseño de una Torre de Enfriamiento de Agua para Uso Industrial" (Tesis, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1973).
5. Andrade Francisco Ing., Ventilación Industrial, Diplomado en Manejo Ambiental, ESPOL, julio 2001.
6. Manual Práctico de Ventilación, Catálogo Técnico, Salvador Escoda S.A.
7. Perry Robert-Green Don, PERRY, Manual del Ingeniero Químico, Séptima Edición, Volumen II, Mc Graw Hill.
8. Load & Resistance Factor Design, Manual of Steel Construction, AISC, First Edition.
9. Incropera P. Frank-De Witt P. David, Fundamentos de Transferencia de Calor, Cuarta Edición, Prentice Hall.
10. Granet Irving, Termodinámica, Tercera Edición, Editorial Prentice Hall, 1998.
11. Goulds Pump Manual, Sexta Edición, Goulds Pumps Inc. 1995.

12. McNaughton Kenneth, Bombas, Selección, Uso y Mantenimiento, Editorial Mc. Graw Hill, 1992.
13. David Linden Thomas B. Reddy, Handbook of Batteries, McGraw Hill, Third Edition, 1995
14. Pedro Fernández Díez, Bombas Centrifugas y Volumétricas, 2002.
15. Eugene F. Megyesy, Pressure Vessel Handbook, Publishing Inc. Sexta edición.
16. Holman J. P. Transferencia de Calor, Octava edición, Prentice Hall, 2001.
17. Dpto. Ingeniería Química y Textil, Diseño de Equipos e Instalaciones, (Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Salamanca).
18. Peters and Timmerhaus, Plant Design and Economics For Chemical Engineers, McGraw Hill.
19. Introducción al Programa ANSYS.
20. Avallone Eugene A., Baumeister III Theodore, MARKS, Manual del Ingeniero Mecánico, Novena Edición, Tomos I y II, Mc Graw Hill.
21. <http://www.ipac.es/acero/fabricacion.asp>
22. <http://www.evapco.com>
23. <http://www.casals.com>
24. <http://www.amcot.com>
25. <http://www.monografias/trabajos10/toen/toen.zip>

