



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**Propuesta de ahorro de agua en una  
torre de enfriamiento disminuyendo la  
temperatura de agua de suministro en  
función del uso de diferentes tipos de  
empaques.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA**

**JAIR JUAN MANUEL MARTÍNEZ MIGUEL**



**MÉXICO, D.F.**

**2011**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado Asignado:

<b>Presidente</b>	<b>Prof. Alejandro Anaya Durand</b>
<b>Vocal</b>	<b>Prof. Reynaldo Sandoval González</b>
<b>Secretario</b>	<b>Prof. Alfonso Durán Moreno</b>
<b>1er. suplente</b>	<b>Prof. José Antonio Ortiz Ramírez</b>
<b>2do. suplente</b>	<b>Prof. José Agustín Texta Mena</b>

Sitio donde se desarrolló el tema:

Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México.  
Torre de Ingeniería.  
Tercer piso, ala sur. Ciudad de Universitaria

Asesor del tema:

---

**Dr. Alfonso Durán Moreno**

Supervisor técnico:

---

**Ing. Iván Frantz Blanco Hernández**

Sustentante:

---

**Jair Juan Manuel Martínez Miguel**

Dedico este trabajo de tesis a dos personas incondicionales e inigualables, que con su apoyo, comprensión y todas sus enseñanzas he logrado concluir este objetivo tan importante en mi vida y a quienes les debo todo lo que soy.

Este logro es de ustedes Papás: Manuel Martínez y Rocío Miguel

Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica... la voluntad.

Albert Einstein.

## *AGRADECIMIENTOS*

*A mi Mamá Rocío, por todo el amor, apoyo y por enseñarme a tener el carácter de enfrentar cualquier circunstancia de vida, eres la base de toda mi persona y sin ti nada de esto sería posible.*

*A Manuel, por que se que darías todo por mi y por tu gran amor y apoyo, gracias eres mi ídolo Papa.*

*A la memoria de abuelito Manuel y a mis abuelitas Enedina y Mamá Chonita por todo su cariño y amor que me han brindado durante toda mi vida.*

*A mis hermanos Eder, Diana y Janet por aguantarme tanto y por todo su gran apoyo.*

*A mi princesa Gris Arjón por compartir conmigo estos momentos increíbles y concluir esta etapa con mucha felicidad a tu lado.*

*A toda mi familia tíos y primos, en especial a mis tíos Laura, Porfirio, Juan, Silvia y Rocí por dar seguimiento e interés en mis estudios.*

*Al Dr. Alfonso Dúran Moreno por brindarme la oportunidad de desarrollar mi carrera profesional y por la revisión de este trabajo.*

*A mis súper cuates de la Fac. Flor, Aline, Carlitos, Cheko y Mario, por compartir y hacer todos esos momentos fabulosos en la universidad.*

*A mis amigos de la Universidad Pam, Chio, Wawis, Pooh, Vila, Lazaro, Geovani, Ayú, Raulito, Manuel, el Chino por disfrutar todas esas fiestas y eventos en la fac.*

*A mis Brous de la Prepa No3 Jorge, Ismael, Esau, Adrian, Mona y Gaby que siempre han estado cuando los he necesitado y cuando no también.*

*A Ixel Glez por el apoyo brindado en el transcurso de mi carrera.*

*Al Ingeniero Iván Frantz Blanco por compartirme sus conocimientos, experiencia, ayuda y tiempo para la elaboración de este trabajo.*

*A mis amigos de la torre Evelyn, Nash, Chucho, Miguelon, Mauro, Marin, Carlos y Abril.*

*Al ingeniero Aldupre por invitarme y permitir realizar este trabajo en el grupo de Ambiental*

*A la Virgen de Juquila y a Dios.*

*“Por mi raza hablara el espíritu”*

**ÍNDICE DE CONTENIDO**

<b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b> .....	1
RESUMEN .....	7
1 INTRODUCCIÓN .....	9
1.1 Problemática .....	10
1.2 Objetivo general .....	11
1.3 Objetivos particulares.....	11
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	13
2.1 Operación de la torres de enfriamiento .....	13
2.1.1 Temperatura de bulbo húmedo.....	13
2.1.2 Principio de operación de la torres de enfriamiento.....	14
2.1.3 Descripción de las torres de enfriamiento.....	16
2.2 Tipos de torres de enfriamiento.....	16
2.2.1 Torres de enfriamiento de tiro natural.....	17
2.2.2 Torres de enfriamiento de tiro mecánico .....	17
2.3 Componentes generales de las torres de enfriamiento.....	21
2.3.1 Componentes Estructurales .....	22
2.3.2 Componentes Internos .....	23
2.3.3 Componentes Mecánicos y Eléctricos.....	26
2.4 Funcionamiento dinámico de las torres de enfriamiento.....	27
2.5 Balance general de agua en una torre de enfriamiento.....	30
2.5.1 Consumo de agua .....	30
2.5.2 Relación de las variables de operación.....	33
3 FUNDAMENTOS TÉRMICOS.....	34
3.1 Transferencia de calor y masa .....	34
3.1.1 Variables de funcionamiento de las torres de enfriamiento.....	36
3.1.1.1 Temperaturas usadas en torres de enfriamiento.....	36
3.1.1.2 Carga térmica disipada .....	37
3.1.1.3 Capacidad de enfriamiento .....	37



3.1.2	Teoría de Merkel.....	38
3.1.3	Análisis de los requerimientos de la torre de enfriamiento .....	42
3.2	Curvas de demanda y características de las torres de enfriamiento. ...	43
3.2.1	Curvas de demanda de la torre .....	44
3.2.2	Curva característica de las torre .....	45
3.2.2.1	Relación entre las curvas característica y demanda.....	48
3.3	Características de los empaques usados en torres de enfriamiento. ...	49
3.3.1	Empaques de tipo película (Film fill) .....	50
3.3.2	Empaques tipo salpiqueo (Splash bar fill).....	50
3.3.3	Altura del empaque.....	52
3.3.4	(Air travel) del empaque. ....	52
4	CASO DE ESTUDIO .....	54
4.1	Descripción del problema.....	54
4.2	Análisis preliminar .....	56
4.2.1	Empaque V-bar.....	57
4.2.2	Empaque Opti-Bar .....	58
4.2.3	Empaque Turbo Splash .....	58
5	METODOLOGÍA .....	61
6	DESARROLLO.....	65
6.1	Revisión y verificación de información .....	65
6.2	Balance de materia teórico y carga térmica disipada teórica .....	66
6.2.1	Análisis de las pérdidas por evaporación arrastre y purgas .....	68
6.3	Inspección física de la torre de enfriamiento DE-500.....	69
6.3.1	Estructura general y escaleras .....	69
6.3.2	Relleno o empaque.....	70
6.3.3	Eliminadores de arrastre.....	70
6.3.4	Sistema de distribución.....	70
6.3.5	Persianas.....	71
6.3.6	Ventiladores.....	71
6.3.7	Chimenea o Venturi .....	71
6.4	Cálculo de la Capacidad de enfriamiento mediante simulaciones (método CTI).....	73



6.5	Requerimientos de la planta de proceso que suministra agua de enfriamiento la torre DE-500.....	74
6.6	Cálculo de la altura del empaque y el KaV/L de la torre.....	75
6.7	Cálculo del volumen del empaque de las condiciones actuales.....	77
6.8	Propuesta “Ahorro de agua de pretratamiento a través del mantenimiento y rehabilitación de la torre de enfriamiento DE-500” .....	78
7	RESULTADOS.....	84
7.1	Capacidad de enfriamiento con las condiciones de la propuesta.....	87
7.2	Dimensiones del empaque necesario para alcanzar los requerimientos en la propuesta .....	87
7.3	Componentes rehabilitados de la torre.....	89
7.3.1	Estimado del costo de inversión de los componentes de la torre .	91
7.4	Evaluación y selección de la tecnología de los empaques para el incremento de la capacidad de enfriamiento .....	92
7.5	Costos de Inversiones.....	96
7.5.1	Costos de mano de obra civil.....	96
7.5.2	Costo de materiales de instalación .....	96
7.5.3	Mantenimiento Preventivo .....	96
7.5.4	Inversión Total .....	97
7.6	Consideraciones financieras .....	97
7.7	Beneficios ahorros e impactos .....	99
7.8	Evaluación financiera .....	99
7.9	Indicadores de rentabilidad .....	103
8	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	105
9	CONCLUSIONES .....	108
10	BIBLIOGRAFÍA.....	111
11	ANEXOS.....	116
Anexo 1	Método de los cuatro puntos de Tchebycheff .....	116
Anexo 2	Datos generados a condiciones por el CTI.....	117
Anexo 3	Funcionamiento del apartado Demand Curve del CTI.....	119



Anexo 4	Curvas características de los tres tipos de empaques a condiciones rehabilitadas.....	121
Anexo 5	Estimación de costos totales de la rehabilitación de la torre DE-500. ....	124
Anexo 6	Metodología de cálculo de indicadores financieros .....	125
Anexo 7	Desarrollo de la curva Opti-Bar.....	126

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Información general de las torres de enfriamiento.....	19
Tabla 1.	.....	20
Tabla 1.	.....	20
Tabla 2.	Principales componentes de las torres de enfriamiento.....	21
Tabla 3.	Condiciones de diseño de la torre de enfriamiento ubicada en el complejo petroquímico. ....	56
Tabla 4.	Resultado de las mediciones de flujo en la torre DE-100 .....	65
Tabla 5.	Capacidad del flujo actual de la torre de enfriamiento con respecto al flujo de diseño .....	65
Tabla 6.	Resultado de las mediciones de las temperaturas.....	66
Tabla 7.	Pérdidas de agua en la torre DE-500.....	68
Tabla 8.	Cuantificación y ubicación de las fuga en la torre de enfriamiento ..	69
Tabla 9.	Condiciones de operación de la torre de enfriamiento DE-500.....	72
Tabla 10.	Capacidad de enfriamiento de la torre DE-500.....	74
Tabla 11.	Ecuaciones que describen el comportamiento de los empaques .	75
Tabla 12.	Altura de los empaques usados en la torre DE-500 .....	77
Tabla 13.	Volumen actual del empaque en la torre DE-500 .....	78
Tabla 14.	Capacidad de enfriamiento de la torre DE-500.....	87
Tabla 15.	Condiciones de operación de la torre DE-500 .....	88
Tabla 16.	Dimensiones de cada empaque .....	88
Tabla 17.	Daños en las partes principales de la torre DE-500.....	89



Tabla 18.	Propuestas de remplazo de los componentes de la Torre DE-500...	90
Tabla 19.	Estimado del costo de inversión de cada componente.....	91
Tabla 20.	Estimado del costo de inversión de cada componente.....	92
Tabla 21.	Tecnólogos consultados .....	92
Tabla 22.	Características de cada tecnología de empaques.....	93
Tabla 23.	Escala de calificación de premisas .....	94
Tabla 24.	Resultados de la evaluación tecnológica para Empaques tipo salpiqueo. ....	95
Tabla 25.	Selección de la tecnología para Empaques del tipo salpiqueo en torres de enfriamiento. ....	95
Tabla 26.	Programa de Inversión Total .....	97
Tabla 27.	Ahorro y beneficio de la propuesta para la torre de enfriamiento. ....	99
Tabla 28.	Pérdidas y ganancias .....	101
Tabla 29.	Precios inversiones y Costos.....	102
Tabla 30.	Indicadores financieros de Rentabilidad .....	103

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Principio de operación del psicómetro .....	13
Figura 2.	Principio de una torre de enfriamiento por evaporación. ....	15
Figura 3.	Torre de enfriamiento de tiro natural.....	17
Figura 4.	Componentes principales de las torres de enfriamiento .....	22
Figura 5.	Principio básico de eliminadores de arrastre horizontales.....	25
Figura 6.	Principio básico de eliminadores de arrastre verticales. ....	26
Figura 7.	Curva de rendimiento .....	27
Figura 8.	Comportamiento de la aproximación en función de la superficie húmeda requerida .....	29
Figura 9.	Variables de operación en un sistema de torres de enfriamiento .	33
Figura 10.	Intercambio de masa y calor entre el agua y aire. ....	34
Figura 11.	Relación de agua, aire y potencial impulsor en una torre de contra flujo .....	36



Figura 12.	Curva de demanda de la torre de enfriamiento .....	45
Figura 13.	Curva característica de la torre.....	47
Figura 14.	Operación del empaque Splash bar. ....	51
Figura 15.	Arreglos del empaque V-bar.....	51
Figura 16.	Torre de enfriamiento de tiro inducido y flujo cruzado .....	55
Figura 17.	Empaque tipo salpiqueo V-Bar.....	58
Figura 18.	Empaque tipo salpiqueo Opti-Bar.....	58
Figura 19.	Empaque tipo salpiqueo Turbo Splash.....	59
Figura 20.	Metodología establecida para el desarrollo de la evaluación de una torre de enfriamiento. ....	62
Figura 21.	Esquema del actual balance de agua de la torre de enfriamiento DE-500. ....	68
Figura 22.	Sistema de distribución torre DE-500.....	70
Figura 23.	Diagrama de flujo para la propuesta de rehabilitación de la torre DE-500 .....	82
Figura 24.	Balance de materia en condiciones actuales y de la propuesta. ..	84
Figura 25.	Análisis Financiero.....	100
Figura 26.	Eficiencia del empaque a las condiciones deseadas.....	106
Figura 27.	Elección del empaque con mayores beneficios.....	106
Figura 28.	Contribución al valor presente neto. ....	107



## RESUMEN

Petróleos Mexicanos enfrenta diferentes retos para obtener el mayor valor posible de los hidrocarburos y sus derivados, y de esa manera contribuir al desarrollo sustentable del país. La industria petrolera emplea agua de manera intensa para sus procesos productivos generando a su vez importantes volúmenes de agua residual, razón por la cual Petróleos Mexicanos ha tomado la decisión de optimizar el uso de dicho recurso de manera integral en sus centros industriales y reducir consecuentemente los impactos a los cuerpos receptores.

Las torres de enfriamiento requieren grandes consumos de químicos, energéticos y agua, representan un gran porcentaje del manejo total de agua para cada centro de trabajo de Petróleos Mexicanos y el óptimo funcionamiento de estos impacta en la generación o disminución de agua residual.

Con objeto de atender las problemática descrita, se requiere el análisis de la operación de las torres de enfriamiento para determinar alternativas que optimicen el funcionamiento de estos equipos, en función de sus componentes principales (relleno, eliminadores de arrastre, ventiladores, persianas, válvulas y boquillas).

Se propone hacer evaluaciones del estado actual de una torre de enfriamiento tomando en cuenta que cambios existen con respecto a las condiciones de diseño para generar un diagnóstico y así poder comparar tecnologías nuevas para incrementar la capacidad de enfriamiento y el aumento de los ciclos de concentración. Dicho caso de estudio será realizado en el simulador CTI Toolkit y será analizada en función de la característica principal de la torre, todo con el propósito del ahorro de agua y cubrir la demanda específica de la planta de proceso.



# INTRODUCCIÓN



## 1 INTRODUCCIÓN

Una torre de enfriamiento es un equipo basado en la transferencia de calor, su principal función es enfriar agua en gran volumen debido al contacto directo con el aire atmosférico mediante evaporación o conducción.

Estos equipos regulan el proceso de enfriamiento mediante la evaporación controlada, reduciendo así la cantidad de agua consumida, este proceso se logra cuando la gota de agua que se pone en contacto con el aire no saturado se evapora la película exterior, esto sucede debido a que existe un gradiente de temperatura entre la gota y el aire requiriendo para este proceso absorción de calor, el cual se toma de la propia gota, enfriándola consecuentemente, el enfriamiento se realiza tanto por calor sensible (cambio de temperatura) como por calor latente (cambio de estado físico).

Existen diferentes tipos de torres de enfriamiento y cada una tiene diferente clasificación, esto depende de la forma en cómo se mueve el aire dentro de estos equipos. Aplicando estos conceptos existen torres de circulación natural y las de tiro mecánico. El parámetro más importante para dar un análisis de las condiciones en las que se encuentra una torre es la capacidad de enfriamiento y esta depende de todos los componentes que la integran, debido a esta circunstancia es necesario saber en qué condiciones se encuentran los componentes de la torre, para poder efectuar este procesos es necesario realizar las inspecciones físicas de las torres de enfriamiento.

La inspección física a las torres de enfriamiento es de gran utilidad para conocer las condiciones actuales de la misma; es decir, cómo se encuentra estructuralmente. Esta inspección, si se realiza adecuadamente, puede ser de gran ayuda para indicar los puntos en los cuales hay que hacer algunas reparaciones permitiendo así que la torre funcione mejor, e incluso previniendo accidentes de trabajo.

También es de utilidad para saber qué tan resistentes pueden ser algunos materiales de construcción en comparación con otros y así, en algún momento dado, realizar sugerencias de materiales para la construcción de nuevas torres de enfriamiento.



Es importante hacer énfasis en que las torres de enfriamiento cuentan con características específicas, desde la estructura, hasta la capacidad y materiales del cual están fabricadas; sin embargo, es de gran utilidad identificar las partes generales para poder realizar la inspección rápida y efectivamente.

## **1.1 Problemática**

El proceso de enfriamiento del agua que se produce en las torres de enfriamiento depende principalmente del área de contacto entre el agua y el aire que circulan en el interior de la torre, uno de los problemas más comunes se presenta cuando sus componentes internos se encuentran en mal estado principalmente relleno o empaque debido a que reduce la eficiencia y el área de contacto, además el mal diseño del empaque por las dimensiones y la cantidad instalada puede causar una excesiva carga lo cual dificultará el pasaje del agua y por consiguiente un aumento en la caída de presión. Este aumento en la caída de presión genera que el caudal de aire sea pobre o nulo, por lo tanto puede no lograrse el enfriamiento adecuado de la corriente de agua y provocar pérdidas por el aumento de la potencia consumida por los ventiladores.

Debido a lo citado anteriormente estos equipos requieren mantenimiento de sus componentes internos cuya inspección se torna compleja en condiciones de operación. El problema se presenta cuando la torre de enfriamiento opera durante todo el año y son cruciales para la producción, ya que si se detienen generan diversos conflictos y dificultades en la línea productiva de una planta.

Por lo cual es indispensable tomar en cuenta el diseño o el funcionamiento de las torres, una celda disponible para llevar a cabo el mantenimiento correctivo o en su caso la rehabilitación de sus partes internas y externas, cumpliendo los requerimientos de la planta de proceso.

Con base en lo anterior, para el presente trabajo se plantea el siguiente objetivo general:



## 1.2 Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo de **tesis** consiste en la evaluación y comparación de tres empaques utilizados en las torres de enfriamiento con el propósito de reducir la temperatura y por consiguiente el flujo de agua de enfriamiento en una torre, cumpliendo los requerimientos de la planta de proceso, buscando la alternativa de dejar una celda disponible.

## 1.3 Objetivos particulares

1. Elaborar el cálculo de la temperatura requerida para disminuir un flujo de agua de enfriamiento de la capacidad de una celda de la torre de enfriamiento cubriendo los requerimientos de la planta de proceso.
2. Plantear y evaluar tres empaques que alcancen la temperatura deseada del agua de enfriamiento y que mejoren la capacidad de enfriamiento de la torre, mediante el uso de las curvas de datos de rendimiento en los empaques y el simulador CTI Toolkit.
3. Presentar una propuesta de ahorro de agua con un flujo total de la capacidad de una celda mediante el cambio de empaque y la contribución de las mejores tecnologías de los componentes internos



# FUNDAMENTOS

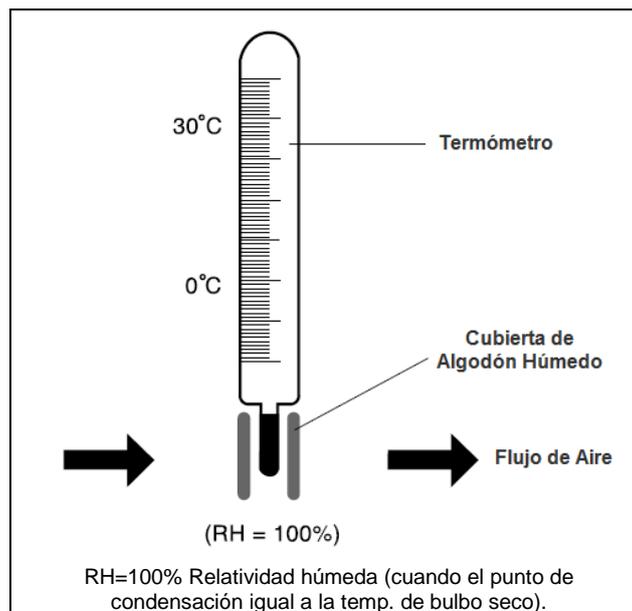


## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 Operación de la torres de enfriamiento

#### 2.1.1 Temperatura de bulbo húmedo

La temperatura de bulbo húmedo es un parámetro esencial para la selección de una torre de enfriamiento. Esta temperatura puede ser fácilmente medible con la ayuda de un psicómetro. Por lo general se trata de un termómetro lleno de mercurio y es puesto sobre una cubierta de algodón. Esta cubierta es mojada en agua destilada, cuando pasa la corriente de aire no saturado, el agua se evapora de la cubierta (Figura 1).



**Figura 1.** Principio de operación del psicómetro

Para esta evaporación (latente) el calor es extraído de la cubierta, provocando que se enfríe. Ahora la temperatura de la cubierta de algodón es menor al aire que circula. Posteriormente el calor (sensible) fluye del aire a la cubierta, influenciado por el aire que circula, la cubierta va tomando una temperatura tal que el flujo de calor del aire de la cubierta es exactamente el mismo que el calor requerido para la evaporación del agua de la cubierta húmeda. Este balance de temperatura del aire es llamado temperatura de bulbo húmedo



( $T_{nb}$ ). Dicho de otra manera para la temperatura de bulbo húmedo el aire insaturado que pasa en la cubierta de algodón húmedo emite suficiente calor sensible para soportar el flujo de calor latente (evaporación) del agua. La temperatura de bulbo húmedo es también llamada la temperatura de saturación adiabática. (GEA Polacel, 2009)

### 2.1.2 Principio de operación de la torres de enfriamiento

En una torre de enfriamiento circula **agua de enfriamiento** que es puesta en contacto por tiempo prolongado con el aire del medio ambiente y de este modo es enfriada. Un proceso de agua de enfriamiento caliente se lleva a cabo cuando se propaga finamente y se pone en contacto sobre un cuerpo que preferiblemente tenga una gran superficie para el intercambio de calor. El aire es conducido por igual en esta película de agua.

Una pequeña cantidad del agua es enfriada por evaporación (1-2%) de agua que circula. Por kg evaporado de agua de enfriamiento se extrae 2491 KJ de la circulación del agua de enfriamiento. El flujo de aire insaturado absorbe el agua evaporada y el calor que la integra. La corriente de aire se calienta más en contacto con un cuerpo (Relleno de la torre) hasta un equilibrio de intercambio de calor entre el flujo de aire y el agua que circula.

La disminución de la temperatura del agua y el incremento de calor del aire contenido en la torre de enfriamiento es un proceso gradual. La operación de una torre se basa en el principio combinado de transferencia de calor y masa. Esto es una transferencia de calor sensible entre el agua y el aire que pasa por convección y la transferencia de calor latente por evaporación del agua. La transferencia de calor y masa en una torre de contraflujo se muestra claramente en el diagrama de Mollier para el aire húmedo (Figura 2).

La Figura 2 muestra que el aire con la condición A y una correspondiente temperatura de bulbo húmedo  $T_{nb1}$  pasa a la superficie seca con la temperatura  $T_{w2}$ . La condición del aire saturado en el borde entre el agua y el

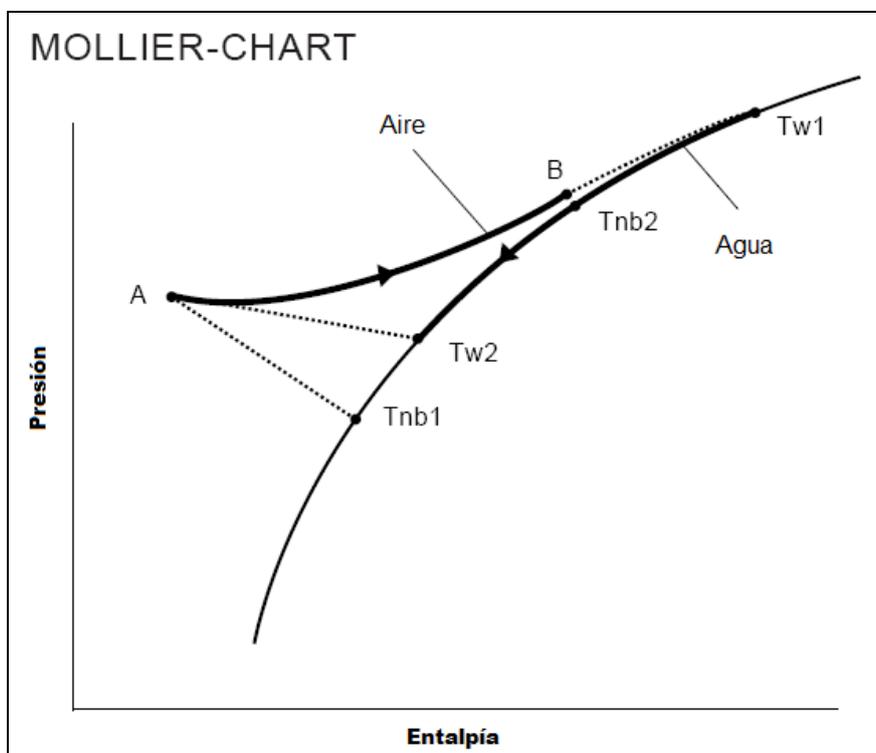


aire (justo arriba de la superficie mojada) igual al punto  $T_{w2}$ , sobre la línea de saturación en el diagrama de Mollier.

Cuando el aire frío entra en contacto con el agua caliente en contraflujo ocurre que el aire absorbe más calor.

Por esta razón la condición del aire se mueve a la derecha y sigue la curva A-B. En el punto B, con una correspondiente temperatura de bulbo húmedo  $T_{nb2}$ , es una curva directa al punto  $T_{w1}$ . El flujo de aire absorbe más y más agua, y eventualmente estará más saturado. La fuerza detrás del incremento total de la entalpía del aire es la diferencia de entalpías entre el aire en el borde de la línea aire-agua y el aire que pasa.

A continuación, el agua de enfriamiento se enfría de temperatura  $T_{w1}$  a  $T_{w2}$ . El trazado en el aire con la condición  $T_{nb1}$  se calienta y humidifica a una condición  $T_{nb2}$ , donde el aire es casi saturado. Una regla de dedo es que la temperatura de bulbo húmedo del aire que sale de la torre es casi igual al promedio de las temperaturas de entrada y de salida del agua de enfriamiento; esto depende de la eficiencia de la torre (GEA *Polacek*, 2009).



**Figura 2.** Principio de una torre de enfriamiento por evaporación.



### 2.1.3 Descripción de las torres de enfriamiento

El objetivo de las torres de enfriamiento es ahorrar agua, y es un equipo capaz de enfriar eficientemente grandes volúmenes de agua, poniéndola en contacto con aire atmosférico. Un pequeño porcentaje del agua respecto al agua de repuesto es evaporado, expulsando consigo el calor a la atmósfera, como aire caliente y húmedo.

Las torres de enfriamiento regulan el proceso de enfriamiento mediante la evaporación controlada, reduciendo así la cantidad de agua consumida, este proceso se logra cuando la gota de agua que se pone en contacto con el aire, se evapora la película exterior, requiriendo para este proceso absorción de calor, el cual se toma de la propia gota, enfriándola consecuentemente, el enfriamiento se realiza tanto por calor sensible (cambio de temperatura 10%) como por calor latente (cambio de estado físico 90%).

Las torres se clasifican de acuerdo con los medios por los que se les suministra aire. Todas emplean hileras horizontales de empaque para suministrar gran superficie de contacto entre el aire y el agua. Pueden ser de muchos tipos, aunque es importante mencionar que lo más conveniente en este tipo de sistemas es de costo inicial bajo y de costo de operación también reducido siempre y cuando cumpla con las condiciones especificadas (*Kern, Pag. 661*).

## 2.2 Tipos de torres de enfriamiento.

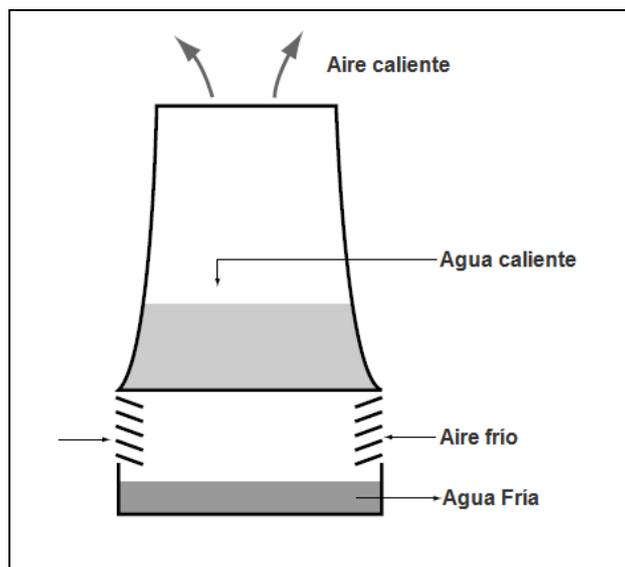
Existen varios tipos de torres: las primeras fueron las "atmosféricas", voluminosas y de bajo rendimiento, desprovistas de ventilador o motor. Las de tiro mecánico, que obedecen un proceso de convección provistas de ventiladores y motores, son las más comunes, y pueden ser de TIRO FORZADO (con ventiladores inyectando aire en la parte baja), o de TIRO INDUCIDO (con los ventiladores expulsando aire en la parte superior). Las



hiperbólicas, de tamaño gigantesco, y su uso común en plantas de energía nuclear (*Airetecnica, 2007*).

### 2.2.1 Torres de enfriamiento de tiro natural

Son las torres de enfriamiento más conocidas, su principal característica es su forma parabólica, por lo general son fabricadas de concreto reforzados, con un diámetro no menos de 40 metros y una altura de 100 metros, la aplicación más común es el enfriamiento de grandes cantidades de agua. Debido a que el agua caliente es equitativamente distribuida al interior de la torre donde se produce un flujo de aire de tiro natural en contraflujo con dicha corriente (Figura 3). Este efecto es también llamado “El efecto chimenea” a causa del hecho que el aire caliente se dirige a la parte superior, debido a este flujo de aire, se produce el enfriamiento de agua que circula (*GEA Polacel, 2009*).



**Figura 3.** Torre de enfriamiento de tiro natural

### 2.2.2 Torres de enfriamiento de tiro mecánico

Se clasifican por su arreglo del ventilador situado en la parte superior o inferior de la torre, al arreglo superior se les conoce como tiro inducido y el arreglo inferior como tiro forzado. La característica de estos tipos de torres de



enfriamiento es que uno o más ventiladores provocan un flujo de aire al interior de la torre, lo que causa una mayor velocidad de aire y un mejor enfriamiento que la torres de tiro natural por  $m^2$  de superficie. La desventaja de la energía requerida por los ventiladores es compensada por los bajos costos debido a una construcción más compacta.

Los ejemplos más conocidos de esta categoría son las torres de contraflujo y las de flujo cruzado. En las de contraflujo el agua cae al interior de manera vertical y el aire es suministrado en dirección opuesta, en las de flujo cruzado el agua cae de manera vertical y atravesando por el flujo de aire en dirección horizontal. (*GEA Polacel, 2009*)

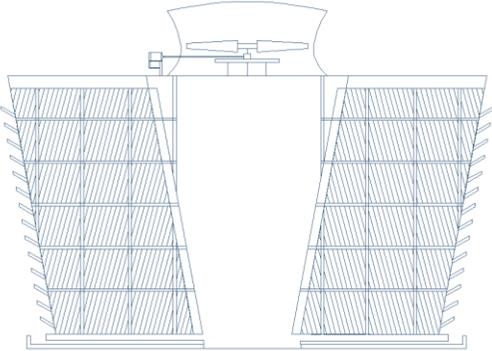
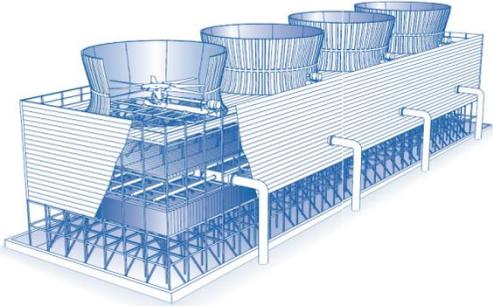
En la Tabla 1 se muestra información general de las torres de enfriamiento la cual contiene sus principales características así como las ventajas y desventajas.



Tabla 1. Información general de las torres de enfriamiento.

Clasificación	Tipo de operación	Tipo de flujo de aire	Características	Ventajas	Desventajas	Diagrama
Torres de circulación natural	Torres tiro natural	Contraflujo	Este tipo de torres también deben tener alturas elevadas aunque no necesariamente requiere de vientos predominantes pero si suficientes para asegurar un intercambio de calor eficiente.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sus pérdidas por arrastre son pequeñas. No tiene equipo mecánico</li> <li>El cascarón es de concreto, su base es de madera o plástico y su empaque es de madera tratada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sólo tiene máxima eficiencia en invierno o cuando se instalan en lugares fríos o húmedos.</li> <li>Su inversión inicial es muy alta porque no es flexible en su operación puesto que opera a base de una diferencia de densidades.</li> </ul>	
Torres de tiro mecánico	Torres tiro forzado	Contraflujo	<ul style="list-style-type: none"> <li>El ventilador se localizan en la entrada de la corriente de aire de la torre.</li> <li>Existen velocidades altas de aire en la entrada y bajas en la salida de la torre.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>El ventilador está antes del relleno metiendo aire a la torre por lo que no se requiere protección contra calor o humedad.</li> <li>Presentan menos pérdidas por arrastre de vientos, que las de tiro inducido.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tienen consumo de energía eléctrica en ventiladores y por bombeo de agua</li> <li>Tienen recirculación de vapores y aire caliente y su eficiencia varía irregularmente.</li> <li>Requieren de una altura mayor que las de tiro inducido.</li> </ul>	



Clasificación	Tipo de operación	Tipo de flujo de aire	Características	Ventajas	Desventajas	Diagrama
Torres de tiro mecánico	Torres tiro inducido	Flujo Cruzado	<ul style="list-style-type: none"><li>• El ventilador se localizan en la parte superior de la torre desde donde succiona el aire en su interior.</li><li>• Tienen una velocidad de descarga de aire 3 o 4 veces más grande que la velocidad de entrada a la torre.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• El ventilador que está después del empaque extrae el aire caliente de la torre sin recirculación.</li><li>• Tiene una altura menor que la de contraflujo y ofrece menor costo por consumo de energía en ventiladores y bombas.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Tiene más pérdidas por arrastre.</li><li>• Requiere de más área de exposición</li><li>• Ocupan mayor área que una torre de flujo a contracorriente aunque sus eficiencias son casi iguales para cualquier capacidad.</li></ul>	
		Contraflujo	Las características de las torres a contraflujo son similares, con la diferencia del aire lo induce desde el fondo de la torre y se encuentra cerrado.	<ul style="list-style-type: none"><li>• El ventilador se encuentra después del empaque extrayendo el aire caliente hacia arriba con mínima recirculación.</li><li>• La transferencia de calor es más eficiente que las otras además el área efectiva menor que las de tiro inducido de flujo cruzado.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Su altura es mayor que la de una inducida de tiro cruzado.</li><li>• Mayores pérdidas por arrastre que las forzadas Tienen mayor caída de presión lo que aumenta el costo en comparación con las forzadas.</li></ul>	



### 2.3 Componentes generales de las torres de enfriamiento.

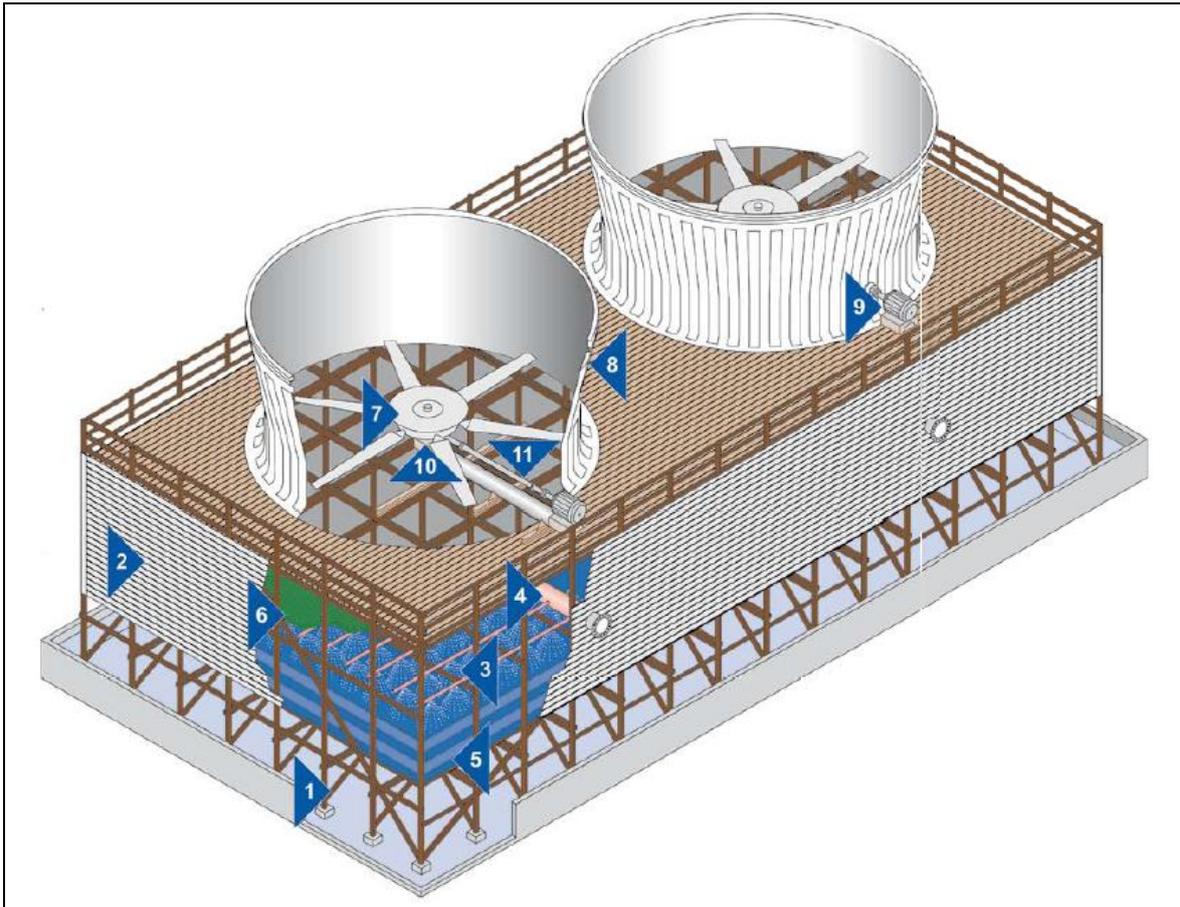
Una torre de enfriamiento se compone o divide en cuatro grupos principales (ver Tabla 2) componentes estructurales, componentes internos, componentes mecánicos y componentes eléctricos.

Tabla 2. Principales componentes de las torres de enfriamiento.

COMPONENTES	
ESTRUCTURAL	Bacín de agua fría
	Estructura general
	Cubierta del ventilador
	Chimeneas
	Persianas
	Canal de llamado
INTERNOS	Sistema de distribución de agua
	Relleno/Soporte(mallas)
	Eliminadores de rocío
MECÁNICO	Ventilador
	Reductor de velocidad
	Válvulas
	Flecha de transmisión
ELÉCTRICO	Motores

El conocer los componentes de una torre de enfriamiento permite realizar un diagnóstico y evaluación de las mismas, ya que algún problema en alguno de sus componentes afectará a ésta en su correcta operación.

Una mejor visualización de estas partes se muestra en la Figura 4.



**Figura 4.** Componentes principales de las torres de enfriamiento

### 2.3.1 Componentes Estructurales

#### Estructura de la torre de enfriamiento (1)

Dependiendo de la aplicación, la estructura es fabricada de concreto, madera tratada químicamente, acero galvanizado, acero inoxidable o resina poliéster reforzado con fibra de vidrio (FRP).

Las escaleras y barandales de una torre permiten el acceso a la parte superior e interior de la torre, son generalmente fabricadas de concreto y los barandales de acero galvanizado, la importancia de tener en buenas condiciones este sistema es principalmente por la seguridad del personal.

#### Persianas (2)

Presentes en las torres de enfriamiento de flujo cruzado, las persianas tienen dos funciones:



- i) Dejar pasar el aire sin objetos que puedan afectar la operación de la torre
- ii) No permitir la salida de agua por salpicaduras. Para cumplir con los requerimientos, son colocadas en ángulos inclinados y se fabrican de concreto, asbesto, madera tratada químicamente o fibra de vidrio.

#### Chimenea (8)

Diseñado para optimizar el rendimiento a través de la recuperación de presión, los cilindros son fabricados de resina poliéster reforzado con fibra de vidrio (FRP) y concreto reforzado.

#### Bacín de agua fría

Es un tanque o cisterna donde cae el agua directamente una vez que paso por el empaque de la torre, se construye generalmente de concreto reforzado con varilla de acero, su función es suministrar el agua al cárcamo de bombeo, debido a esto es necesario construir este sistema a desnivel para asegurar su llegada.

### 2.3.2 Componentes Internos

#### Boquillas (3)

Las boquillas diseñadas para la distribución homogénea dentro de la torre de enfriamiento, restringe los desechos para mantener libre el área de aspersión y evitar que se tapen, además algunas cuentan con una placa de difusión para proporcionar una distribución de agua en todas las direcciones.

#### Sistema de distribución de agua (4)

Su función es distribuir homogéneamente el agua caliente de alimentación a la torre, y se puede clasificarse por el tipo de torre.



Para las torres de contraflujo el agua caliente es suministrado a un tubo de distribución principal fabricado básicamente de polipropileno (PP), acero, resina poliéster reforzado con fibra de vidrio (FRP) o polietileno de alta densidad (HDPE) que se encarga de distribuir homogéneamente al interior de la torre.

Para flujo cruzado el mecanismo por presión es cuando se tiene boquillas que contiene espreas las cuales se encargan de distribuir el agua en forma circular a los empaques.

Con respecto a las válvulas el diseño estructural y de sus partes internas deben proporcionar una velocidad de descarga baja y un límite en las salpicaduras dando como resultado caídas de presión bajas, su función es suministrar adecuadamente el agua a la torre y plantas de proceso.

#### Relleno o empaque (5)

La función del empaque es aumentar la superficie disponible en la torre, ya sea distribuyendo el líquido sobre una gran superficie o retardando la caída de las gotas al bacín de agua fría.

Existen los de rellenos tipo película y tipo salpiqueo, y su uso depende de la calidad de agua presente en el sitio.

En la torre de enfriamiento, debido a los requerimientos de grandes volúmenes de aire y pequeñas caídas de presión permitidas, es costumbre usar filas de empaque construidos de madera, polipropileno (PP), polietileno (PE), policloruro de vinilo (PVC), que dejan la torre sustancialmente sin obstruir. Es muy importante mantener este sistema en buen estado debido a que este componente está involucrado directamente con la capacidad de enfriamiento de una torre.

#### Eliminadores de arrastre (6)

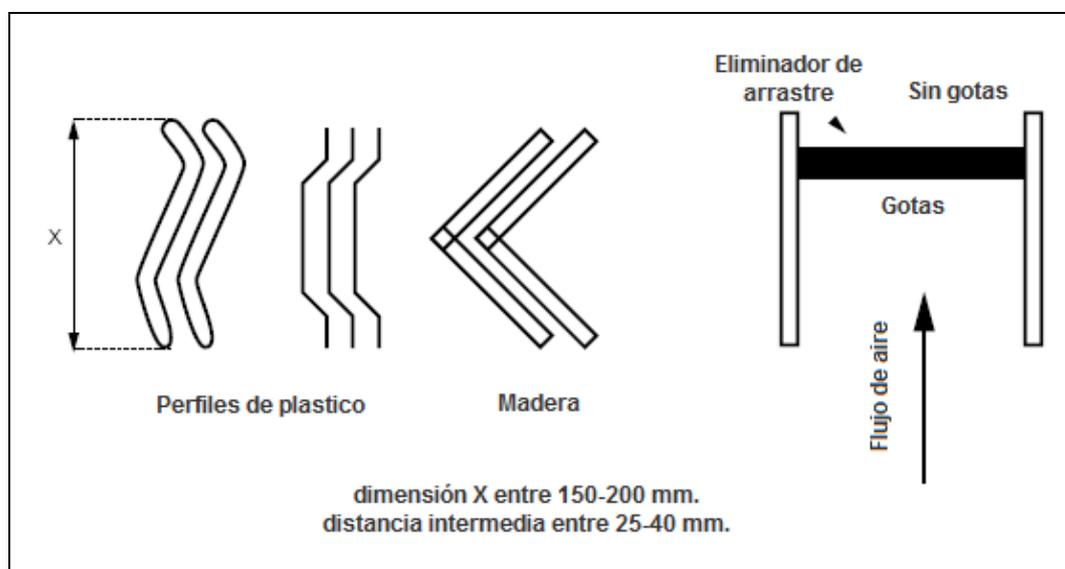
El funcionamiento de un eliminador de arrastre está basado en la inercia de una gota de agua. Cada eliminador incorpora una curva construida especialmente, que causa que el aire cambie de dirección. Debido a este



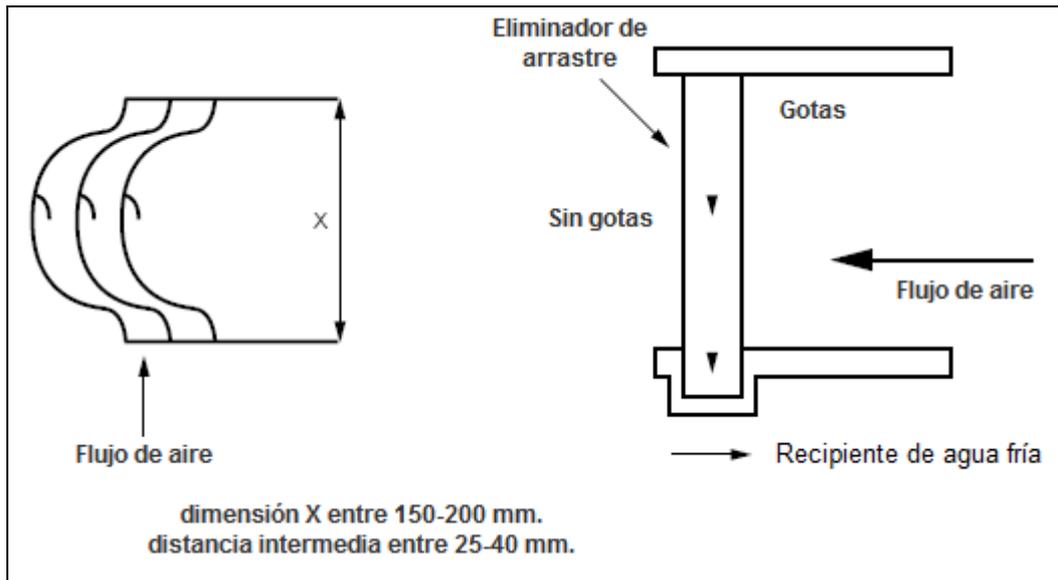
cambio de la dirección la gota sale de la curva y es capturada por el eliminador. De este principio se desprende que en los eliminadores hay una velocidad mínima para que las gotas sigan volando fuera de la curva. También un eliminador de arrastre es el mejor para atrapar gotas cuando la velocidad es alta (flujo de 2 a 4 m/s). Existen también velocidades máximas, esto tiene que ver con las turbulencias y también mucha resistencia (GEA Polacei, 2009).

Se emplean para reducir la gotas de agua por arrastre y son fabricados por paquetes de hojas corrugadas de polipropileno (PP) y Policloruro de vinilo (PVC) que los vuelven más aerodinámicos que otros materiales.

Existen dos formas, los eliminadores horizontales y verticales, básicamente difieren por la velocidad del aire y el tipo de torre, para velocidades pequeñas y torres de contraflujo se usan los horizontales (Figura 5), para velocidades altas y torres de flujo cruzado se utilizan los verticales, su arreglo y principio básico se muestra en la Figura 6.



**Figura 5.** Principio básico de eliminadores de arrastre horizontales



**Figura 6.** Principio básico de eliminadores de arrastre verticales.

### 2.3.3 Componentes Mecánicos y Eléctricos.

#### Ventiladores (7)

Operan según su configuración, induciendo la salida del aire caliente de la torre o forzando la entrada de aire frío a ésta. Por lo regular son fabricados de acero forjado con aspas de poliéster reforzado con fibra de vidrio, en algunos casos son de hierro galvanizado con aspas de aluminio. Es importante el diseño y operación con un alto rendimiento con respecto al flujo de aire que se suministra a la torre y el uso de menor energía.

#### Motor eléctrico (9)

La selección de este componente es importante para dar un alto rendimiento a los ventiladores, dependiendo de la aplicación pueden ser de una o dos velocidades, tres polos y frecuencia de 60 Hz, existen también con carcasa tipo jaula de ardilla de baja y media tensión.



### Reductor de velocidad (10)

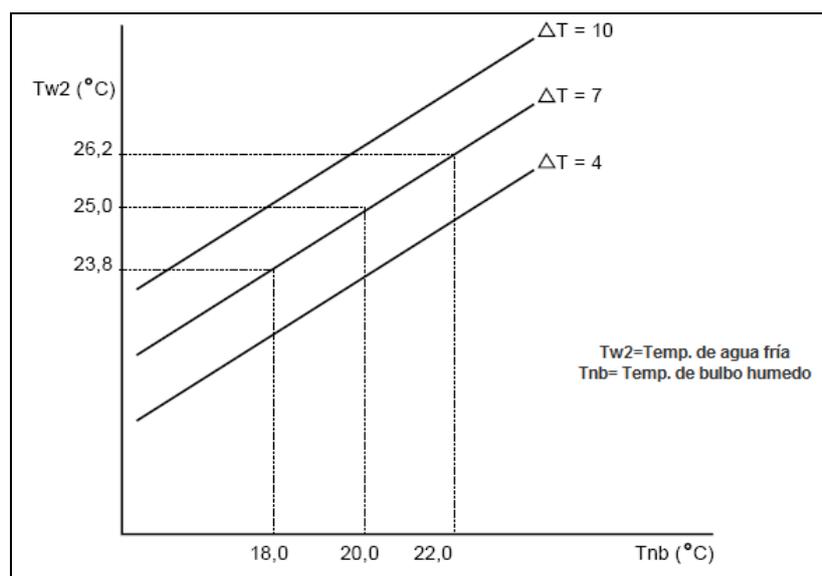
Su principal objetivo es el de reducir la velocidad con la que el motor impulsa al ventilador, debido a que la flecha del motor es grande debe de considerarse el buen diseño de este sistema. La lubricación de este sistema es fundamental para su funcionamiento.

### Flecha de transmisión (11)

Comúnmente fabricados con material de fibra de carbono de alta calidad y resistencia, con acoplamientos en fibra de carbono y acero con guardas como protecciones.

## 2.4 Funcionamiento dinámico de las torres de enfriamiento.

Normalmente una torre de enfriamiento se selecciona sobre una condición de diseño. Con esto, actualmente se determina un punto de operación de la torre de enfriamiento, normalmente el más importante; con su correspondiente temperatura de bulbo húmedo. Con el fin de dar una idea más allá de este punto de operación es necesaria una curva de rendimiento (Figura 7).



**Figura 7.** Curva de rendimiento



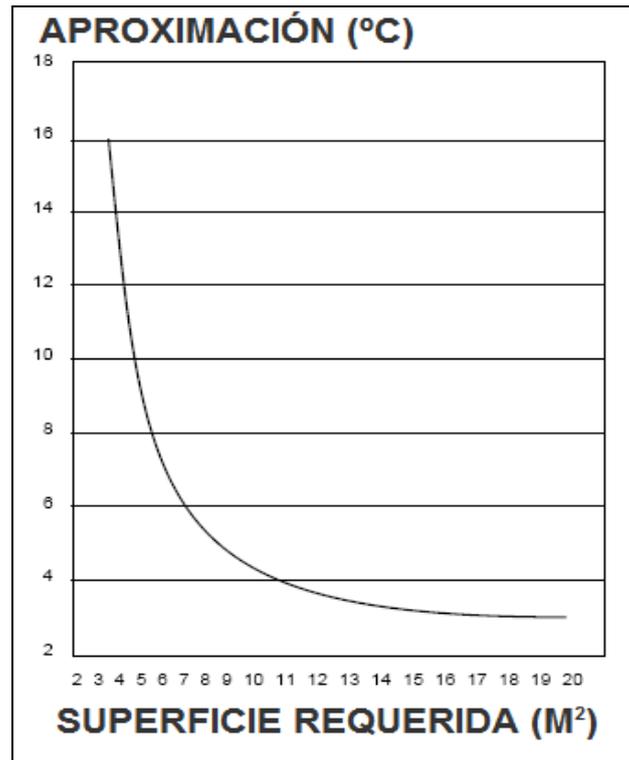
Esta curva da una buena indicación de que la torre de enfriamiento funciona a diferentes circunstancias climatológicas, con fluctuantes temperaturas de agua de enfriamiento y una variación en el flujo de agua. El flujo de aire en toda la torre se asume que es el mismo. Dicha curva de rendimiento muestra inmediatamente que las torres de enfriamiento son flexibles a diferentes condiciones de trabajo. A continuación se muestra un cuestionario para explicar el funcionamiento dinámico de las torres de enfriamiento.

1) ¿Qué factor determina el rango ( $\Delta T =$  el rango de enfriamiento  $T_{w1} - T_{w2}$ ) de la circulación de agua de enfriamiento en la torre?

En una torre este  $\Delta T$  es siempre determinado por los procesos de enfriamiento, la torre es ajustada a esto, en otras palabras la torre no determina el tamaño de la diferencia de temperaturas  $\Delta T$ , pero toma esto desde el proceso de enfriamiento. La torre sigue el proceso de enfriamiento y no a la inversa. Esto es un malentendido que ocurre con bastante regularidad en la práctica.

2) Cuál es la influencia de la aproximación ( $T_{w2} - T_{nb}$ ) sobre el tamaño de superficie de enfriamiento requerida?

Al término de superficie de enfriamiento normalmente se entiende como la superficie horizontal mojada (empaquete) de la torre. Es cada vez más difícil para una torre enfriar el agua con aproximaciones pequeñas, cuanto menor sea la diferencia entre la temperatura del agua de enfriamiento de salida y la temperatura de bulbo húmedo las dimensiones de la torre son más grandes, este comportamiento se observa claramente en la Figura 8



**Figura 8.** Comportamiento de la aproximación en función de la superficie húmeda requerida

Para esto la carga de agua, el rango, la velocidad del aire y la temperatura de bulbo húmedo se mantienen constantes, y también una elección invariable de torre y el relleno. Por esta razón, no es habitual en la industria de las torres de enfriamiento garantizar una aproximación menor de 5°F.

Una torre de enfriamiento es capaz de enfriar una carga térmica más grande de lo que es diseñada originalmente, esto se ilustra en la Figura 7, en este ejemplo se escoge una temperatura de bulbo húmedo constante de 20°C, con un  $\Delta T$  de 7°C, la temperatura del agua de salida  $T_{w2}$  es de 25°C. Cuando la carga térmica del proceso de enfriamiento incrementa a un  $\Delta T$  de 10°C, la temperatura del agua de salida incrementa alrededor de 26.7°C, un incremento de la carga de enfriamiento de 43% da un resultado en un incremento de a  $T_{w2}$  de 1.7°C. En este ejemplo la aproximación incrementa de 5°C con 1.7°C a 6.7°C; esto es un incremento de 34%.



Por ejemplo, cuando una torre de enfriamiento está diseñada para enfriar una capacidad 300kW pero solo enfría 150kW generalmente se dice que “la torre enfría solo la mitad de su capacidad”. Lo cual este hecho no es responsabilidad de la torre, ya que la torre de enfriamiento puede enfriar los 300kW siempre y cuando este sea indicado por el proceso de enfriamiento o planta de proceso. La única manera correcta de medir el funcionamiento de la torre es por medio de la temperatura de agua fría ( $T_{w2}$ ) o el rango ( $T_{w2}-T_{nb}$ ).

## **2.5 Balance general de agua en una torre de enfriamiento**

El flujo de agua de enfriamiento que es suministrado a diferentes plantas de proceso, es un aproximado de la capacidad total de una torre de enfriamiento. Este concepto es llamado recirculación (R) y es un aproximado debido a que existen pérdidas de agua.

### **2.5.1 Consumo de agua**

Existen tres maneras en las cuales se consume el agua de una torre de enfriamiento evaporativa, las pérdidas por evaporación, por arrastre y pérdidas de agua por las purgas.

#### **Pérdidas por evaporación (E).**

El principio de operación de una torre de enfriamiento evaporativa está basado en la evaporación de una pequeña parte de la recirculación de la torre.

El intercambio de calor latente entre el aire y el agua en una torre evaporativa es de 95% máximo, el intercambio de calor sensible es por lo menos de 5%, el calor contenido de 1kg de agua es 2491kJ, por lo que por kg de agua de enfriamiento evaporada se extrae 2491kJ de energía de la recirculación.

El agua evaporada con el correspondiente calor es absorbido en la corriente de aire a través de la torre de enfriamiento, con lo anterior se puede deducir que por cada kW de energía que descarga una torre evapora un máximo de 1.37. La rapidez de evaporación es de 1.2% de la rapidez del flujo de recirculación



de agua que pasa a través de la torre por cada 10°F de disminución en la temperatura alcanzada por la torre.

Debido a lo anterior para el cálculo de las pérdidas por evaporación (E) utilizamos la Ecuación 1

$$E = \frac{R * \Delta T}{1000} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

E = perdidas por evaporación en [GPM]

R = flujo de recirculación de la torre en [GPM]

### **Pérdidas por arrastre (A).**

El Arrastre (A) es una pérdida de agua en forma de pequeñas gotas de agua en forma de niebla debido a la alta velocidad del aire, al contacto directo con el agua, un rango típico va de 0.05 %, 0.02 %, 0.005, 0.002% y también 0.0001% de pérdida con respecto al gasto que circula total” (Industrial Torres Marmex, 2006)

La reducción del arrastre a través de eliminadores de arrastre ayuda a conservar agua, retiene los tratamientos químicos en el sistema y mejora la eficiencia de operación.

Para el cálculo de las pérdidas por arrastre (A) utilizamos la Ecuación 2

$$A = 0.0002\% * R \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

A = perdidas por arrastre en [GPM]

R = flujo de recirculación de la torre en [GPM]

### **Pérdidas por purga (P).**

La purga es un término del agua que es removida de la recirculación de agua de enfriamiento para reducir los contaminantes acumulados en la torre, esto se debe a que la evaporación, y los contaminantes del agua, tales como los



sólidos disueltos son acumulados. Al remover las purgas y agregar agua de repuesto el nivel de los sólidos disueltos en el agua se pueden mantener para reducir las incrustaciones minerales acumuladas y otros contaminantes en la torre. La eficiencia térmica, la correcta operación, y la vida de la torre están relacionadas directamente a la calidad del agua que recircula.

La calidad del agua en la torre depende de la calidad del agua de repuesto, el tratamiento de agua y el flujo de las purgas. Además las purgas contribuyen a regular los ciclos de concentración en la torre.

Para el cálculo de las pérdidas por purga (P) utilizamos la Ecuación 3

$$P = \frac{E}{(c.c - 1)} - A \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

P = flujo de las purgas [GPM]

E = perdidas por evaporación en [GPM]

A = perdidas por arrastre en [GPM]

### **Ciclos de concentración. (C.C).**

Se denominan Ciclos de concentración a la relación entre la calidad de agua de recirculación y la calidad de agua de repuesto Se determina a partir de un elemento que no se descomponga, volatilice o precipite, por ejemplo el Cl-. Como se muestra en la Ecuación 4

$$C.C = \frac{x_R}{x_r} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

$x_R$  = Sólidos totales en la recirculación y  $x_r$  = Sólidos totales en el repuesto.

Agua de Repuesto (Ar): Agua suministrada a las torres de enfriamiento para cubrir las pérdidas por arrastre, purga y evaporación (wáter efficiency).

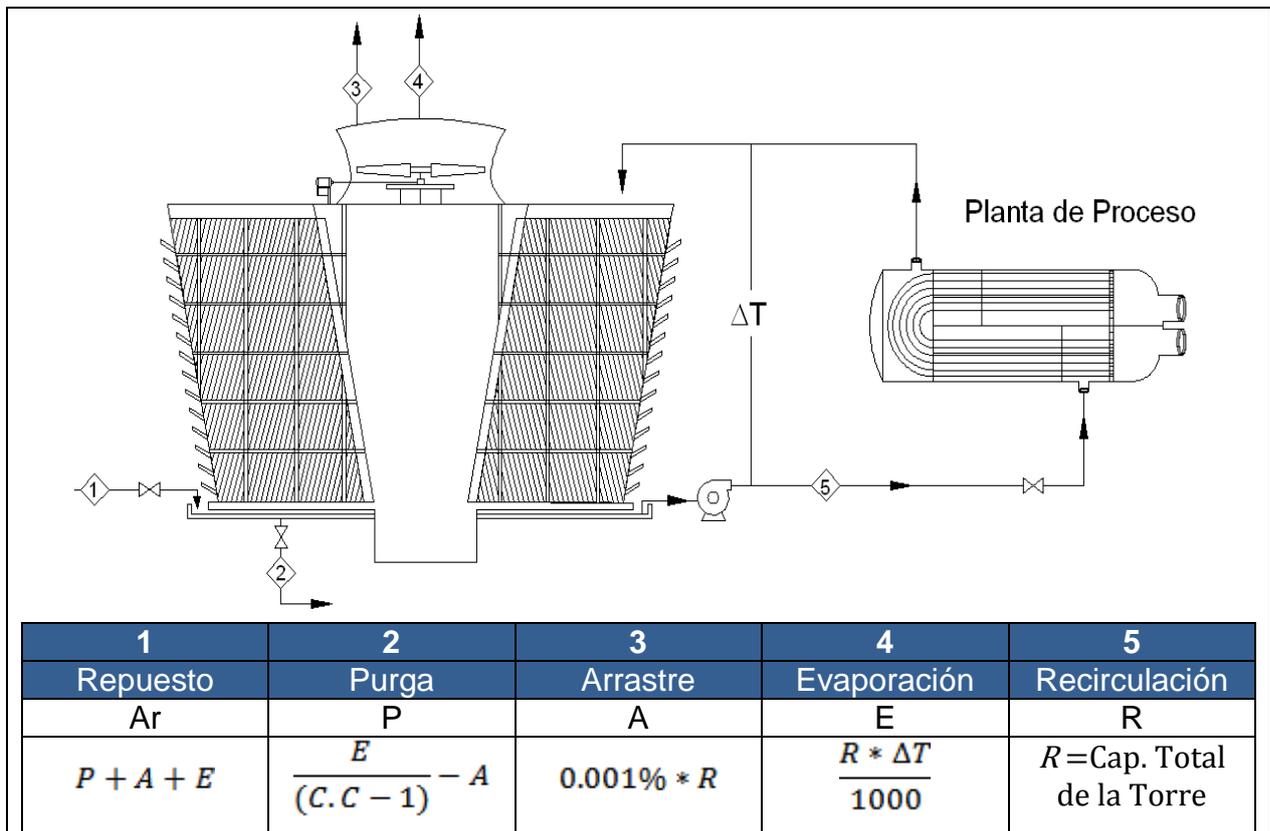


### 2.5.2 Relación de las variables de operación.

Debido a las pérdidas de agua por evaporación, arrastre y purga en una torre es necesario el suministro del agua de repuesto ( $Ar$ ), por lo tanto la suma de las pérdidas de agua en una torre es igual al agua de repuesto suministrada y se calculó de acuerdo a la Ecuación 5

$$Ar = E + A + P \quad \text{Ecuación 5}$$

En la Figura 9 se muestra un esquema resumido con las variables y ecuaciones del balance de agua en las torres de enfriamiento.



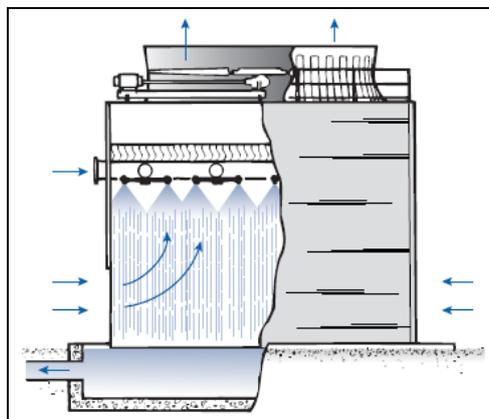
**Figura 9.** Variables de operación en un sistema de torres de enfriamiento



### 3 FUNDAMENTOS TÉRMICOS

#### 3.1 Transferencia de calor y masa

En una torre de enfriamiento se lleva a cabo el intercambio de calor entre dos fluidos (aire y agua) que se ponen contacto directo entre sí causando un efecto de transferencia de masa y calor. La Figura 10 muestra el contacto que existe entre el agua y el aire.



**Figura 10.** Intercambio de masa y calor entre el agua y aire.

Esto se realiza por una aspersion de una masa de agua que fluye en forma de lluvia, a través del cual un flujo de masas de aire frio se mueve de forma ascendente inducido por la acción de un ventilador. Haciendo caso omiso de cualquier cantidad insignificante de intercambio de calor sensible que puede ocurrir a través de las paredes (carcasa) de la torre, el calor ganado por el aire debería ser igual al calor perdido por el agua, dentro de la corriente de aire, el flujo de calor ganado es identificado por la expresión:

$$G(H_2 - H_1)$$

Donde:

G= Flujo másico de aire seco a través de la torre-lb/min.

H<sub>1</sub>=Entalpia (calor total contenido) de el aire entrante-BTU/lb de aire seco.

H<sub>2</sub>=Entalpia de salida de aire-BTU/lb de aire seco.



Dentro de la corriente de agua, el flujo de calor perdido es:

$$LC_w(T_2 - T_1)$$

Donde:

L= Flujo másico de agua que entra a la torre-lb/min.

T<sub>1</sub>=Temperatura de agua caliente de entrada a la torre-°F.

T<sub>2</sub>= Temperatura de agua fría de salida de la torre-°F

C<sub>w</sub>= calor específico del agua = 1BTU/lb °F

Esto se deriva del hecho de que un BTU (British thermal unit) es la cantidad de calor (ganado o perdido) necesario para cambiar la temperatura de 1 libra de agua por 1°F. Además el calor latente del agua es tan grande que una cantidad muy pequeña de evaporación produce grandes efectos de enfriamiento. Sin embargo, debido a la evaporación que tiene lugar dentro de la torre

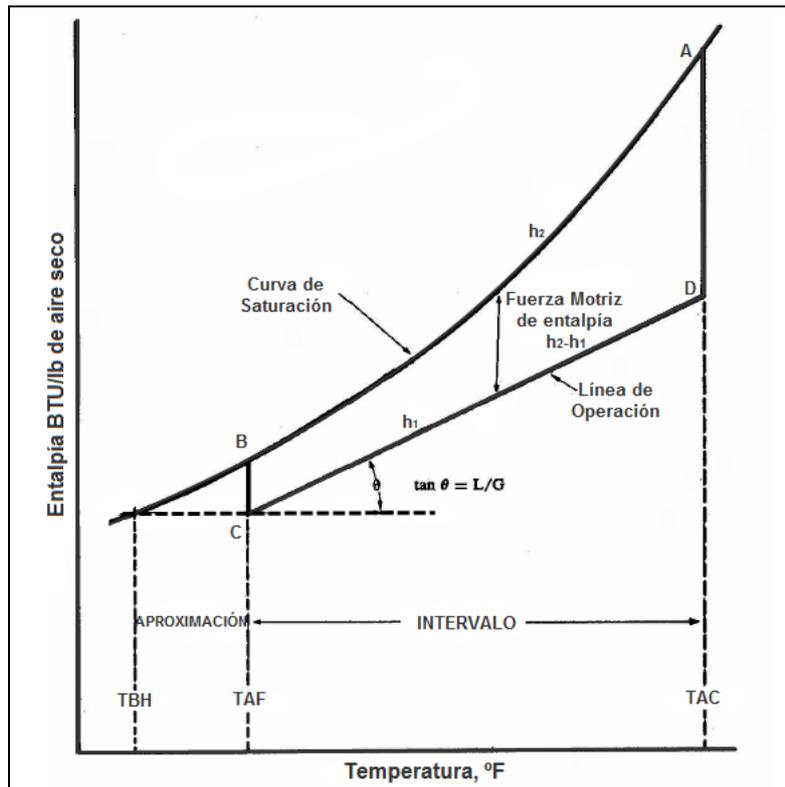
Por lo tanto la ecuación del balance para el enfriamiento del agua con el aire es representado por la Ecuación 6.

$$G(H_2 - H_1) = LC_w(T_2 - T_1)$$

**Ecuación 6**

Este balance de entalpía puede representarse graficando la entalpía del gas h' contra t', como se muestra en la Figura 11, donde se ilustran las relaciones del agua, el aire y el potencial impulsor que existe en una torre de contra flujo, donde el aire fluye en sentido paralelo, pero siguiendo una dirección opuesta al flujo del agua.

La línea de 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 principia 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 (Fiber, Tower, 2002).



**Figura 11.** Relación de agua, aire y potencial impulsor en una torre de contra flujo

### 3.1.1 Variables de funcionamiento de las torres de enfriamiento.

#### 3.1.1.1 Temperaturas usadas en torres de enfriamiento

Temperatura de agua caliente (TAC): Es la temperatura del agua de enfriamiento que retorna de la planta de proceso a la entrada de la torre.

Temperatura de agua de fría (TAF): Es la temperatura de agua de enfriamiento que suministra la torre a la planta de proceso.

Temperatura de bulbo Húmedo (TBH): Es la temperatura límite teóricamente a la que desciende el agua de enfriamiento.

Temperatura de bulbo seco (TBS): Corresponde a la temperatura del medio ambiente.



Rango o Intervalo (TAC – TAF): es un indicador del potencial que promueve la evaporación (Fuerza motriz) en una torre de enfriamiento y si esto se combina con un mayor flujo de agua de retorno.

Aproximación o Acercamiento (TAF-TBH): es la diferencia del agua fría y la de bulbo húmedo.

Especificar una aproximación muy pequeña, inferior a 9°F, implica usar una torre grande y costosa. El mínimo acercamiento usado comercialmente es de 5 °F, unos 3 °C. No debe usarse un valor inferior (Airetecnica, 1999).

### 3.1.1.2 Carga térmica disipada

Carga térmica disipada (QD): También conocida como el calor disipado en una torre de enfriamiento es determinado para comparar las condiciones de diseño y determinar la eficiencia térmica en la que opera la torre y depende de los requerimientos de la planta de proceso. El cálculo del calor disipado (QD) con la Ecuación 7

$$QD = R * (TAC - TAF) Cp * 8.35$$

Ecuación 7

Donde

R= Recirculación de la torre en (GPM)

TAC= Temperatura de agua caliente (°F)

TAF= Temperatura de agua fría (°F)

CP= Calor Específico de agua equivale a 1(kcal/kg°C)

8.35 = Factor de conversión

QD= Calor disipado (BTU/min)

### 3.1.1.3 Capacidad de enfriamiento

La capacidad de enfriamiento de una torre es una combinación de todas las variables involucradas en el diseño y selección de la misma, e indica la cantidad de agua que enfría en condiciones de operación comparada con las condiciones de diseño. (CONUUE, 2007).



### 3.1.2 Teoría de Merkel.

Las primeras investigaciones en las teorías de torres de enfriamiento se enfrentaron con los problemas que se presentan con la doble transferencia de masa y energía. La teoría de Merkel elimina estos problemas, haciendo la combinación de los dos en un solo proceso, basado en el potencial de entalpía. El Dr. Merkel desarrolló una teoría de la transferencia de masa (evaporación de una pequeña porción de agua) y de calor sensible entre el aire y el agua en una torre de enfriamiento de contraflujo. La teoría considera el flujo de masa y energía del bulto de masa a una interface y luego de la interface a la masa de aire que la rodea, cuando el flujo atraviesa estas dos fronteras, cada una ofrece una resistencia a la transferencia de materia y energía, que resulta en gradientes de temperatura, entalpía y de humedad relativa.

Merkel demostró que la transferencia total de calor es directamente proporcional a la diferencia entre la entalpía del aire saturado a la temperatura del agua y la entalpía del aire en el punto de contacto con el agua y es descrita en la Ecuación 8

$$Q = K S(h_w - h_a)$$

**Ecuación 8**

Donde:

Q: Calor total transferido BTU/h

K: Coeficiente total de transferencia lb/h ft<sup>2</sup>

S: Superficie de transferencia de calor ft<sup>2</sup>

S= a•V donde a es el área de superficie de transferencia por unidad del volumen de la torre (ft<sup>2</sup>/ft<sup>3</sup>) y V es el volumen efectivo de la torre (ft<sup>3</sup>).

h<sub>w</sub>: Entalpía de la mezcla aire-vapor de agua a la temperatura del agua en BTU/lb aire seco.

h<sub>a</sub>: Entalpía de la mezcla aire-vapor de agua a la temperatura de bulbo húmedo BTU/lb aire seco.



Como la entalpía del aire y temperatura del agua cambian a lo largo del relleno y la relación de Merkel sólo se puede aplicar a un pequeño elemento de superficie ( $dS$ ) de transferencia de calor.

$$dq = d[K S(h_w - h_a)]$$

$$dq = K(h_w - h_a)dS$$

La transferencia de calor del lado del agua es

$$q = C_w L(T_2 - T_1)$$

Donde:

$C_w$ = calor específico del agua = 1BTU/lb °F

$L$ = flujo de agua

$T_2 - T_1$ : Rango

Por lo tanto:

$$dq = d[C_w L(T_2 - T_1)]$$

$$dq = C_w L dT$$

Por el lado de la transferencia de calor del aire es:

$$q = G(H_2 - H_1)$$

Donde,

$G$ = es el flujo másico de aire, por lo tanto.

$H_1$ = es su entalpía de entrada BTU/lb de aire seco e incluye el calor de vapor asociado con la libra de aire seco.

$H_2$ = es su entalpía de salida BTU/lb de aire seco e incluye el calor de vapor asociado con la libra de aire seco.

Por lo tanto

$$dq = d[G(H_2 - H_1)]$$

$$dq = G \cdot dH$$

**Ecuación 9**

Por otra parte basado en los coeficientes totales el calor transferido por convección para la transferencia de calor sensible del agua a una temperatura  $T$  al aire a una temperatura  $t$  está dado por



$$dq_c = h(T - t)a \cdot dV$$

**Ecuación 10**

Donde  $a$  es la superficie del agua por pie cúbico de torre, tanto de gotas como de película, y  $dV$  es el volumen diferencial de la torre en el que existe la superficie. De esto  $(a \cdot dv) = dA$ , donde  $A$  es la superficie de transferencia de calor.

Para calor transferido por difusión, si  $\lambda$  es el calor latente promedio de vaporización de toda el agua que se vaporiza en la torre tenemos.

$$dq_d = \lambda dL$$

**Ecuación 11**

Ya que  $dL$  es la razón a la que el material se difunde, la forma diferencial de la ecuación para el peso del flujo es:

$$\frac{1}{18} dL = K_G(p' - p)a dV$$

**Ecuación 12**

Donde  $p'$  es la presión parcial que corresponde a una temperatura del agua  $T$  y  $p$  es la presión de vapor en el aire. Para todos los propósitos prácticos la humedad puede ser considerada proporcional a la presión parcial, al menos en los rangos encontrados en las aplicaciones de la torre de enfriamiento. La Ecuación 12 se transforma

$$dL = K_x(X' - X)a dV$$

**Ecuación 13**

Donde  $X'$  es la humedad a la temperatura  $T$  del agua y  $X$  es la humedad del aire. Sustituyendo en la Ecuación 11 tenemos

$$dq_d = K_x \lambda (X' - X)a dV$$

**Ecuación 14**

El  $dq$  combinado para transferencia de calor es entonces la suma de los dos modos de transferencia

$$dq = dq_c + dq_d = h(T - t)a dV + K_x \lambda (X' - X)a dV$$

**Ecuación 15**

Combinando la Ecuación 9 y la Ecuación 15 expresa el total de transferencia de calor en el sistema en unidades de calor solamente. Para evitar que aparezcan en la misma ecuación  $X$  y  $H$ , los valores de  $X$  pueden ser factorizados. Usando un valor promedio para el calor húmedo  $c$  y el calor latente  $\lambda$ , y despreciando el sobrecalentamiento, todo lo cual es permitido en los rangos relativamente cortos en los que las torres de enfriamiento operan



para una mezcla de aire-agua. Consistiendo en 1 lb de aire y X lb de vapor de agua

$$H = 1ct + \lambda X$$

Ecuación 16

$$GdH = G(c dt + \lambda dX)$$

Ecuación 17

Reagrupando Ecuación 15

$$dq = K_x a dV \left[ \left( \frac{hT}{K_x} + \lambda X' \right) - \left( \frac{ht}{K_x} + \lambda X \right) \right]$$

Sumando y restando  $c(T - t)$

$$dq = K_x a dV \left[ (cT + \lambda X') - (ct + \lambda X) + c(T - t) \left( \frac{h}{K_x c} - 1 \right) \right]$$

Ecuación 18

Sustituyendo la Ecuación 16 en la Ecuación 18 tenemos

$$dq = K_x a dV \left[ (H' + H) + c(T - t) \left( \frac{h}{K_x c} - 1 \right) \right]$$

Ecuación 19

$dq$  puede expresarse en términos de la disminución de la entalpía de la cantidad total de agua o el aumento de entalpía de la mezcla total de aire, ambas son iguales.

$$dq = d(LCT) = G dH$$

La carga de gas  $G$  permanece constante a través de la torre, debido a que está basada únicamente en el gas seco. La carga líquida no es muy constante, sin embargo, debido a la evaporación de agua en el aire seco. Las pérdidas de saturación del agua al aire ascienden a menos de 2% del agua circulada a la torre y pueden ser consideradas constantes sin introducir un error serio. Entonces:

$$d(LCT) = LC dT \quad \text{y} \quad LC dT = G dH$$

Para el agua que se difunde en el aire, el número de Lewis es aproximadamente  $h/K_x c = 1$  (Kern, 675) y el último término de la Ecuación 19

se desvanece así

$$LC dT = G dH = K_x (H' - H) a dV$$

Ecuación 20



Cabe mencionar que en realidad  $h/K_x c$  para el sistema aire-agua no es 1.0 como lo predice el número de Lewis. Los datos de varios investigadores indican que el valor del número de Lewis está cerca a 0.9. En la práctica la Ecuación 20 se evalúa siempre de los potenciales de difusión, lo que significa que únicamente los coeficientes de transferencia de calor por convección presentan error si se usan los valores teóricos del número de Lewis. En muchas aplicaciones de torres de enfriamiento, la transferencia de calor por convección sólo representa menos de 20% de la carga térmica total.

### 3.1.3 Análisis de los requerimientos de la torre de enfriamiento

La Ecuación 20 es la clave para el cálculo del diseño y el análisis del comportamiento de las torres de enfriamiento.  $K_x$  es el término de la tasa de transferencia total análogo a  $U_c$ , en los intercambiadores, y debe recordarse que no hay factor de obstrucción para transferencia de calor por contacto directo. Sin embargo, en los intercambiadores tubulares la superficie de transferencia de calor usualmente se conoce o puede fácilmente calcularse. En las torres de enfriamiento de agua el valor de “a” (área de transferencia) no puede determinarse directamente, ya que está compuesto de disposiciones al azar de gotas y superficie de película.

La superficie de la película es casi independiente del espesor de la misma, mientras que la superficie de las gotas depende tanto de la porción del líquido que forman las gotas como del tamaño promedio de las mismas. En una torre de caída interrumpida obviamente hay otros factores que considerar.

La imposibilidad de calcular “a” se obvia determinando experimentalmente el producto de  $K_x a$  como un solo factor para un tipo particular de empaque a flujos específicos para los fluidos que componen el sistema.



Si tenemos  $G dH$  que es la transferencia total de calor en la torre de difusión.

Reacomodando la Ecuación 20 nos queda

$$\frac{KaV}{L} = \frac{G}{L} \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{H' - H} \quad \text{Ecuación 21}$$

O como:

$$\frac{KaV}{L} = C_w \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{H' - H} \quad \text{Ecuación 22}$$

Al término  $\frac{KaV}{L}$  se le llama la característica de la torre. Esta ecuación de transferencia de calor es integrada por el método de los cuatro puntos de Tchebycheff (11).

La Ecuación 21 puede transformarse a la Ecuación 22 cuando se multiplica por la razón  $G/L$  y recordando que  $C = 1.0$  para el agua.

Es importante mencionar que no es muy conveniente usar la Ecuación 21 en el cálculo de torres de enfriamiento donde el interés principal se sitúa en la temperatura del agua producida por lo citado anteriormente.

### 3.2 Curvas de demanda y características de las torres de enfriamiento.

El Método de Curvas Características (Método que se resuelve utilizando el criterio de Merkel, al igual que el Método de Curvas, determina la capacidad de enfriamiento de la torre. El Método requiere de una curva característica de la torre, así como de valores de diseño: relación líquido-gas ( $L/G$ ), relación característica de la torre ( $\frac{KaV}{L}$ ) o de la aproximación de diseño. Se tienen que realizar igualmente las mismas mediciones que para el Método de Curvas, con estos valores se determinan los valores actuales de: relación de flujo ( $L/G$ ), y la relación característica de la torre ( $\frac{KaV}{L}$ ). Con estos valores de diseño y prueba se determina la capacidad de enfriamiento actual de la torre.



Cabe mencionar que el Diagnóstico Energético se complementa con una inspección física o formato de inspección visual, de los elementos que integran a la torre de enfriamiento.

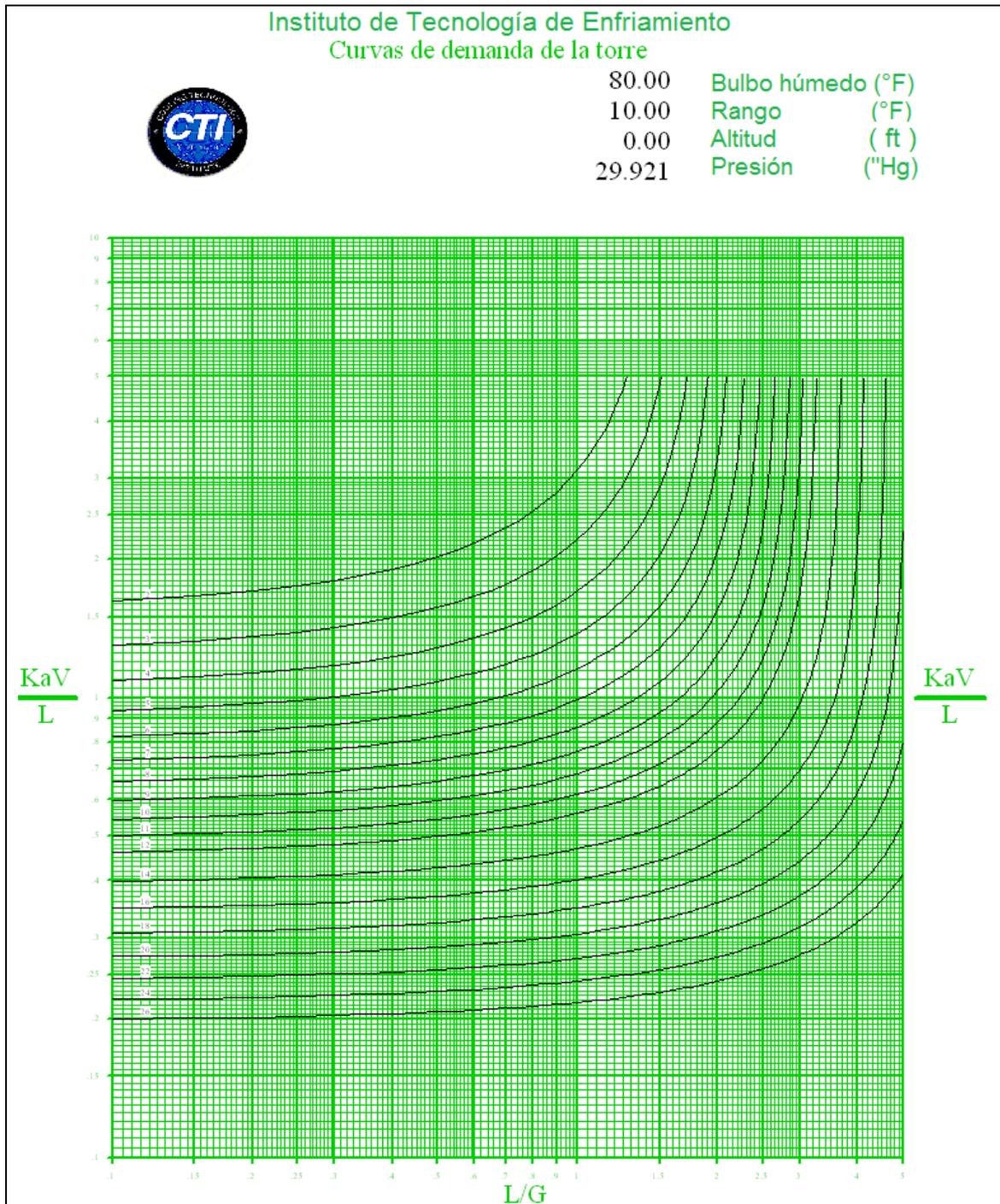
### 3.2.1 Curvas de demanda de la torre

Haciendo uso de la teoría de Merkel y las ecuaciones diferenciales y fundamentales se definen las condiciones límite de las torres de enfriamiento. La ecuación de Merkel es usada para calcular la demanda térmica basada en la temperatura de diseño y seleccionado la relación líquido-Gas (L/G). Los valores de  $Ka V/L$  se convierten en una medida del grado de dificultad para los requerimientos del enfriamiento del líquido. La temperatura de diseño y el L/G relacionan la demanda térmica a la diferencia de temperatura media (MTD) usada en algunos problemas de transferencia de calor. El método convencional para realizar este método es hacer una prueba y error para la solución gráfica del diseño de la torre.

Actualmente existen las curvas realizadas por Cooling Technology Institute publicadas en el “Cooling Tower Performance Curves”.

Estas curvas fueron calculadas se calcularon y graficaron en el programa tomando en cuenta un rango grande de temperaturas y condiciones de operación. Esta curva puede llamarse también “Curva de Requerimientos de diseño” puesto que es una medida del grado de dificultad para alcanzar los requerimientos de diseño, y no tiene nada que ver con las características físicas de la torre.

Se construye asumiendo valores de L/G y calculando los valores correspondientes de  $KaV/L$  utilizando la Ecuación 22. Como parámetros se muestran las líneas de aproximación ( $T_1-T_{BH}$ ). En la Figura 12 se muestra un ejemplo de las curvas de demanda de la torre a ciertas condiciones dadas.



**Figura 12. Curva de demanda de la torre de enfriamiento**

### 3.2.2 Curva característica de las torre

Para realizar el análisis de la capacidad de enfriamiento de una torre de enfriamiento específica se requiere el uso de la Ecuación 23. Actualmente, la siguiente ecuación es extensamente aceptada y es muy útil para generar las



curvas de demanda, ya que la relación  $KaV/L$  vs  $L/G$  es una función lineal en la curva logarítmica de la demanda.

$$\frac{Ka \cdot V}{L} = c \left( \frac{L}{G} \right)^{-m}$$

**Ecuación 23**

Donde:

$KaV/L$  = La característica de la torre, determinado por la ecuación de Merkel.

$c$  = Una constante relacionada con el diseño de la torre o las características del empaque.

$m$  = Exponente relacionado con el diseño de la torre (llamado pendiente), determinado a partir de los datos de prueba del empaque.

La curva característica se puede determinar por una de las siguientes maneras:

- i. Si aun está vigente o disponible, se puede usar la curva característica que el proveedor suministra. En todos los casos la pendiente de esa curva puede ser tomada como la pendiente de la curva de operación.
- ii. Se determina un punto característico por las pruebas en campo y se dibuja la curva característica a través de este punto paralelo a la curva característica original, o una línea a través de ese punto con la apropiada pendiente (-0.4 a -0.8).
- iii. Se determinan en campo al menos dos puntos característicos a diferentes  $L/G$ . La línea a través de esos dos puntos es la característica de la curva. La pendiente de esa línea debe caer dentro del rango esperado, y sirve como un control de la exactitud de la medición.

Un punto característico se determina experimentalmente mediante la primera medición de la temperatura de bulbo húmedo, la temperatura del aire descargado, y el agua de enfriamiento de entrada y salida de la torre. El  $L/G$  se calcula de la siguiente manera:

- i. Se puede asumir con seguridad que la descarga de aire está saturada, conociendo la temperatura de bulbo húmedo a la entrada de la torre, el incremento de la entalpia de la corriente de aire se obtiene de una carta psicométrica. El caudal del aire y del agua tiene que ser el rango



apropiado para la distribución del flujo uniforme. En caso de existir la recirculación del aire de descarga, la entrada del bulbo húmedo puede ser 1 o 2 °F arriba de la temperatura atmosférica de bulbo húmedo.

- ii. Del balance de calor y masa se puede calcular el flujo de aire seco y el L/G predominante en la torre.

En la siguiente grafica (Figura 13) se muestra la curva característica de la torre y su relación con las curvas de demanda de la torre.

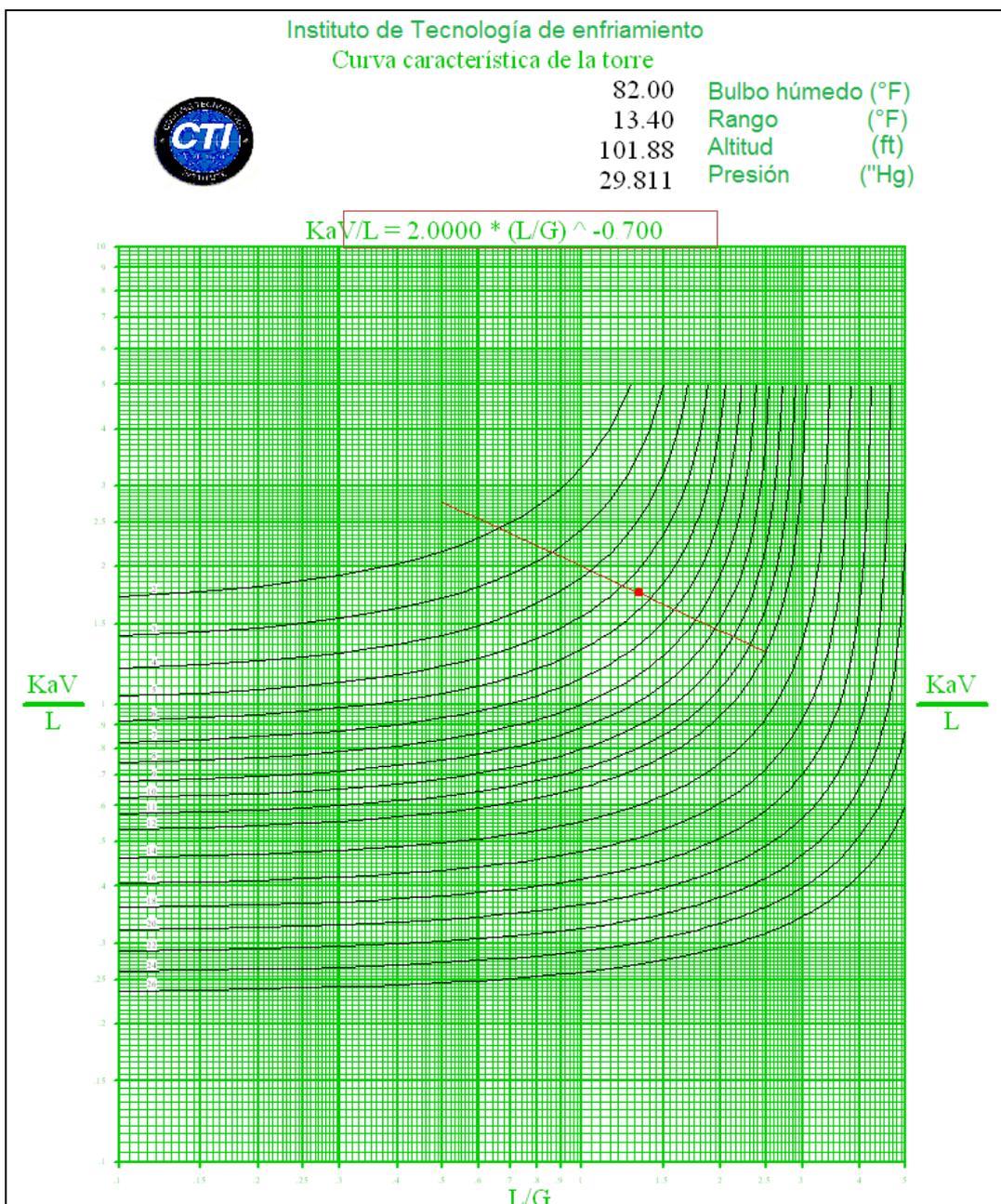


Figura 13. Curva característica de la torre



Como se observa en la Figura 13 la línea roja que cruza es la curva característica de la torre y los puntos del KaV/L y L/G se rigen principalmente por el empaque, cada empaque tiene su propia curva.

También se puede observar en el recuadro la ecuación de dicha curva, que a continuación se desarrolla un análisis de las variables de las que depende la curva.

Generalmente cuando el proveedor proporciona la ecuación que genera la curva característica, ésta depende de la altura del empaque y la distancia que viaja el aire, los dos medidos en unidades de longitud. Por lo tanto se tiene la Ecuación 23:

$$\frac{Ka \cdot V}{L} = C \left( \frac{L}{G} \right)^{-m}$$

Para calcular c primero se asume que

$$C = f(H, AT)$$

Si es función de H y AT entonces se tiene que:

$$C = A(H)^B \cdot (AT)^C \quad \text{Ecuación 24}$$

Por lo tanto el comportamiento de la ecuación general de las curvas características de los empaques es así:

$$\frac{Ka \cdot V}{L} = A(H)^B \cdot \left( \frac{L}{G} \right)^{-m} \cdot (AT)^{C'} \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde

H= La altura del empaque (ft)

AT= Air Travel (ft)

A, B, C'= Constantes relacionadas con las transferencia de calor de cada empaque.

### 3.2.2.1 Relación entre las curvas característica y demanda.

La curva característica es utilizada para determinar el buen funcionamiento de la torre en conjunto con curvas de KaV/L vs L/G. KaV/L es una medida del grado de dificultad para los requerimientos de enfriamiento del líquido.



La intersección de la curva característica y la curva de requerimiento de diseño localiza el punto de diseño. El fabricante predice que cuando se conoce  $L/G$ , el flujo de circulación de agua de diseño, la temperatura de entrada del agua y la temperatura de bulbo húmedo, se puede buscar la temperatura de salida del agua.

### **3.3 Características de los empaques usados en torres de enfriamiento.**

La parte más importante del intercambio de calor y masa entre el agua y el aire toma lugar en los empaques de las torres de enfriamiento.

Existen diferentes tipos de material de construcción como madera polipropileno PP, polietileno PE, PVC por mencionar algunos.

Los siguientes puntos deben ser considerados a fin de alcanzar el máximo intercambio de calor en los rellenos:

- i. El agua de enfriamiento debe abarcar un máximo de superficie normalmente grande con respecto a la corriente de aire. Por lo tanto es de gran importancia una película delgada de agua y una gran superficie de intercambio ( $m^2$  de superficie por  $m^3$  contenidos) del relleno.
- ii. La velocidad del intercambio de calor es ampliada por una corriente de aire más turbulenta (aire de alta velocidad).
- iii. Cuanto más rugosa sea la superficie del empaque más turbulenta es la corriente de aire/agua.
- iv. Un período largo de contacto del agua de enfriamiento en el relleno aumenta el intercambio de calor entre el agua y el aire. Por lo general, este periodo se alarga por la ampliación de la profundidad y altura del relleno (en la dirección del aire).
- v. Una buena distribución del agua por encima del relleno de enfriamiento debido a un sistema de distribución de agua correctamente diseñado en la torre de enfriamiento.



Existen dos formas en el diseño de los empaques, los de tipo película y los de tipo salpiqueo.

### **3.3.1 Empaques de tipo película (Film fill)**

En los empaques tipo película sintética el agua se distribuye en una gran superficie de una capa delgada, nivelando la película del agua. Para este tipo de empaques es necesario tener un buen sistema de distribución de agua. Los rellenos tipo película son comúnmente usado en flujos a contracorriente, aunque también son usados en torres de enfriamiento de flujo cruzado. Las dimensiones de fabricación de este tipo de empaque lo hacen muy eficiente en el intercambio de calor entre la corriente de agua y el aire, pero la desventaja que presenta es que la limpieza es muy complicada además de presentar caídas de presión grandes que son traducidas a elevados costos de energía (por el ventilador).

### **3.3.2 Empaques tipo salpiqueo (Splash bar fill)**

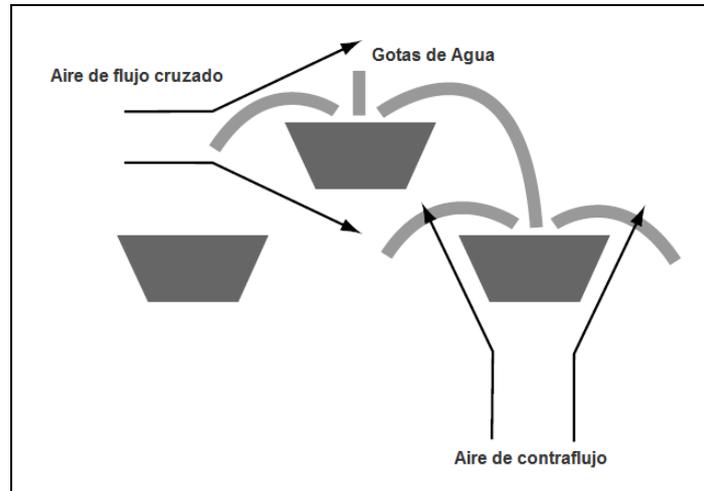
Los empaques de tipo salpiqueo son una alternativa a los empaques tipo película, debido a que no genera caídas de presión altas ya que está diseñado en barras, lo cual hace fácil su limpieza, además debido a la buena redistribución del agua de enfriamiento de ese empaque hay menos demanda en el sistema de distribución de agua en la torre.

En torre de enfriamiento de flujo cruzado la altura total del empaque varía de 3 a los 6 ft de relleno.

Para las torres de flujo cruzado las barras se montan en forma alterna con distancias verticales y horizontales, por ejemplo, 150 mm entre ellos, el empaque tiene una altura de hasta 8m y profundidades de hasta 3 m. hay excepciones. El agua de enfriamiento se dispersa en todas las barras de manera que puedan surgir pequeñas gotas de agua, el resultado de esto es un intercambio de calor de la superficie más efectivo además de prolongar la estancia dentro de la torre como se observa en la Figura 14. El uso de este tipo

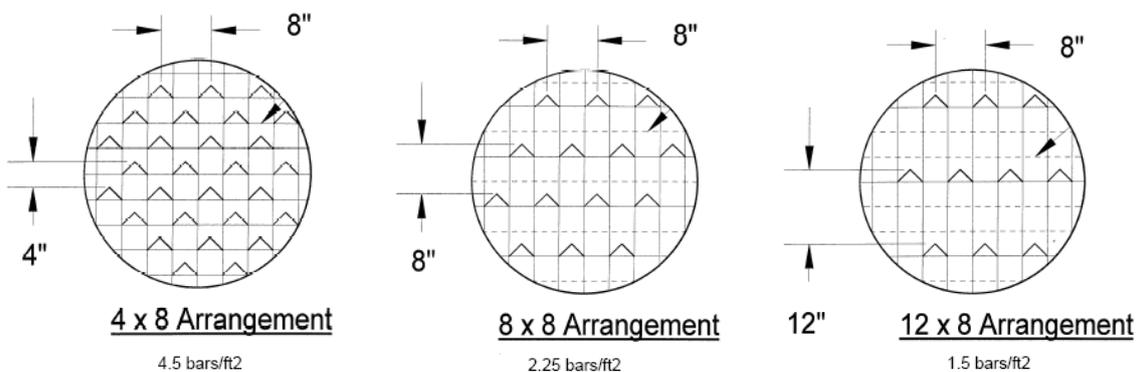


de empaques mejora la capacidad de enfriamiento y aumenta la eficiencia térmica.



**Figura 14. Operación del empaque Splash bar.**

Este tipo de empaque se utilizan con mayor frecuencia en la torres de flujo cruzado y la forma de ser instalados siguen una orientación con respecto al flujo de aire a través de la torre, a esta orientación se le llama espaciamiento y se da vertical y horizontal, esto es la distancia a la que se encuentran separadas cada una de las barras dentro de la torre. Por ejemplo, cuando tenemos (V-Bar con arreglo de 4x8) se dice que son 8 in de espaciamiento vertical y 4 in de espaciamiento horizontal. Como se observa el primer número siempre indica le espaciamiento vertical y el segundo número el espaciamiento horizontal, esto depende principalmente de los requerimientos del enfriamiento del agua. En la Figura 15 se muestran diferentes tipos de configuración de los empaques.



**Figura 15. Arreglos del empaque V-bar**



### 3.3.3 **Altura del empaque**

La altura empacada es a partir de la barda del recipiente de agua fría y abarca hasta donde llega el relleno en la malla, por ejemplo en una torre normalizada de flujo cruzado que tiene 32 ft de largo x 36 ft de altura x 17-18 ft de ancho de la zona empacada se mide así: 32 ft es el largo de la celda, la altura va desde la barda antes mencionada hasta un poco abajo (más o menos 2.5 ft) de la base de la charola de agua caliente y el ancho va desde donde se instala el relleno junto a las persianas hasta la parte interior de los eliminadores de rocío. En las torre de contra flujo va igual desde la barda del bacín hasta (más o menos 2.5 ft) abajo de la línea de centro del cabezal de distribución. El largo, es el largo de la celda y el ancho, el ancho de la celda (aquí no se usa el air travel).

Aplicaciones: su cantidad determina la capacidad de enfriamiento de la torre junto con la cantidad de aire.

### 3.3.4 **(Air travel) del empaque.**

El air travel (viaje del aire a través del relleno) es el ancho de la zona empacada y es la distancia que viaja el aire a través del relleno. Algunos fabricantes le llama air travel y otros le llaman profundidad del relleno (fill depth), por lo general esta distancia va de los 9ft a los 17ft. Medido en posición vertical sobre las torres de contraflujo y horizontalmente en las torres de flujo transversal.



# CASO DE ESTUDIO



## 4 CASO DE ESTUDIO

### 4.1 Descripción del problema

Actualmente existen en el mercado e industria diversos tipos de torres de enfriamiento, todos ellos adaptables de acuerdo a las necesidades específicas de clientes tan exigentes como PEMEX.

Dichas torres al paso del tiempo han ido mejorando tanto en tecnología como en materiales para su construcción y funcionamiento, haciendo que éstos sean fabricados bajo los estándares más altos de calidad, todo ello con la premisa de aumentar la capacidad de enfriamiento, prolongando su tiempo de vida y el de sus componentes y/o materiales para que el proceso de enfriamiento del agua sea el óptimo en las industrias, logrando disminuir pérdidas de evaporación, energía por mencionar los de mayor impacto.

Las torres de enfriamiento son equipos auxiliares críticos para plantas de proceso, cuando éstas operan a máxima capacidad también se exige una operación a máxima capacidad de las torres. Pueden presentarse problemas de producción si la torre de enfriamiento está en mal estado; algunos de las deficiencias más comunes en una torre de enfriamiento son mal estado de operación de ventiladores, eliminadores de niebla dañados o faltantes, paredes incrustadas o con crecimiento biológico, rellenos en estado inadecuado (rotos o cayéndose), por mencionar las fallas principales.

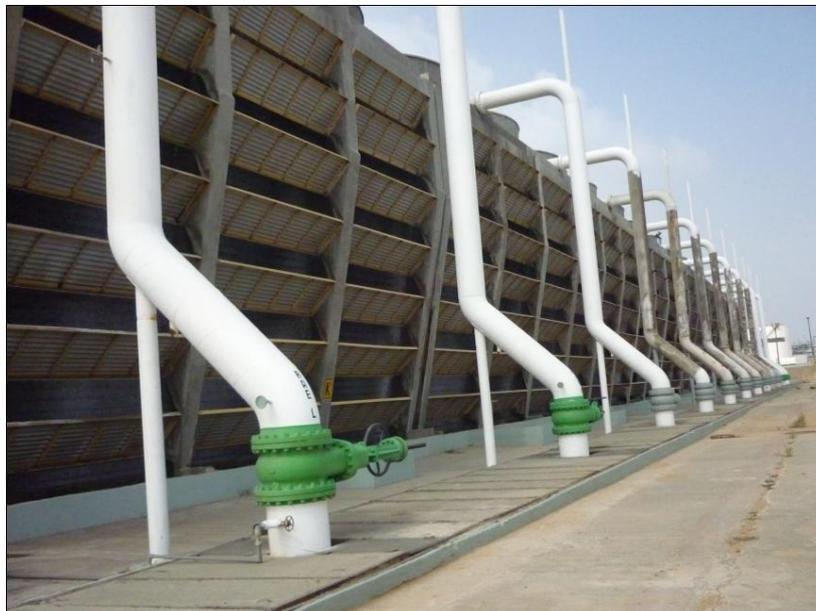
Por lo anterior es altamente recomendable el mantenimiento o rehabilitación de la torre, lo cual debe programarse adecuadamente pues un paro de la operación de la torre involucra el paro de suministro de agua de enfriamiento a las plantas de proceso con las consecuentes pérdidas económicas por disminución o paro de la producción.

Con base en lo anterior, el presente trabajo tiene por objetivo estudiar y realizar una propuesta para optimiza el ahorro de agua a partir de la rehabilitación de



componentes internos y externos de una torre, y muy en específico el análisis del enfriamiento de agua que ocurre a través de diferentes empaques, tomando en cuenta su material de fabricación, el diseño y la forma, para deducir o relacionar ecuaciones que describan el comportamiento de cada empaque en el momento en que se ponen en contacto con el agua y el aire en una torre de enfriamiento, con la función de disminuir la temperatura de agua de suministro a la planta de proceso, que implica una contribución al ahorro de agua y que conduce al control indicado de flujo y temperatura en función del calor disipado en la planta.

La torre de enfriamiento se encuentra ubicada en un Complejo Petroquímico, brinda servicio a una planta de etileno y su funcionamiento es de tiro mecánico inducido con operación de doble flujo cruzado y estructura de concreto, consta de 11 celdas con un ventilador cada celda, su capacidad total es de 110,000 GPM se le suministra agua de repuesto proveniente del proceso de coagulación- floculación. La Figura 16 muestra la torre de enfriamiento.



**Figura 16.** Torre de enfriamiento de tiro inducido y flujo cruzado

Para realizar el estudio se recopiló información existente sobre las torres de enfriamiento, se buscaron datos del sistema de bombeo, sistema mecánico de



ventilación, datos de diseño de las torres de enfriamiento, flujos históricos de agua, mediciones históricas de temperaturas e información acerca del estado actual de los componentes de las torres de enfriamiento (relleno, eliminadores de rocío, válvulas de control, entre otros). Además se revisaron los manuales sobre la operación de las torres de enfriamiento.

La Tabla 3 contiene los datos de diseño de la torre proporcionados por el personal del complejo y los datos de las condiciones actuales medibles en las que se encuentra la torre de enfriamiento.

Tabla 3. Condiciones de diseño de la torre de enfriamiento ubicada en el complejo petroquímico.

Torre DE-500	DISEÑO	ACTUAL
Capacidad, GPM	110,000	98,347
Temperatura Agua de retorno, °F	110	109.5
Temperatura agua de salida, °F	90	93.1
Temperatura bulbo húmedo, °F	76.71	82.4
Temperatura bulbo seco, °F	88.94	88
Pérdidas por arrastre máximo, GPM	3	-
Pérdidas por evaporación, GPM	2,200	-
Purga, GPM	547	-
Ciclos de concentración	5	-
L/G	1.3	-
KaV/L	0.57316	-
Carga térmica, BTU/min.	33,400,000	
Número de celdas	11	11
Tipo de flujo	FLUJO CRUZADO	FLUJO CRUZADO

## 4.2 Análisis preliminar

Como se citó anteriormente, el alcance más importante es disminuir la temperatura del agua de suministro de la torre de enfriamiento, para llevar a cabo dicho proceso es necesario que la gota esté el mayor tiempo posible en



contacto con el aire, esto se logra en gran parte por la altura de la torre además de la colocación de obstáculos como es el relleno o empaque de la torre, el cual detiene y al mismo tiempo fragmenta la gota de agua, obteniendo mayor área de contacto facilitando así el proceso de evaporación. Existen numerosos tipos de empaques en el mercado con características propias como son el acomodo, espaciamiento, volumen, diseño, altura por mencionar algunas, que afectarán o beneficiarán su operación.

Conocer los empaques de una torre de enfriamiento permite realizar un diagnóstico y evaluación de los mismos, para ello se analizan tres distintos empaques de tipo salpiqueo y su elección depende principalmente de tres aspectos técnicos usados en torres de enfriamiento:

- El más usado o más común por antigüedad.
- El de máxima eficiencia (basado en la literatura).
- Una tecnología innovadora y efectiva.

A continuación se presentan opciones de empaques para incrementar la capacidad de enfriamiento en la torre del caso de estudio.

#### **4.2.1 Empaque V-bar**

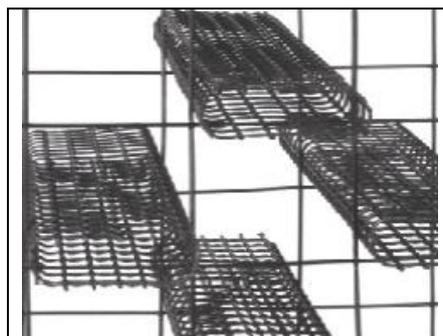
Usado por más de 30 años el empaque V-bar (Barra en V) ha sido probado exitosamente y es un reemplazo durable y de alto rendimiento, fabricado de PVC rígido y con protección a los UV, el material es resistente a pudrirse, y a los álcalis; además tiene la máxima eficiencia con el mínimo de requerimientos de energía y un bajo costo de mantenimiento. En la Figura 17 se muestra el empaque V-Bar.



**Figura 17.** Empaque tipo salpiqueo V-Bar

#### 4.2.2 Empaque Opti-Bar

El relleno Opti-bar es fabricado de polietileno de alta densidad, que es muy resistente a los ataques químicos, biológico, ácidos e hidrocarburos, además contiene un inhibidor de rayos UV y puede operar continuamente a una temperatura de agua de 145°C, actualmente es el relleno que incrementa más la capacidad de enfriamiento de una torre, según estudios realizados por firmas de ingeniería.



**Figura 18.** Empaque tipo salpiqueo Opti-Bar

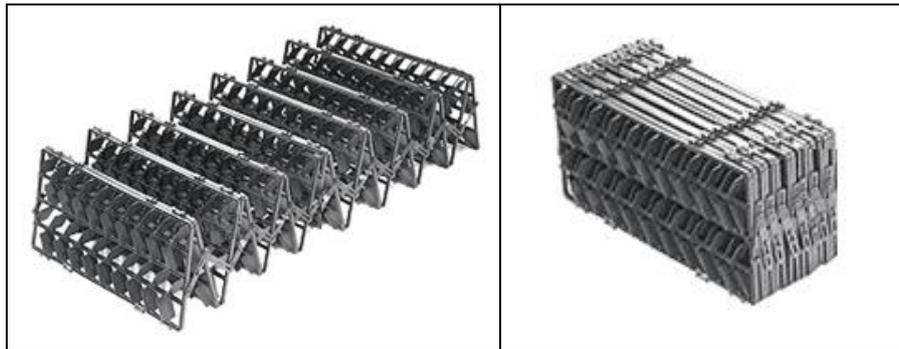
#### 4.2.3 Empaque Turbo Splash

El TurboSplash logra un alto rendimiento térmico en torres de enfriamiento de contraflujo y flujo cruzado y su diseño abierto, resistente al ensuciamiento, lo convierte en la opción ideal para aplicaciones de agua sucia, como en las



industrias de energía, refinación, petroquímica, acero, papel y procesamiento de alimentos.

Cada unidad se pliega en forma de acordeón en un paquete compacto (Figura 19), lo que hace su embarque y almacenamiento más eficiente y rentable, luego en la torre se desdobla en una instalación fácil y sencilla.



**Figura 19.** Empaque tipo salpiqueo Turbo Splash



# METODOLOGÍA



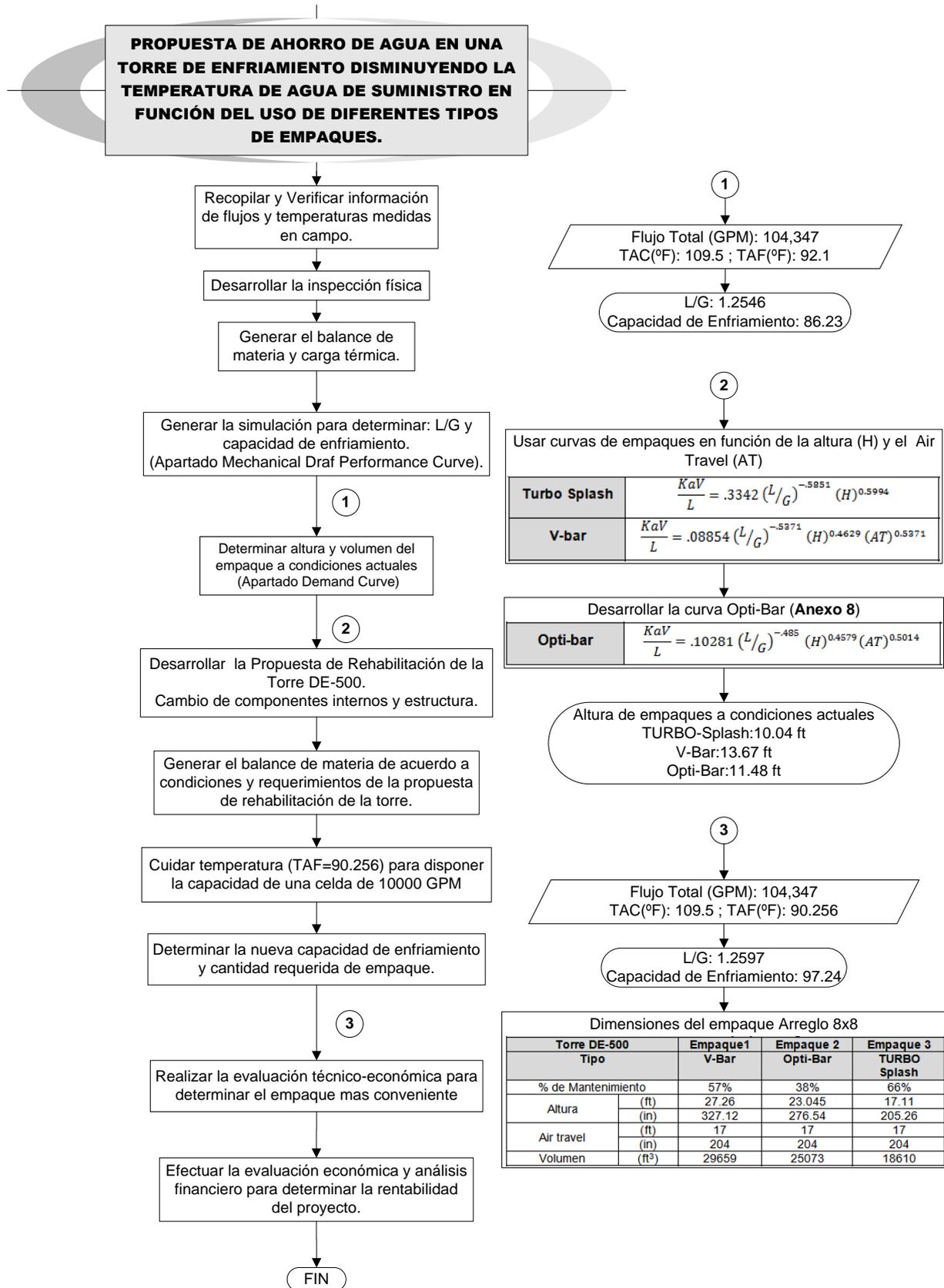
## 5 METODOLOGÍA

En este trabajo de tesis se probaron diferentes valores de temperatura de agua fría así como diferentes tipos de empaque para disminuir 10,000 GPM el flujo de agua de enfriamiento. Se evaluó la operación actual de la torre de enfriamiento con respecto a las especificaciones de diseño, para dar una propuesta de modernización del empaque. Para lo anterior se necesitó realizar los balances de materia y energía de la operación actual, consultar información de los fabricantes de empaques y hacer uso del simulador CTI Toolkit para las evaluaciones de cada empaque.

A continuación se describe y se ilustra la metodología a seguir durante el desarrollo del presente trabajo. En la Figura 20 se muestra el diagrama de flujo de la metodología utilizada en el desarrollo de estas actividades.

**Revisión y verificación de información.** Este punto consistió en la revisión de las bitácoras de operación del último año, así como también revisión del manual de operación de la torre de enfriamiento, se realizó una inspección general visual y verificación de parámetros necesarios (flujo del agua de suministro de la torre de enfriamiento, además de la temperatura del agua caliente y del agua fría) medidos en campo, para realizar el balance de materia correspondiente.

**Generación del balance de materia y carga térmica disipada.** Se utilizó los datos de temperatura y flujos obtenidos en campo, para generar el balance de agua teórico másico y la capacidad térmica disipada teórica en condiciones de operación de la torre para cuantificar las pérdidas por evaporación, arrastre, purgas y fugas.



**Figura 20.** Metodología establecida para el desarrollo de la evaluación de una torre de enfriamiento.



**Inspección física de la torre DE-500.** Con base en un reconocimiento general e inspección física de la torre de enfriamiento, se determinó el estado físico actual de todos los elementos que la componen, tales como: las persianas, el recipiente de agua fría, la charola de agua caliente, los eliminadores de arrastre, el relleno, el sistema de distribución, las escaleras, los conos Venturi, los ventiladores y la estructura tanto interna como externa de la torres.

**Generación de la simulación teórica de la torre y determinación del empaque apropiado.** Con base en los métodos y aplicaciones del CTI se realiza la simulación para calcular la capacidad de enfriamiento y el L/G de prueba, y así determinar la altura y el volumen apropiado del empaque para las condiciones de operación deseadas de la torre.

**Análisis de los datos generados recomendaciones y conclusiones.** Con base en los flujos y temperaturas medidas en campo, los flujos temperaturas generados por el balance teórico del agua, la altura y volumen requerido por las condiciones de operación deseadas se realizó un análisis sobre la propuesta de rehabilitación y las recomendaciones para el mantenimiento correctivo y preventivo de la torre DE-500 del Complejo Petroquímico.



# DESARROLLO



## 6 DESARROLLO

### 6.1 Revisión y verificación de información

Para esta etapa se revisó la información proporcionada por el complejo sobre los datos de diseño de la torre y los datos medidos (flujos y temperaturas) por personal asignado.

En la Tabla 4 se muestra el flujo de suministro de agua medido en las líneas de descarga de bombas, el flujo de retorno medido en los cabezales de disparo a cada celda y el flujo de repuesto medido en las líneas que suministran a la torre. Estos flujos representan las condiciones operativas actuales de la DE-500.

Tabla 4. Resultado de las mediciones de flujo en la torre DE-100

TORRE	SUMINISTRO		RETORNO		REPUESTO	
	GPM	m <sup>3</sup> /d	GPM	m <sup>3</sup> /d	GPM	m <sup>3</sup> /d
<b>DE-500</b>	104,347	568,794.8	104,251	568,271.5	2365.07	12891.97

NOTA: Promedio de las mediciones de los flujos en la torre

En la Tabla 5 se realizó una comparación del flujo de recirculación de agua actual que maneja cada una de las torres con respecto al flujo de diseño.

Tabla 5. Capacidad del flujo actual de la torre de enfriamiento con respecto al flujo de diseño

TORRE	SUMINISTRO [GPM]		% OPERACIÓN
	DISEÑO	MEDICIÓN	
<b>DE-500</b>	110,000	104,347	95.8

Como se observa en la Tabla 5, el flujo actual de la torre de enfriamiento DE-500, es el 95.8% del flujo de diseño. Esta torre se encuentra operando con todas sus celdas.

En este trabajo se plantea como un área de oportunidad para el ahorro de energía y agua, el cambio en condiciones de operación y de internos de la torre de enfriamiento.



Los valores promedio de las temperaturas en la torre de enfriamiento medidas en el presente trabajo se muestran en la 66Tabla 6.

Tabla 6. Resultado de las mediciones de las temperaturas

TORRE	TAC		TAF		TBH		TBS		RANGO		APROXIMACIÓN	
	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F
DE-500	43.05	109.5	33.39	92.1	28.56	83.4	32.64	90.75	9.67	17.4	4.83	8.7

Donde:

Temperatura de agua caliente = TAC

Temperatura de agua fría = TAF

Temperatura de bulbo húmedo = TBH

Temperatura de bulbo seco = TBS

El rango= (TAC – TAF)

La aproximación= (TAF-TBH)

## 6.2 Balance de materia teórico y carga térmica disipada teórica

El balance de materia teórico de la operación actual de las torres de enfriamiento se determinó con las mediciones de temperatura y flujo de agua, realizadas en el C.P. Las variables involucradas para este balance se encuentran en el Apartado 2.5 y las ecuaciones para el cálculo de estas variables son (Ecuación 1, Ecuación 2, Ecuación 3, Ecuación 4, Ecuación 5 y Ecuación 7).

Para realizar el balance de materia de la torre de enfriamiento DE-500, se tomó en cuenta el siguiente método de cálculo:

Considerando el valor obtenido en la medición de flujo en las líneas de suministro y las mediciones de temperaturas del agua caliente y fría en la torre de enfriamiento DE-500

$R = 104,347 \text{ GPM}; TAC=109.5 \text{ } ^\circ\text{F}, TAF= 92.1^\circ\text{F}$



Obtención del volumen de agua de evaporación (E) con la Ecuación 1

$$E = \frac{R * \Delta T}{1000} = \frac{(104,347 * (109.5 - 92.1))}{1000} = 1815.64 \text{ GPM}$$

Obtención del volumen del arrastre (A) con la Ecuación 2

$$A = 0.002\% * R = 0.00002 * 104,347 = 2.09 \text{ GPM}$$

Obtención del volumen de purga (P) sustituyendo el resultado de la ecuación (1) y (2) y consideramos que el ciclo de concentración (c.c.)= 5; este dato se consideró de acuerdo a los estadísticos reportados de los ciclos de concentración en el periodo del 2005-2009 en el Complejo petroquímico del volumen de purga (P).

Sustituyendo los resultados en la Ecuación 3

$$P = \frac{E}{(c.c - 1)} - A = \frac{1815.64}{5 - 1} - 2.09 = 451.82 \text{ GPM}$$

Obtención del volumen de agua de repuesto (Ar), se sustituyen los resultados de anteriores en la Ecuación 5.

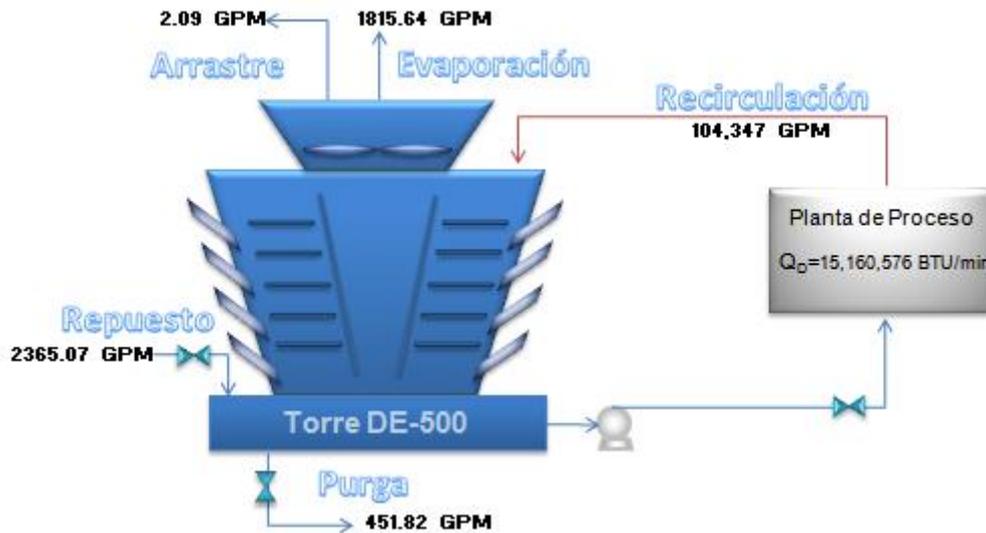
$$Ar = E + A + P = 1815.64 + 2.09 + 451.82 = 2365.07 \text{ GPM}$$

Obtención de la carga térmica disipada (QD), se sustituyen los valores de la recirculación, temperatura del agua fría y la temperatura del agua caliente en la de fórmula (6).

$$QD = R * (TAC - TAF)Cp * 8.35 = 104,347 * (109.5 - 92.1) * 1 * 8.35$$

$$QD = 15,160,576 \text{ BTU}/\text{min}$$

En la Figura 21 se esquematiza el balance de agua actual de operación de la torre DE-500; se observa que el flujo de repuesto es 2.27% con respecto al flujo de recirculación. Donde este porcentaje representa una pérdida de agua en la torre de estudio.



**Figura 21.** Esquema del actual balance de agua de la torre de enfriamiento DE-500.

### 6.2.1 Análisis de las pérdidas por evaporación arrastre y purgas

La Tabla 7 muestra el resultado general de las pérdidas de agua en la torre de enfriamiento DE-500 del Complejo Petroquímico.

Tabla 7. Pérdidas de agua en la torre DE-500

TORRE	EVAPORACIÓN [GPM]	ARRASTRE [GPM]	PURGA [GPM]	FUGA [GPM]	TOTAL [GPM]
DE-500	1815.64	2.09	451.82	95.52	2365.07

Como se puede observar en la Tabla 7, las mayores pérdidas son provocadas por la evaporación que representan el 76.77% de las pérdidas totales del sistema de enfriamiento que se encuentra en función de la temperatura y el flujo que se encuentra recirculando la torre.

Las pérdidas por purga en el sistema de enfriamiento representan el 19.10% las cuales pueden ser reducidas si se incrementa la calidad de agua de repuesto.



En la cuantificación de la pérdida de agua diferente al proceso de enfriamiento (fugas), se considera la diferencia entre el flujo de repuesto resultante del balance de materia teórico en operación y el flujo de repuesto obtenido en campo. La Tabla 8 muestra que la torre de enfriamiento DE-500 opera con un flujo de repuesto mayor al que necesita para su operación, lo que indica la existencia de fugas en la línea de suministro y retorno del sistema.

Tabla 8. Cuantificación y ubicación de las fuga en la torre de enfriamiento

TORRE	REPUESTO MEDICIÓN EN CAMPO [GPM]	REPUESTO BALANCE TEÓRICO [GPM]	FUGA [GPM]	UBICACIÓN [GPM]
DE-500	2365.07	2269.55	95.52	En planta

### 6.3 Inspección física de la torre de enfriamiento DE-500

Con base en un reconocimiento general e inspección física de la torre de enfriamiento, se determinó el estado físico actual de todos los elementos que componen las torres, tales como: las persianas, el armazón, el recipiente de agua fría, las tinas de agua caliente, los eliminadores de arrastre, el relleno, los sistemas de distribución, las escaleras, los conos Venturi, los ventiladores y la estructura interna y externa de todas las torres.

#### 6.3.1 Estructura general y escaleras

El recipiente de agua fría se encuentra en buen estado, y tiene una profundidad de 5 ft.

Las escaleras de acceso a la torre se encuentran firmes y en buen estado, están hechas de concreto, y el material de los barandales es de fibra de vidrio. Los barandales del interior de la torre están hechos de fibra de vidrio.



### 6.3.2 Relleno o empaque

Todas las celdas sin excepción tienen relleno del tipo Opti-Bar, el 40% se encuentran en mal estado, debido a que se cayeron o están rotos. Un 20% se encuentran sucios, sus dimensiones son:

Ancho = 17ft; Longitud= 32 ft; Alto = 18 ft.

### 6.3.3 Eliminadores de arrastre

Los eliminadores de arrastre fueron fabricados de polipropileno y son de tipo canaleta “Normalizada”. El 20% se encuentran operando inadecuadamente, debido a secciones rotas, doblados o faltantes, no cuentan con sellos de aire y hay inadecuada instalación de los eliminadores.

### 6.3.4 Sistema de distribución

La charola de agua caliente está fabricada con material de concreto y se encuentra en buen estado el 80%, la otra parte sobrante está en malas condiciones debido a que se encuentran inundadas.

Las boquillas rompedoras de chorro de marca Marley son de 1 in de diámetro con una altura de 30 cm y su arreglo es de 19X20. Al 50% de las boquillas les faltan los restrictores y algunas se encuentran tapadas.

Las cajas de salpiqueo están construidas de concreto y operan en buenas condiciones. Las válvulas de plato están hechas de material de acero, y se encuentran en buenas condiciones para poder seguir operando, únicamente se sugiere limpieza de la oxidación presente en el 30%.



**Figura 22.** Sistema de distribución torre DE-500



### 6.3.5 Persianas

Las persianas están fabricadas con un material de fibra de vidrio y están en regular estado, debido a que existen fugas entre la persiana y el concreto en el 40% de la torre y crecimiento microbiano.

### 6.3.6 Ventiladores

Los ventiladores de marca Howdem se encuentran en buen estado de operación, tienen un medidor de vibración marca Munfhy que se encuentra colocado en el soporte del rotor y es a prueba de explosiones.

El soporte del motor es de acero, es necesario que se les de mantenimiento y en el caso que sea necesario debe considerarse el reemplazo de algunas partes ya que presentan fisuras y roturas.

### 6.3.7 Chimenea o Venturi

Las chimeneas tienen una altura de 18 ft y un diámetro de 20 ft, y presentan desprendimientos de concreto.

Se recomienda el cambio por chimeneas de fibra de vidrio de 14 ft de altura para reducir el peso de la estructura.

En la Tabla 9 se muestra el resumen de los resultados obtenidos en la inspección y las recomendaciones o propuestas generales para la solución del problema presente en la torre de enfriamiento DE-500.



Tabla 9. Condiciones de operación de la torre de enfriamiento DE-500

Problemas principales	Efectos en la operación	Propuesta conceptual
1. Daños en los eliminadores por falta de mantenimiento.	-Reducción en la capacidad de enfriamiento -Pérdidas por arrastre	-Instalar las secciones faltantes y dañadas de acuerdo al diseño -Instalar adecuadamente los sellos de aire entre las secciones de uniones tanto de los eliminadores como de la pared de la torre.
2. Daño en relleno por inadecuada distribución de agua.	-Incremento en el consumo energético -Reducción en la capacidad de enfriamiento	-Instalar el relleno faltante de acuerdo al diseño. -Solicitar pruebas y resultados de los materiales de construcción en el relleno. -Limpiar aceite derramado después de realizar mantenimiento en motores reductores y ventiladores.
3. Daño en el 20% de las charolas de agua caliente por mala distribución de agua en la torre. 4. Válvulas dañadas por corrosión en los cuerpos de válvula. 5. Boquillas dañadas por taponamiento y desprendimientos de las rosetas.	-Incremento en el consumo de energía eléctrica y de agua. -Reducción en la capacidad de enfriamiento. -Daño físico al empaque y mallas del soporte.	-Limpiar boquillas mediante su remoción y colocando en forma inversa. No utilizar varillas metálicas para evitar su ruptura. -Instalar boquillas y restrictores de flujo de acuerdo al diseño.
6. Daños en las persianas por incrustación y crecimiento biológico. 7. Soportes de los ventiladores inadecuados.	-Fugas de agua por salpicadura en el interior de la torre -Movimiento en la torre	-Revisión periódica de la estructura.



## 6.4 Cálculo de la Capacidad de enfriamiento mediante simulaciones (método CTI).

Tomando como base la información recopilada en los recorridos e inspecciones en campo para cada una de las torres y retomando las mediciones de flujos y temperaturas, se realizó el cálculo de la eficiencia térmica utilizando un software de simulación de la metodología CTI.

Esta metodología fue establecida por la CONUUE (Comisión Nacional del Uso Eficiente de la Energía) para la evaluación de torres de enfriamiento, la cual se basa en el Code ATC-105 “Acceptance Test Code for Water Cooling Towers” del CTI (Cooling Technology Institute). Los resultados obtenidos de las simulaciones, permiten identificar puntos de mejora en la operación de las torres de enfriamiento así como plantear y desarrollar propuestas.

La capacidad de enfriamiento que calcula el CTI (Cooling Technology Institute) toma en cuenta varios factores, los cuales son:

- La temperatura de bulbo húmedo y seco para determinar la humedad relativa del aire a la entrada de la torre.
- La potencia del ventilador para calcular el flujo de aire.
- La temperatura del agua caliente (retorno de planta), temperatura de agua fría (suministro a planta) para determinar el rango de operación de la torre.
- El coeficiente L/G que es la relación entre el flujo de agua entre el flujo de aire seco a la entrada de la torre.

Estos factores, más las curvas que generan el CTI (ver Anexo 2) dan como resultado un valor en porcentaje que representa la cantidad de flujo que puede enfriar la torre a las condiciones de diseño.

En la Tabla 10 se presenta la capacidad de enfriamiento de la torre de enfriamiento DE-500 del Complejo Petroquímico.



Tabla 10. Capacidad de enfriamiento de la torre DE-500

Torre DE-500	Flujo [GPM]	TAC [°F]	TAF [°F]	L/G	Capacidad de enfriamiento CTI (%)
<b>Condiciones Actuales</b>	104,347	109.5	92.1	1.2546	86.23

De acuerdo con los cálculos, la torre DE-500 opera casi al 85% de capacidad de enfriamiento, lo que la hace susceptible a cambios de su infraestructura.

### **6.5 Requerimientos de la planta de proceso que suministra agua de enfriamiento la torre DE-500**

El requerimiento preliminar de agua de enfriamiento de la planta de proceso le suministra un sistema de agua de enfriamiento de circuito cerrado, esto es que el agua de enfriamiento se bombea desde el pozo de la torre al cabezal de suministro y se distribuye a todos los intercambiadores. Se recolecta en el cabezal de retorno y se envía de nuevo a la parte superior de la torre donde se realiza el enfriamiento del agua. La temperatura del cabezal de suministro es de 89.6°F máximo. La temperatura máxima de retorno es de 115°F por diseño, y la temperatura normal de retorno es de 110°F. De acuerdo a la filosofía de operación, el flujo por diseño de suministro de agua de enfriamiento a la planta de proceso asciende a 104,799°GPM y una se tiene una carga térmica estimada de 17'950,033 BTU/min.

Con base al balance de materia teórico realizado anteriormente se obtuvieron los requerimientos actuales de la planta de proceso. La temperatura del cabezal de suministro es de 92.1°F y la temperatura de retorno es de 109.5°F. El flujo de suministro de agua de enfriamiento a la planta de proceso es de 104,347°GPM y una carga térmica estimada de 15'160,576 BTU/min.



## 6.6 Cálculo de la altura del empaque y el $KaV/L$ de la torre.

Para analizar las opciones de empaques antes mencionadas, se calcula la altura de cada empaque que correspondería a las condiciones actuales de funcionamiento de la torre DE-500.

Se realizó la simulación con tres diferentes empaques, Opti-Bar, V-bar y Turbo Splash calculándose la altura de empaque requerido en cada caso. En el caso de la simulación con el Opti-Bar se tomó en cuenta que la torre DE-500 actualmente ya tiene este empaque instalado pero el mismo se encuentra en un 40% dañado.

Como se mostró en el Apartado 3.2.2 cada empaque tiene una curva que lo caracteriza, y la ecuación que describe dicha curva se encuentra en función de dos variables: la altura y la pendiente. En la Tabla 11 se muestra la ecuación que describe la curva característica de las opciones de empaques que se estudian.

Tabla 11. Ecuaciones que describen el comportamiento de los empaques

<b>Turbo Splash</b>	$\frac{KaV}{L} = .3342 (L/G)^{-.5851} (H)^{0.5994}$	<b>Ecuación 26</b>
<b>V-Bar</b>	$\frac{KaV}{L} = .08854 (L/G)^{-.5371} (H)^{0.4629} (AT)^{0.5371}$	<b>Ecuación 27</b>
<b>Opti-Bar</b>	$\frac{KaV}{L} = .10281 (L/G)^{-.485} (H)^{0.4579} (AT)^{0.5014}$	<b>Ecuación 28</b>

La Ecuación 26 y la Ecuación 27 fueron proporcionadas por Brentwood (2000) y la Ecuación 28<sup>1</sup> es una contribución del presente trabajo y fue obtenida con base en la información contenida en el documento TP99-05 (Una comparación de empaques tipo splash de torres de enfriamiento de flujo cruzado) publicado por el Cooling Tower Institute (1999), donde se muestra la curva del relleno Opti-bar con 30 ft de altura y un viaje del aire de 17' y un espaciamiento de 8x8 la ecuación que describe la curva a las condiciones de diseño queda:

<sup>1</sup> La justificación y desarrollo se encuentra en el Anexo 7



$$\frac{KaV}{L} = 2.01(L/G)^{-0.483}$$

$$1.76 = 2.01(1.33)^{-0.483}$$

Debido a que la ecuación anterior no está en función de la altura del empaque, se realizó una aproximación con los puntos de prueba en la torre DE-500, obteniéndose:

$$1.1661 = 1.3011 * (1.2546)^{-0.483}$$

Para obtener una ecuación análoga a las dos primeras ecuaciones presentadas en la Tabla 11 se planteó la ecuación que sigue y se procedió a calcular los coeficientes adimensionales A, B, A' y B' donde "H" es la altura del empaque en ft y "AT" es el viaje del aire en ft, como se muestra:

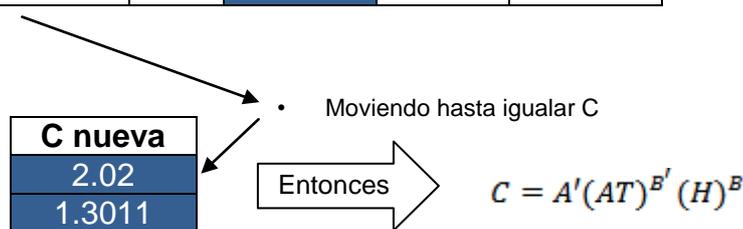
$$C = A(H)^B \quad \text{Donde} \rightarrow \quad A = A'(AT)^{B'}$$

De acuerdo a la grafica del comportamiento del Opti-bar se tiene:

1.- Condiciones de diseño; 2.- Condiciones actuales

Condición	H	C	L/G	KaV/L
1	30	2.02	1.33	1.7601
2	11.5	1.3011	1.2546	1.1661

<b>A</b>	0.425495
<b>B</b>	0.457956
<b>A'</b>	0.102808
<b>B'</b>	0.501335



La ecuación obtenida es la que se muestra en la Tabla 11.

Con respecto a la altura que podrían ocupar los diferentes empaques en la torre de estudio se sustituyen los datos en las ecuaciones de la Tabla 11 tomando en cuenta las condiciones de prueba en la torre DE-500, con un L/G de 1.2546 y la simulación en el apartado de Demand Curve, la funcionalidad de este apartado se muestra en el Anexo 3. Con respecto al empaque V-bar la



altura del relleno se considera un viaje del aire de 17ft, y el arreglo del espaciamiento es de 8x8.

Los resultados de la simulación arrojan los valores de C (característica del empaque), con base a estos resultados y con la Ecuación 24 se despeja la H (altura) para obtener el valor.

Para el empaque Turbo Splash se sigue el mismo procedimiento. En la Tabla 12 se muestran los resultados de la altura aprovechada de los diferentes empaques, es importante mencionar que el empaque instalado en la torre es el llamado Opti-Bar y los dos sobrantes (V-bar y Turbo Splash) son simulados.

Tabla 12. Altura de los empaques usados en la torre DE-500

Torre DE-500	Opti-Bar	V-Bar	Turbo Splash
C	1.3011	1.3170	1.3315
Altura (ft)	11.48	13.67	10.04

La Tabla 12 muestra que a las condiciones actuales que se encuentra la torre DE-500, el empaque simulado con menor altura es el Turbo Splash y el mayor es el V-bar, esto depende los requerimientos para alcanzar la temperatura de agua fría que suministra la torre de enfriamiento.

## 6.7 Cálculo del volumen del empaque de las condiciones actuales.

El volumen del empaque usado en las torres de enfriamiento depende simplemente de la altura del relleno, el tamaño de la celda y el número de las celdas que la componen. El producto de estas variables dan un dimensionamiento aproximado de la torre y todo está en función de los requerimientos y funcionamiento de la torre. La Ecuación 29 muestra el cálculo del volumen del empaque.

$$V_{\text{empaque}} = (H_{\text{relleno}} \cdot \text{Tamaño}_{\text{celda}} \cdot \text{No de celdas}) \quad \text{Ecuación 29}$$

En la Tabla 13 se muestra el volumen de las condiciones actuales medido en campo y el volumen en funcionamiento a partir de la simulación teórica.



Tabla 13. Volumen actual del empaque en la torre DE-500

	<b>Empaque instalado</b>	<b>Empaque en funcionamiento</b>
Altura(ft)	18	11.5
Volumen por celda (ft <sup>3</sup> )	19584	12490.2

Como se mencionó en (apartado 6.3.2), en la inspección física se determinó que el 40% del empaque se encuentra en mal estado, lo anterior también se detecta con la simulación porque hay una diferencia entre la altura calculada y la altura actual de empaque en funcionamiento en la torre.

### **6.8 Propuesta “Ahorro de agua de pretratamiento a través del mantenimiento y rehabilitación de la torre de enfriamiento DE-500”**

La rehabilitación de la torre de enfriamiento DE-500 garantiza contar con ahorros de agua evitando fugas en paredes de la torre, salpicaduras por las persianas y eliminadores, así como de mejorar la capacidad de enfriamiento de las torres.

Esta propuesta de rehabilitación tiene por objetivo disminuir la temperatura de agua de enfriamiento de suministro a la planta de proceso centrándose en los empaques los cuales son el único componente capaz de mejorar la eficiencia de operación de las torres y mejorar la capacidad de enfriamiento.

Las especificaciones de la rehabilitación de la torre de enfriamiento del Complejo Petroquímico son las siguientes:

Los eliminadores de rocío siguen las siguientes características:

- Tipo celular.
- Pegados en fábrica no ensamblados.
- Fácilmente removibles cuando se requiera dar mantenimiento a las torres.



- Las hojas deben ser de polipropileno de alta densidad o polietileno, de tipo rígido con inhibidor de rayos ultravioleta y de acuerdo a los lineamientos generales de la especificación ASTM D 1784, Clase 1334 C en su última edición. Debe garantizar un arrastre máximo de 0.001 % del agua de recirculación.
- Los eliminadores deben ser de resina virgen no reciclado ASTM D1784 y con una clasificación menor de 25 para difusión del fuego de acuerdo a ASTM E84 última edición, y deben estar dispuestos en módulos que permitan ser fácilmente removibles para su mantenimiento.

Las persianas deben cumplir con las siguientes características:

- El material de las persianas corrugadas y esquineros de fibra, debe ser de un peso de fabricación de 0.46 kg/cm<sup>2</sup> (12 oz/ft<sup>2</sup>) y auto extingible (de acuerdo al estándar CTI-STD-131 del CTI última edición), con baja densidad de humos y retardante al fuego (de acuerdo a la norma ASTM-E84 en su última edición), sin acondicionamiento externo y resistentes a la luz Ultravioleta.

En el caso del relleno, las características son las siguientes:

- Tipo de salpiqueo.
- Material de fabricación resina, polietileno de alta densidad, polipropileno estabilizado con inhibidores de UV, auto-extingible de acuerdo al ASTM-D-635 y ASTM E-84 en su última edición con clasificación menor de 25 para la extinción del fuego.
- Empaque diseñado en polietileno de alta densidad o polipropileno para ofrecer una baja resistencia al flujo del aire, sin canalizaciones de agua, que proporcione una máxima superficie de exposición y un máximo de tiempo de contacto entre el agua y el aire. Debe ser removido fácilmente y el material de construcción debe ser a base de perfiles fabricado de resina virgen de polietileno de alta densidad o polipropileno.

Finalmente, en el caso de las boquillas y estructura general de la torre, las características son las siguientes:



- Las boquillas aspersoras suministradas deben proporcionar aspersion uniforme sobre la totalidad del empaque, sin provocar canalizaciones ni daños al relleno o soportes de éste.
- Deben estar dotadas con un rompedor de gotas que propicie la formación de una cortina de agua y evitar con esto daño mecánico al relleno.
- Las boquillas aspersoras deben ser de gran orificio, de baja presión, tipo aspersor y no debe tener piezas movibles que puedan obstaculizar el flujo.
- El material debe ser concreto armado. El cemento utilizado debe ser Portland puzolámico CPP de resistencia elevada a los sulfatos de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-C414-ONNCCE última edición, con una resistencia a la compresión 250 kg/cm<sup>2</sup> ASTM C-31 y C-192, y revenimiento de acuerdo a la norma ASTM C-143 última edición.

En las torres de enfriamiento, la calidad de agua que se recircula por el sistema impacta en la especificación de los rellenos, por tanto cuando se opera la torre con una buena calidad de agua se ocupa relleno de tipo película, el cual favorece a la transferencia térmica en comparación con los rellenos tipo salpiqueo, utilizados cuando el agua es de baja calidad.

Cabe mencionar que el agua que se pierde en la torre de enfriamiento por el efecto de la evaporación, se realiza en estado de vapor puro, dejando atrás mayor concentración de sólidos disueltos totales en la masa de recirculación de agua restante. Sin un control adecuado, el nivel de los sólidos disueltos totales en el agua de recirculación aumentará, afectando no sólo a los elementos de la torre de enfriamiento, sino también a los intercambiadores de calor y al sistema de distribución de agua.

Considerando una definición común, las purgas de las torres de enfriamiento que se extraen actualmente del fondo del bacín de las torres, se denominan “purgas de fondo”. Sin embargo, estas purgas resultan ser en su mayoría lodos que no pueden reintegrarse al bacín como agua de repuesto después de su tratamiento.



Las purgas se derraman directamente al drenaje pluvial y pueden ser aprovechadas para reincorporarse a las torres de enfriamiento como agua de repuesto después de ser tratadas

De tal modo que una vez que se tienen las especificaciones mínimas de cada componente que va ser rehabilitado en la torre DE-500 se realiza la propuesta de ahorro de agua de pretratamiento y agua de enfriamiento (Figura 23) donde se muestran el estado de operación actual de la torre y las condiciones a las que llegaría a estar con la rehabilitación, se contabiliza los ahorros de agua en el balance de materia y los beneficios monetarios de cada componente en el diagrama.

Respecto a los químicos utilizados en la torre, se reporta el ácido sulfúrico, biocida oxidante, sosa caustica y tratamiento integral. El tratamiento químico del agua para torres de enfriamiento, tiene la finalidad de controlar las afectaciones en las líneas y equipos de intercambio de calor por fenómenos de corrosión, incrustación y ensuciamiento.

Para conseguir lo anterior se emplean inhibidores de corrosión, dispersantes y biocidas entre otros, dosificados según análisis del agua y evaluación de testigos y probetas corrosimétricas instalados en el sistema de enfriamiento.

Estos parámetros fueron considerados de acuerdo a estadísticos proporcionados por PEMEX de enero del 2007 a marzo del 2010.

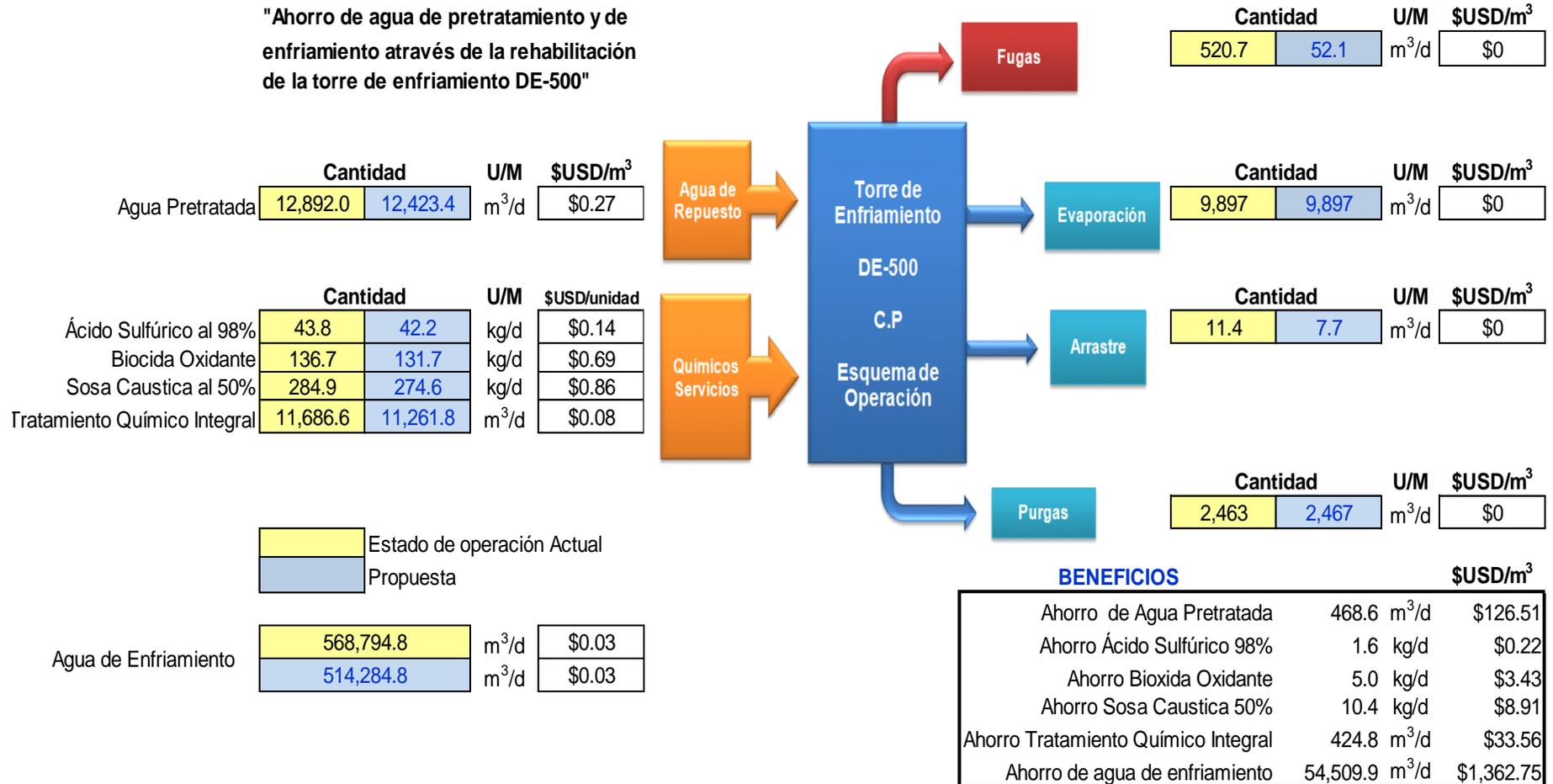
De acuerdo a estos estadísticos se realizó un promedio, para calcular el porcentaje del flujo total de agua de repuesto correspondiente de cada químico suministrado a la torre.

Para el ácido sulfúrico es el 0.34%, el biocida oxidante es 1.06%, la sosa caustica es 2.21% y para el tratamiento integral le corresponde el 90.65%.

Para variables de del balance se siguió el mismo procedimiento que se muestra en el (apartado 6.2) excepto el arrastre; que con el nuevo eliminador le corresponde el 0.0015% de pérdidas por arrastre.



El ahorro de agua de enfriamiento que se tendrá en la propuesta es el noventa por ciento de las fugas con la rehabilitación de las torres como se muestra a continuación (Figura 23).



**Figura 23.** Diagrama de flujo para la propuesta de rehabilitación de la torre DE-500



# RESULTADOS



## 7 RESULTADOS

La evaluación de la operación de la torre para la propuesta, se puede llevar a cabo con las recomendaciones citadas en el código CTI ATC-105 de Cooling Technology Institute. Mediante la variación de la temperatura en función del cambio de empaques en la torre, se determina la capacidad de enfriamiento de la torre y el volumen total de los distintos empaques que se tiene como opción, y como se ven reflejados los beneficios a partir del ahorro de agua de enfriamiento.

En la Figura 24 se muestra balance de materia de la torre DE-500 de las condiciones actuales y de la propuesta de mejora del funcionamiento de la torre que se realiza.

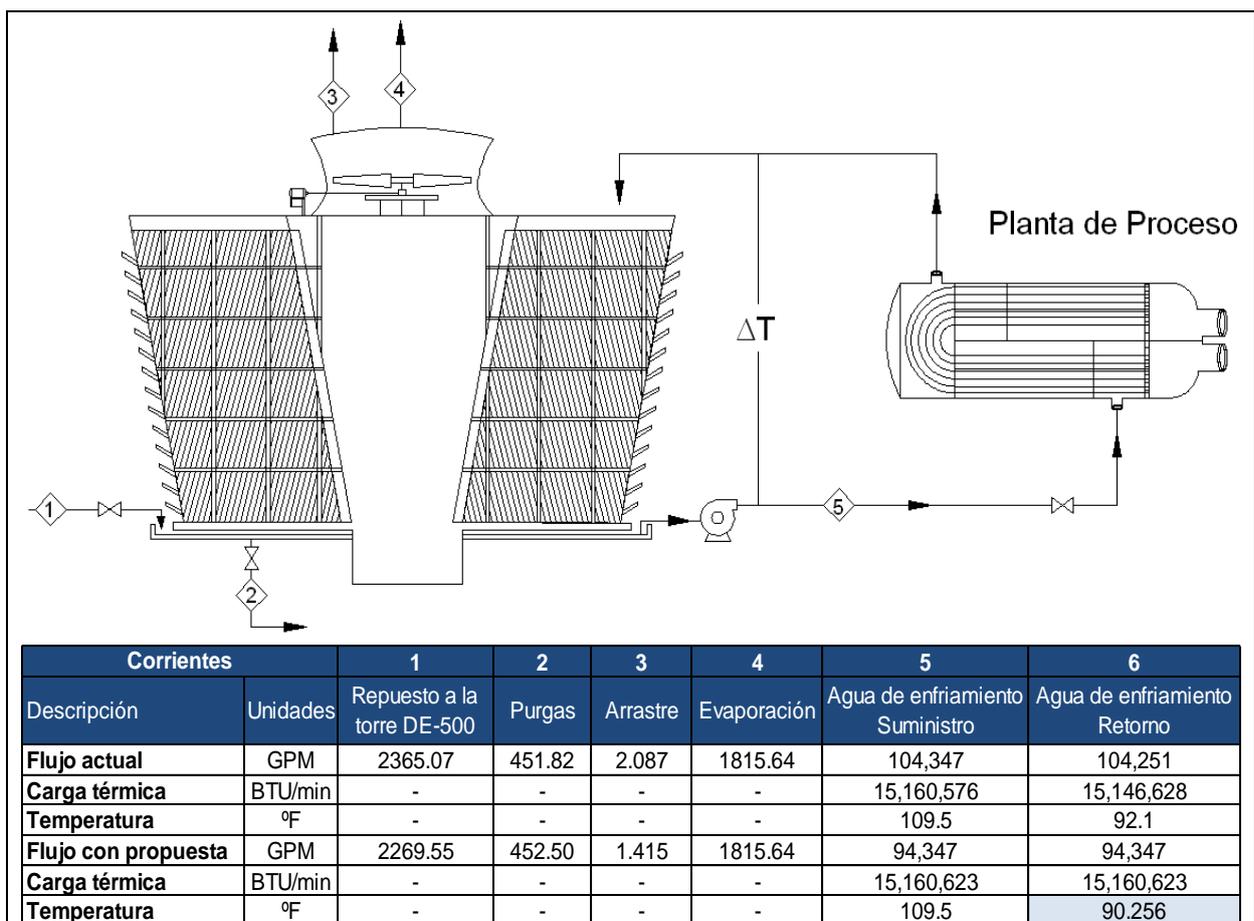


Figura 24. Balance de materia en condiciones actuales y de la propuesta.



### Resumen Ejecutivo.

El principio teórico de la evaluación para la rehabilitación de la torre de enfriamiento está basado en un balance térmico derivado de la ecuación general de calor (primera ley de la termodinámica)

$$Q = m \text{ cp } \Delta T$$
$$Q_{\text{Entrada}} = Q_{\text{Salida}}$$

En torres de enfriamiento la diferencia de temperatura está en función del diseño de una torre y principalmente de la configuración y tipo de empaques que la componen. Para suministrar agua fría a la planta de proceso se debe disipar el calor del agua de retorno con la transferencia de calor entre el agua y el aire, y así aumentar la eficiencia de la torre.

Para este caso de estudio este aumento se genera a partir de la disminución de 1.85 °F la temperatura de salida de la torre que se traduce a la cantidad necesaria para disipar en la carga térmica de los 10000 GPM.

Las implicaciones de esta reducción son:

- Reducción de la aproximación (TAC-TAF)
- Reducción en el rango (TAF-TBH)
- Aumento de la cantidad de empaque, caídas de presión y costos por disminuir el rango. (Lo anterior se analiza en el apartado 6.6 cálculo de la altura del empaque)

Entonces si queremos reducir el flujo ( $m$ ) ↓ 10000 GPM se debe disminuir el ( $\Delta T$ ) ↑ 1.85 °F para que se cumpla:

$$\Delta T = 1.85 \text{ °F} \quad \longleftrightarrow \quad m = 10000 \text{ GPM}$$
$$Q_D = m \text{ cp } \Delta T$$



Esta reducción en la temperatura provoca un aumento en la cantidad de empaque (para la evaluación de la cantidad de empaque y dimensiones se realizó una simulación en el CTI Toolkit apartado 6.7) de un rango de 50 a 60% dependiendo del tipo de empaque. Esto genera mayores caídas de presión y por consiguiente mayor consumo de energía eléctrica de los ventiladores.

Este problema se minimiza al elegir un determinado tipo de empaque que permite pasar eficientemente el flujo de aire. Los problemas que se generan de los costos por la cantidad de empaque y la rehabilitación de los componentes restantes de la torre son retribuidos por los beneficios que implican dicha rehabilitación, estos beneficios se mencionan a continuación:

- Reducción de operación de una celda (Menor consumo de energía de los ventiladores)
- Oportunidad de dar mantenimiento preventivo a distintas celdas sin dejar de operar el flujo total.
- Aumento en la capacidad de enfriamiento y mejora en la optimización de suministro a la planta de proceso.
- Ahorro de agua de repuesto.
- Al mantener esos 10,000 GPM en operación se ofrece la posibilidad de aumentar la capacidad de producción de la planta de proceso.



## 7.1 Capacidad de enfriamiento con las condiciones de la propuesta

La capacidad de enfriamiento de la propuesta realizada para la mejora del funcionamiento de la torre DE-500 únicamente varía la temperatura de agua fría a diferencia de las condiciones actuales.

En la Tabla 14 se muestra la capacidad de enfriamiento de la torre ya rehabilitada.

Tabla 14. Capacidad de enfriamiento de la torre DE-500

Torre DE-500	Flujo [GPM]	TAC [°F]	TAF [°F]	L/G	Capacidad de enfriamiento CTI (%)
<b>Propuesta de Rehabilitación</b>	104,347	109.5	90.256	1.2597	97.24

Como se observa la capacidad de enfriamiento de la torre a las nuevas condiciones de operación es mayor al 95% lo que significa que la torre opera a una capacidad de enfriamiento en buen estado.

## 7.2 Dimensiones del empaque necesario para alcanzar los requerimientos en la propuesta

Debido a que la temperatura del agua de enfriamiento disminuye, es necesario una mayor cantidad de empaque dentro de la torre, a continuación se realiza el análisis de la cantidad necesaria de empaque para alcanzar las condiciones óptimas de operación de la propuesta realizada para disponer de una celda (10,000 GPM) de agua de enfriamiento.

Para el caso de estudio y el caso propuesto la temperatura de agua caliente es la misma, así como las condiciones climáticas, lo único que varía es la temperatura de agua fría y por consiguiente la aproximación y el rango. Estos parámetros son necesarios para el uso del simulador para obtener las dimensiones del empaque usado.

En la Tabla 15 se muestra un resumen de lo mencionada con anterioridad.



Tabla 15. Condiciones de operación de la torre DE-500

Torre DE-500	Caso de estudio	Caso de propuesta
Aproximación	8.70	6.856
TBH	83.4	83.4
Rango	17.4	19.24
Presión Barométrica	29.811	29.811
L/G Operación	1.2546	1.2597

Con base en los datos de la Tabla 15 se realiza la simulación de los diferentes empaques (Turbo Splash, V-bar y Opti-bar) para obtener el volumen que ocupa cada uno a las condiciones de la propuesta deseada. La metodología de esta simulación se explica en el (Anexo 3) y los resultados arrojados son los siguientes:

Tabla 16. Dimensiones de cada empaque

Dimensiones del empaque Arreglo 8x8				
Torre DE-500		Empaque 1	Empaque 2	Empaque 3
Tipo		V-Bar	Opti-Bar	TURBO Splash
% de Mantenimiento		57%	38%	66%
Altura	(ft)	27.26	23.045	17.11
	(in)	327.12	276.54	205.26
Air travel	(ft)	17	17	17
	(in)	204	204	204
Volumen	(ft <sup>3</sup> )	29659	25073	18610
# Barras Verticales		41	35	26
# Barras Horizontales		26	25.5	25.5
# Barras totales		2085	1763	1309

Como se observa en la Tabla 16 el empaque con mayor cantidad de altura y de volumen es el V-bar, y el de menor cantidad es el Opti-bar. Con respecto al porcentaje de mantenimiento, es una medida de la dificultad de mantener limpio cada empaque. Las curvas de cada empaque a las condiciones deseadas se muestran en el (Anexo 4).



### 7.3 Componentes rehabilitados de la torre

Los componentes rehabilitados de la torre DE-500 son considerados a partir de la inspección física que fue realizada en el (Apartado 6.3), se tomó en cuenta el porcentaje de daños para cada componente en toda la torre, a continuación se muestra (Tabla 17) la cantidad por celda y total de los componentes usados en la torre, además de el porcentaje de daños basados en la inspección física.

Tabla 17. Daños en las partes principales de la torre DE-500.

Torre de enfriamiento DE-500			
Componente	Cantidad por unidad		Daños
	Por Celda	Total	% Total
Secciones	2	2	-
Estructura general	1	1	40
Sellos de las bombas	0.5	6	60
Eliminador de rocío	16	176	20
Boquillas	760	8360	50
Válvulas	2	22	30
Ventiladores	1	11	10
Reductor	1	11	10
Persianas	28	308	40
Chimeneas	1	1	20
Mallas del relleno	10	110	70
No de Barras V-Bar	4171	45879	60
No de Barras Opti-Bar	3526	38785	60
No de Barras TURBO Splash	2617	28788	60

El número de barras de los empaques se calculó tomando en cuenta la altura y ancho del empaque y se consideró un arreglo de 8" x 8". El porcentaje de los daños toma en cuenta las partes que requieren la sustitución de dichos componentes.

Se investigó las mejores tecnologías sin olvidar que es lo que más conviene en función del costo y su funcionamiento de cada componente. En la Tabla 18 se mencionan los proveedores consultados para cada componente, su diseño y el costo unitario.



Tabla 18. Propuestas de remplazo de los componentes de la Torre DE-500

Componente	Proveedor	Diseño	Costo unitario USD\$
Estructura general (Paredes, columnas, traves, piso y forro)	-		14500
Sellos de Bombas	-		66315.1
Eliminador de rocío	Bretwood		32.16
Boquillas (paquete de 25)	CEShepherd		6.2432
Válvulas de 16"	Marley		4294
Ventiladores de 28'	Hudson Tuf-Life III		13230
Reductor	Marley		27316
Persianas de fibra de vidrio corrugado	-		70.05
Chimeneas H=18ft, D=20ft	-		16868.74



Componente	Proveedor	Diseño	Costo unitario USD\$
Barras de V-Bar	CEShepherd Cooling tower	(Apartado 4.2.1)	1.58
Barras de Opti-Bar	Tower Components	(Apartado 4.2.2)	2.39
Barras de TURBO Splash	Bretwood	(Apartado 4.2.3)	3.39

### 7.3.1 Estimado del costo de inversión de los componentes de la torre

Con base en los costos unitarios de cada componente y los daños de la torre DE-500 se realiza un estimado de inversión únicamente de las partes rehabilitadas que requieren el cambio o instalación de cada componente, esto no incluye los costos de mano de obra por la instalación ni los costos de operación en la torre. La Tabla 19 contiene los costos de cada componente.

Tabla 19. Estimado del costo de inversión de cada componente

Componente	Costo por unidad		% de daños	Estimado del costo de inversión (USD \$)
	Por celda	Total		
Estructura general	33158	364733	60	63800
Sellos de Bombas	514.56	5660	20	218840
Eliminador de rocío	4744.832	52193	50	1132
Boquillas	8588	94468	30	26097
Válvulas	13230	145530	10	28340
Ventiladores	27316	300476	10	14553
Reductor	1961	21575	40	30048
Persianas	16869	185556	20	8630
Chimeneas	2500.00	27500	70	37111
Mallas del soporte	6606.52	72672	60	19250
Barras de V-Bar	8433.92	92773	60	43603
Barras de Opti-Bar	8875.78	97634	60	55664
Barras de TURBO Splash	33158	364733	60	58580



El costo de inversión de la rehabilitación del relleno de la torre DE-500 y el costo de mantenimiento que tiene cada uno de los empaques se muestra en la Tabla 20.

Tabla 20. Estimado del costo de inversión de cada componente

Concepto	V-Bar	Opti-Bar	TURBO-Splash
Número de barras de empaque totales	45,879	38,785	28,788
Mantenimiento (USD\$)	24,853.7	21,152.3	38,662.9
Inversión Total (USD\$)	491,404	503,465	506,381

#### 7.4 Evaluación y selección de la tecnología de los empaques para el incremento de la capacidad de enfriamiento

Se tomaron tres alternativas tecnológicas de los empaques, los cuales son capaces de disminuir la temperatura del agua de enfriamiento que se suministra la planta de proceso, a fin de obtener una celda disponible y que cumpla con la carga disipada:

1. V-bar.
2. Opti-bar.
3. Turbo Splash.

En la Tabla 21 se presentan los tecnólogos consultados para el empaque de la torre.

Tabla 21. Tecnólogos consultados

Empaque tipo salpiqueo	Tecnólogo
V-bar	C.E.Shepherd
Opti-bar	Tower Components
Turbo Splash	Brentwood

Los criterios y porcentajes considerados para la evaluación tecnológica son los siguientes:

1. Eficiencia térmica (35%): Como la parte más importante de la torre debe garantizar el intercambio eficiente de masa y calor entre el agua y el



- aire, distribuyendo el líquido sobre una gran área de superficie para aumentar la capacidad de enfriamiento.
2. Disponibilidad de la tecnología (10%): Fácil adquisición del componente, después de ciertos periodos de operación continúa.
  3. Infraestructura (15%): Debe mantener por tiempo prolongado el líquido para contribuir a la operación eficiente de la torre de enfriamiento, versatilidad de acoplarse al espacio disponible y ser flexible a cambios futuros, minimizar las caídas de presión por la forma y acomodo dentro de la torre.
  4. Costo (25%): El costo del empaque debe ser de preferencia bajo en función de las funciones que pueda realizar.
  5. Durabilidad del componente (15%): Evaluar la durabilidad del componente en función del espaciamiento y material del cual están fabricados. Verificando la adaptación de la tecnología a la calidad de agua. El material debe ser de la calidad requerida para resistir los efectos de la intemperie y el uso de los reactivos químicos manejados durante la operación.

Las características principales, de cada tecnología, se presentan a continuación (Tabla 22). Más adelante, se presenta el resultado de la evaluación tecnológica de acuerdo a los criterios anteriores.

Tabla 22. Características de cada tecnología de empaques.

Características principales	V-bar	Opti-bar.	TURBO Splash.
Capacidad de enfriamiento	La capacidad de enfriamiento se ve limitada debido a que la distribución de agua no es la adecuada.	Aumento de la capacidad de enfriamiento hasta un 30 % más con respecto a los demás modelos en el mercado.	El más alto rendimiento térmico en rellenos de salpicadura en contraflujo.
Distribución	Su distribución dentro de la torre fomenta la caída de agua en forma de cascadas, por el efecto canal que se	Realiza el fraccionamiento del agua en forma de salpiqueo mediante la formación de	Los TurboSplash PAC se pueden configurar con diversos espaciamientos y ángulos, para



Características principales	V-bar	Opti-bar.	TURBO Splash.
	crea en los extremos del relleno.	gotas.	optimizar el rendimiento.
Caídas de presión	Las caídas de presión son altas y dependen del modelo.	Las caídas de presión se minimizan.	Las caídas de presión aumentan..
Temperatura	Resiste cambios de temperatura.	Resistente a cambios de temperatura.	Clasificación de alta temperatura para funcionamiento continuo a 82,2 °C y un máximo de 24 horas a 90,6 °C.
Resistencia	Poco resistente y con una resistencia al punto de fractura baja.	Duración prolongada y alta resistencia al punto de fractura.	Construido con copolímero de polipropileno durable, resistente a álcalis, ácidos y aceites.
Ensuciamiento	Alta acumulación de suciedad, por lo tanto es susceptible a taponamientos y requiere de limpieza frecuente.	Baja acumulación de suciedad, por lo tanto la limpieza de este es casi nula.	Su diseño abierto ofrece máxima resistencia al ensuciamiento, pero su diseño mantiene la suciedad.

De acuerdo con los porcentajes de los criterios de evaluación establecidos se toma como escala de calificación la escala de la siguiente Tabla 23.

Tabla 23. Escala de calificación de premisas

DESCRIPCIÓN	CALIFICACIÓN
Calificación mínima (pobre en esta premisa)	1
Calificación media (premisa promedio)	3
Calificación máxima (excelente en esta premisa)	5

En la Tabla 24 se realiza la comparación y la selección de la tecnología propuesta para rellenos del tipo salpiqueo en base a los parámetros seleccionados (eficiencia térmica, disponibilidad de la tecnología, requerimientos mínimos para operar, infraestructura y durabilidad del componente).



Tabla 24. Resultados de la evaluación tecnológica para Empaques tipo salpiqueo.

PARÁMETRO	V-Bar	Opti-Bar.	TURBO Splash.
Eficiencia térmica	1	5	5
Disponibilidad de la tecnología	5	5	1
Infraestructura	3	5	1
Costo	5	3	1
Durabilidad del componente	1	5	5

En base a la información expuesta y a la comparación de parámetros evaluados para las 3 tecnologías, se realiza la selección del empaque para las torres de enfriamiento, en la Tabla 25 se muestran los resultados.

Tabla 25. Selección de la tecnología para Empaques del tipo salpiqueo en torres de enfriamiento.

PARÁMETRO	PONDERACIÓN DE LOS CRITERIOS DE EVALUACIÓN	V-Bar	Opti-Bar.	TURBO Splash.
Eficiencia térmica	35%	7	35	35
Disponibilidad de la tecnología	10%	10	10	2
Infraestructura	15%	9	15	3
Costo	25%	25	15	5
Durabilidad del componente	15%	3	15	15
TOTAL	100 %	54 %	90 %	60%

Como se puede observar en la tabla anterior con base en los criterios establecidos para la evaluación de los diferentes empaques que pueden ser usados en la propuesta para la rehabilitación de la torre DE-500, el mejor empaque según los resultados es el relleno Opti-bar con un porcentaje del 90%.

De tal forma que el empaque que se va usar es el relleno Opti-bar ya que reúne las ventajas que ayudan a maximizar los beneficios obtenidos al usar dicho empaque considerando aspectos técnicos y económicos.



## **7.5 Costos de Inversiones**

### **7.5.1 Costos de mano de obra civil**

El costo de mano de obra es medido por metro cuadrado o unidad reparada (tiempo, jornada y rendimiento) y los trabajadores involucrados obreros, especialistas y personal de maquinaria. En este trabajo se emplearon como referencia tablas salariales con valores promedios nacionales. (Bimsa Reports 2010).

Evaluando estadísticos de obra civiles se consideró el 75% del costo de la reparación y rehabilitación de los componentes de la torre.

### **7.5.2 Costo de materiales de instalación**

**MAQUINARIA Y MEDIOS AUXILIARES:** En este valor se considera, tanto el alquiler, como el consumo energético o de combustible para la maquinaria. Los medios auxiliares se valoran por la utilización de los mismos según la función a que están dedicados para la realización de la partida de obra en que intervienen y que son necesarios para su realización.

**PRODUCTOS Y MATERIALES:** Se utilizan los precios de venta al público de las tarifas de los fabricantes y se considera los descuentos por el volumen de la adquisición, forma de pago, etc.

### **7.5.3 Mantenimiento Preventivo**

Actividad relacionada con la conservación de la infraestructura, maquinaria y equipo, que permite un mejor desempeño de operación del bien y reducción del nivel de riesgo de fallos y/o daños humanos y materiales.

Esta actividad es efectuada por técnicos especializados que tiene por objetivo, prevenir el desgaste de piezas vitales de funciones críticas en el proceso de



trabajo. Utiliza materiales auxiliares de limpieza y lubricación, repuestos menores y herramienta para montaje y desmontaje de partes.

Se considera el 52% de costo de cada equipo, es importante mencionar que los costos de mantenimiento de los empaques varían debido a la facilidad de limpieza que tiene cada uno por su material de fabricación y el diseño.

#### 7.5.4 Inversión Total

La inversión total del proyecto de rehabilitación de la torre consideró los aspectos mencionados con anterioridad y se realizó un programa de inversión que se efectúa en 3 años desde que comienza el proyecto, en el primer año la inversión es del 30% del total y el segundo es del 40% del total y por último el 30% restante para el tercer año. En la Tabla 26 se muestra el programa de inversiones efectuados hasta el 2012.

Tabla 26. Programa de Inversión Total

2010	2011	2012	Inversión de Propuesta USD\$
\$392,702.45	\$523,603.26	\$392,702.45	\$1,309,008.16

En el Anexo 5 se muestra un resumen de los costos mencionados anteriormente y la inversión total del proyecto de rehabilitación de la torre DE-500.

## 7.6 Consideraciones financieras

Las variables consideradas para realizar el análisis financiero de este trabajo son:

- El Horizonte del proyecto es de 20 años
- La Paridad Peso/Dólar se tomará de acuerdo al valor de referencia que utilice la Secretaria de Hacienda y Crédito Público (SHCP) para estimar los ingresos del 2010; El Valor es igual a \$13.80.
- Tasa de Descuento: Se considera del 12% de acuerdo a la estimación por SHCP.



- Se consideran 20 Años para el cálculo de la depreciación, de forma lineal.

Respecto a **los costos variables totales** de producción se considero:

- Las materias primas: igual al costo de las materias primas utilizadas en el proceso.
- Las sustancias químicas: Igual al costo de las sustancias químicas utilizadas en el proceso.
- Los Servicios Auxiliares: Igual al costo de los servicios auxiliares (vapor, energía eléctrica, combustibles, catalizadores, resinas de intercambio, membranas, por mencionar algunos).

Acerca de los costos fijos de operación se considera los costos fijos directos y costos fijos indirectos.

Para los **costos fijos directos** se tiene:

- Costos de Operación (Mano de obra directa): Igual al costo de la mano de obra necesaria para la operación de la planta, incluyendo los tres turnos (sólo si se contrata personal nuevo)
- Supervisión Técnica: No se tomará en cuenta
- Costos de Mantenimiento (Material y mano de obra): Igual a  $0.03 \cdot \text{ISBL}$  donde ISBL es la inversión dentro de límites de batería (de la planta de proceso).

En el caso de los **costos fijos indirectos**, se consideró únicamente la depreciación, la cual se calculó de manera lineal para todo el horizonte de evaluación (20 años) a partir del inicio de operaciones de las propuestas de mantenimiento, rehabilitación, instalación de los sistemas de tratamiento de purgas y la sustitución de la torre de enfriamiento.



Referente a los gastos fijos se considera el costo total en efectivo de producción que es igual a la suma de costos fijos, variables y costos de operación; De los costos fijos, sólo considerar los directos (Infante, 1988)

## 7.7 Beneficios ahorros e impactos

Los beneficios que se observan en la Tabla 27 representan los ingresos de la propuesta planteada en la torre de enfriamiento DE-500. Tomando en cuenta las condiciones de operación actual de las torres en el complejo petroquímico.

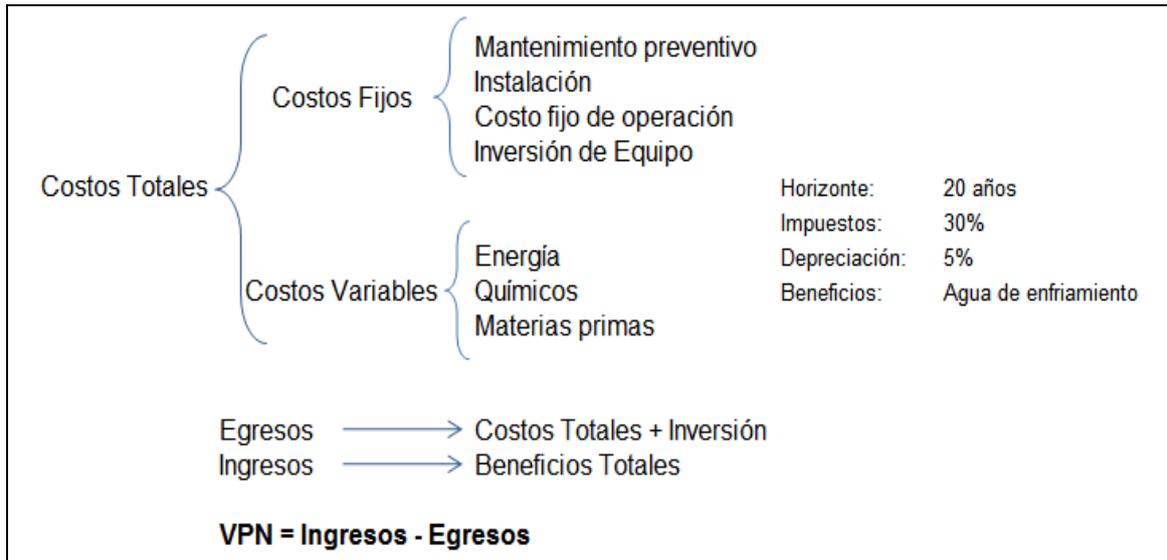
Tabla 27. Ahorro y beneficio de la propuesta para la torre de enfriamiento.

AHORROS	FLUJO (m <sup>3</sup> /d)	COSTO UNITARIO (USD/m <sup>3</sup> )	BENEFICIO (USD/a)
Producción de agua de enfriamiento.	54,509.93	0.026	497,403.11

El beneficio respecto a la producción del agua de enfriamiento se cuantificó considerando la disminución de la temperatura del agua de suministro a la planta realizada en la propuesta, debido a que la capacidad de disipación que alcanza la torre es mayor a la de los requerimientos de la planta, el flujo de agua de enfriamiento a la planta es menor y por lo tanto se obtienen los beneficios de ahorro del agua de enfriamiento.

## 7.8 Evaluación financiera

Con la finalidad de conocer la rentabilidad de la propuesta de rehabilitación de la torre de enfriamiento, en la Tabla 28 se presenta el balance de las pérdidas y ganancias que consideran un horizonte de 20 años y tres años sin operación de la planta, A partir de ese tiempo se consideran los beneficios totales. La metodología usada para la evaluación financiera se muestra en la Figura 25 donde los costos totales son iguales a los costos fijos más los costos variables.



**Figura 25. Análisis Financiero**

En el Tabla 29 se muestra la metodología de cálculo utilizada para determinar los precios, inversiones y costos desglosados, la cual sigue los conceptos antes descritos en la Figura 25.



Tabla 28. Pérdidas y ganancias

BALANCE DE PÉRDIDAS Y GANANCIAS (\$USD)	2010	2011	2012	2013	2014	2027	2029	2030	2032
Ingreso Total Anual	-	-	-	497,403	497,403	497,403	497,403	497,403	497,403
Costo Total en Efectivo de Operación	-	-	-	68,536	68,536	68,536	68,536	68,536	68,536
Costo Total de Operación	-	-	-	81,236	81,236	81,236	81,236	81,236	81,236
Utilidades antes de Impuestos	-	-	-	416,167	416,167	416,167	416,167	416,167	416,167
Impuestos 30%	-	-	-	124,850	124,850	124,850	124,850	124,850	124,850
Utilidades después de Impuestos	-	-	-	291,317	291,317	291,317	291,317	291,317	291,317
Inversiones Totales y Capital de Trabajo	392,702	523,603	392,702	-	-	-	-	-	-
Depreciación	-	-	-	12,700	12,700	12,700	12,700	12,700	12,700
<b>FLUJO DE EFECTIVO DESPUÉS DE IMPUESTOS</b>	<b>(392,702)</b>	<b>(523,603)</b>	<b>(392,702)</b>	304,017	304,017	304,017	304,017	304,017	304,017
<b>FLUJO DE EFECTIVO ANTES DE IMPUESTOS</b>	<b>(392,702)</b>	<b>(523,603)</b>	<b>(392,702)</b>	428,868	428,868	428,868	428,868	428,868	428,868

Los flujos de efectivo son usados para el cálculo de del valor presente neto (VPN) que a continuación se presentan en los indicadores de rentabilidad.



Tabla 29. Precios inversiones y Costos

				Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2019	2030	2032	
				% Operación	0%	0%	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
				Horizonte de evaluación	-2	-1	0	1	2	3	14	15	17	18	20	
<b>COSTOS VARIABLES DE OPERACIÓN</b>				<b>BASE DIARIA</b>		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2019	2030	2032
<b>INGRESOS</b>		<b>PRECIOS UNITARIOS</b>	<b>PROPUESTA</b>	<b>CONSUMO</b>												
Agua Pretratada	0.27	\$USD/ m <sup>3</sup>	0	0	m <sup>3</sup> /a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Producción de Agua de Enfriamiento	0.025	\$USD/ m <sup>3</sup>	54,509.93	19,896,124.5	m <sup>3</sup> /a	497,403.11	497,403.11	497,403.11	497,403.11	497,403.11	497,403.11	497,403.11	497,403.11	497,403.11	497,403.11	497,403.11
<b>TOTAL INGRESOS ANUAL (\$USD)</b>						<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>497,403.11</b>							
<b>MATERIA PRIMAS</b>				<b>CONSUMO</b>												
Agua Pretratada	0.27	\$USD/ m <sup>3</sup>	468.57	171,028.87	m <sup>3</sup> /a	46,177.80	46,177.80	46,177.80	46,177.80	46,177.80	46,177.80	46,177.80	46,177.80	46,177.80	46,177.80	46,177.80
Ahorro de Bixida Oxidante	0.69	\$USD / kg	1.59	581.50	kg /a	401.23	401.23	401.23	401.23	401.23	401.23	401.23	401.23	401.23	401.23	401.23
Ahorro de Sosa Caustica	0.86	\$USD / kg	4.97	1,812.91	kg /a	1,559.10	1,559.10	1,559.10	1,559.10	1,559.10	1,559.10	1,559.10	1,559.10	1,559.10	1,559.10	1,559.10
Ahorro de Ácido Sulfúrico	0.14	\$USD / kg	10.36	3,779.74	kg /a	529.16	529.16	529.16	529.16	529.16	529.16	529.16	529.16	529.16	529.16	529.16
Ahorro en el tratamiento químico integral	0.079	\$USD/ m <sup>3</sup>	424.76	155,037.67	m <sup>3</sup> /a	12,247.98	12,247.98	12,247.98	12,247.98	12,247.98	12,247.98	12,247.98	12,247.98	12,247.98	12,247.98	12,247.98
<b>TOTAL MATERIAS PRIMAS (\$USD)</b>						<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>60,915.27</b>							
<b>QUÍMICOS, REACTIVOS Y CATALIZADORES</b>				<b>CONSUMO</b>												
Dióxido de magnesio	0.58	\$USD / kg	0	0	kg /a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carbonato de calcio	0.18	\$USD / kg	0	0	kg /a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sulfato ferroso	2.17	\$USD / kg	0	0	kg /a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Polímero catiónico	2.54	\$USD / kg	0	0	kg /a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>TOTAL COSTOS QUÍMICOS Y REACTIVOS (\$USD)</b>						<b>0</b>										
<b>SERVICIOS AUXILIARES, ENERGÍA ELÉCTRICA Y COMBUSTIBLES</b>				<b>CONSUMO</b>												
Energía Eléctrica	0.08	\$USD/kWh	0	0	kWh/ a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>TOTAL COSTOS SERVICIOS AUXILIARES, ENERGÍA ELÉCTRICA Y COMBUSTIBLES (\$USD)</b>						<b>0</b>										
<b>COSTOS FIJOS DE LA PLANTA (ANUALES)</b>						2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2019	2030	2032
<b>COSTOS FIJOS DIRECTOS</b>			<b>PROPUESTA</b>	<b>TOTALES</b>												
Mantenimiento preventivo	3%		254,008.69	254,008.69	\$USD	7,620.26	7,620.26	7,620.26	7,620.26	7,620.26	7,620.26	7,620.26	7,620.26	7,620.26	7,620.26	7,620.26
Mano de Obra de Operación	Plantilla nueva		0	0	\$USD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gastos de Laboratorio	5%		0	0	\$USD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>TOTAL COSTOS FIJOS DIRECTOS (\$USD)</b>						<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>7,620.26</b>							
<b>COSTOS FIJOS INDIRECTOS</b>			<b>PROPUESTA</b>	<b>TOTALES</b>												
Gastos de Administración	No se considera		0	0	\$USD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Seguros	No se considera		0	0	\$USD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Depreciación	Lineal a 20 años		254,008.69	254,008.69	\$USD	12,700.43	12,700.43	12,700.43	12,700.43	12,700.43	12,700.43	12,700.43	12,700.43	12,700.43	12,700.43	12,700.43
<b>JOS INDIRECTOS TOTALES s/DEPRECIACIÓN o COSTO TOTAL EN EFECTIVO DE PRODUCCIÓN</b>						<b>0</b>										
<b>INVERSIONES, REINVERSIONES Y CAPITAL DE TRABAJO</b>						2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2019	2030	2032
			<b>PROPUESTA</b>	<b>TOTALES</b>												
Inversiones del Proyecto			1,309,008.16	1,309,008.16	\$USD	392,702.45	523,603.26	392,702.45	0	0	0	0	0	0	0	0
Capital de Trabajo			0	0	\$USD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>TOTAL DE INVERSIONES DEL PROYECTO (\$USD)</b>						<b>392,702.45</b>	<b>523,603.26</b>	<b>392,702.45</b>	<b>0</b>							



## 7.9 Indicadores de rentabilidad

En la Tabla 30 se muestran los indicadores financieros de la rehabilitación de la torre DE-500.

Tabla 30. Indicadores financieros de Rentabilidad

Indicador Financiero	Rehabilitación de la torre DE-500
Valor Presente de la Inversión (USD)	1,173,265
Inversión Total (USD)	1,309,008.2
Tasa de descuento	12%
Valor Presente Neto (USD)	637,035.28
Tasa Interna de Retorno (%)	19%
Índice de rentabilidad (VPN/VPI)	0.54
Recuperación (años de operación)	5

Se observa en la Tabla 30 que el valor presente neto es positivo, el índice de rentabilidad mayor a 0.5 y el periodo de recuperación es de 5 años y la TIR mayor a la tasa de descuento. Se establece por lo tanto que la propuesta es rentable debido a que cumple los parámetros necesarios. La metodología de cálculo de los indicadores financieros se muestra en (Anexo 6).



# ANALISIS



## 8 ANALISIS DE RESULTADOS

Los resultados que arroja el simulador CTI en la torre DE-500 muestran que la capacidad de enfriamiento es del 93% para la propuesta realizada en el presente trabajo, donde se disminuyó la temperatura de agua fría de 92.1 a 90.256, y esto propicia un ahorro de agua y de energía dependiendo de los requerimientos e intereses necesarios.

Con la rehabilitación de la torre se logró disminuir 10000 GPM (una celda de operación) de agua de enfriamiento, que en consecuencia implica un ahorro de energía en los ventiladores y ahorro de agua de repuesto, aunque también existe la posibilidad de mantener esos 10,000 GPM en operación y ofrecer la posibilidad de aumentar la capacidad de producción de la planta de proceso.

En la Figura 26 se hace el análisis de la eficiencia que tienen los tres diferentes empaques que se compararon para cumplir con los requerimientos de la planta y se obtuvieran mayores beneficios. Se observa que técnicamente el empaque que opera bajo las condiciones deseadas y ocupa menor volumen es el TURBO Splash. El Opti-Bar es la opción con valores medios con respecto a los otros dos y por último el V-bar que requiere de mayor cantidad de empaque para alcanzar las condiciones de operación deseadas (línea roja).

El empaque TURBO-Splash muestra la mejor eficiencia debido a que se asemeja a los empaques de tipo película, lo que provoca que en torres de enfriamiento que manejan flujos de agua muy grandes la caída de presión sea muy grande, aumentando los costos de energía de los ventiladores y el ensuciamiento del empaque por la poca disponibilidad de mantenimiento, este empaque se recomienda usarse en torres no mayores de 12ft (3.65 m). Debido a esa razón fue descartado como la mejor opción, además de las desventajas ya descritas en el apartado 7.4.

Respecto al Opti-Bar alcanza un mejor enfriamiento con menor empaque (5ft por celda) comparado con el V-Bar como se demostró en la simulación y



comparado con diferentes tipos de empaques que se muestra en las curvas del Anexo 7.

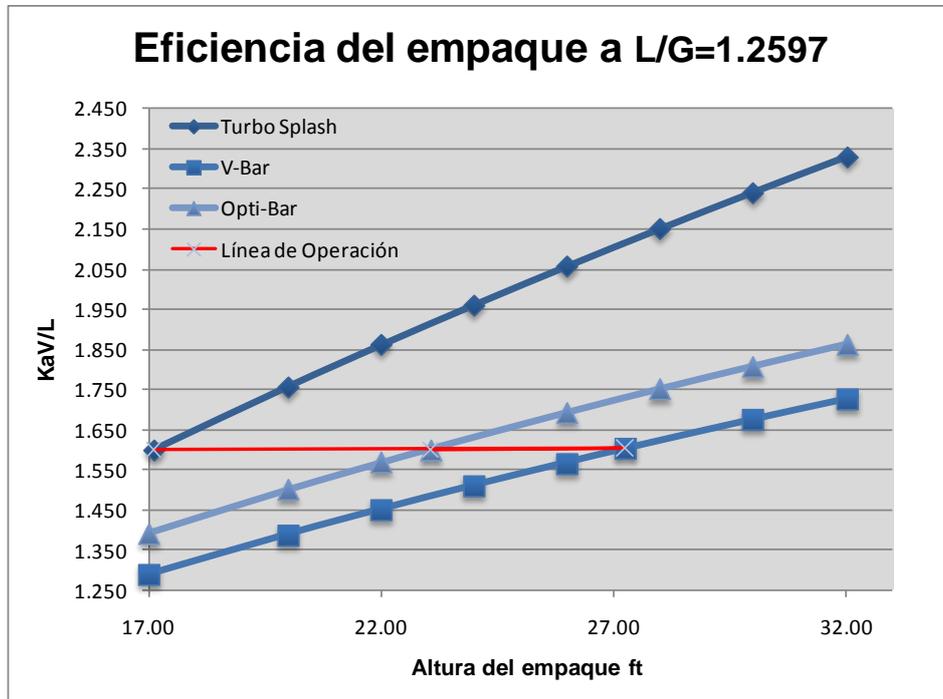


Figura 26. Eficiencia del empaque a las condiciones deseadas

Además de las desventajas antes mencionadas se realizó el análisis tomando en cuenta aspectos técnico y económicos para la elección del empaque que se instala para la propuesta de la rehabilitación de la torre DE-500, los resultados se muestran en la Figura 27.

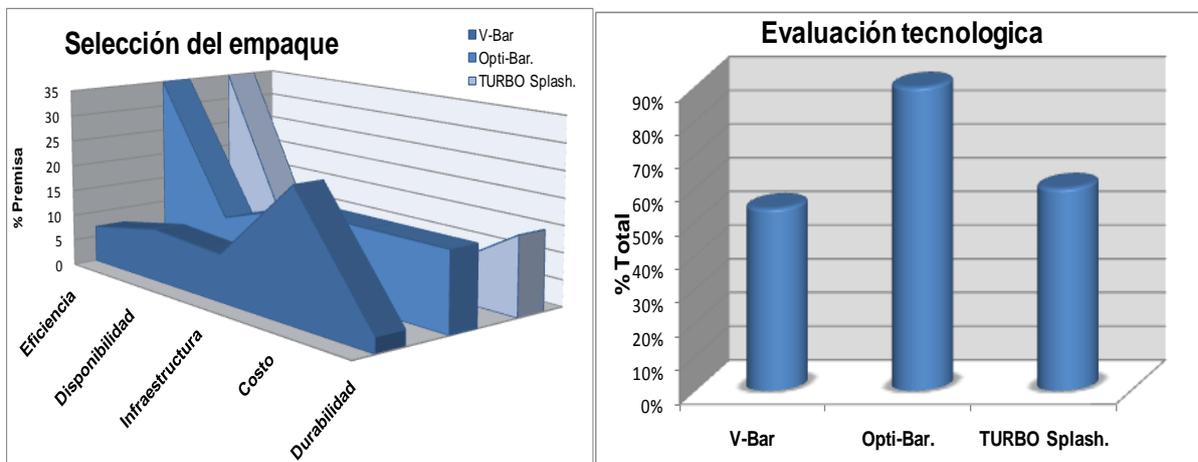


Figura 27. Elección del empaque con mayores beneficios.

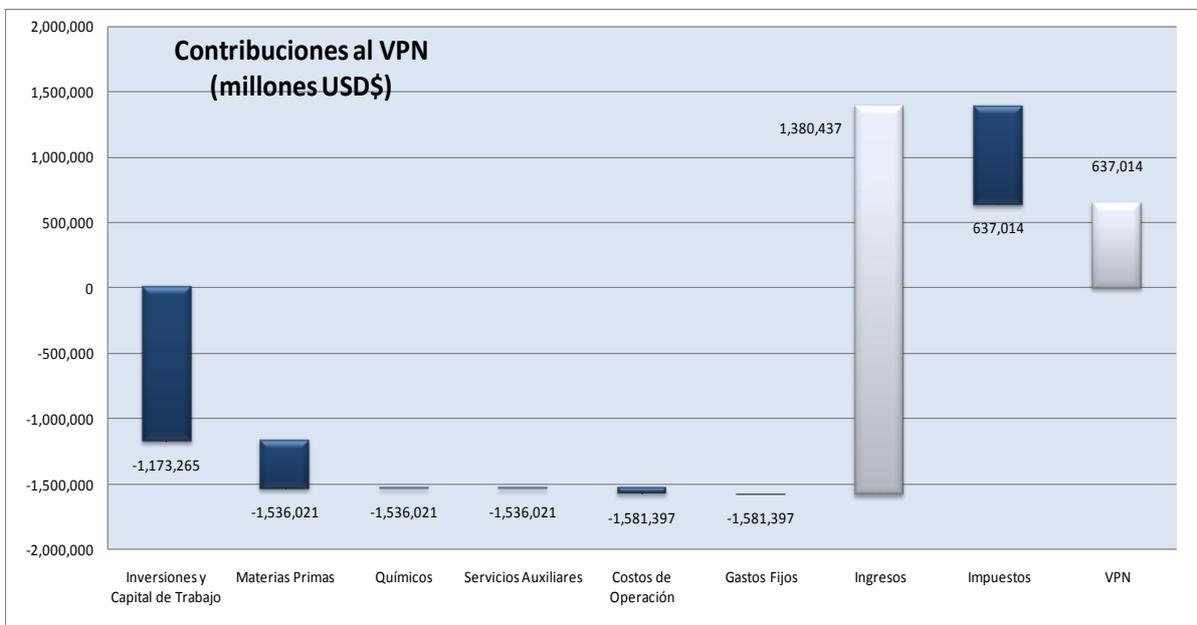


La primera grafica se observa el área que ocupa cada uno de los criterios ponderados de operación de los diferentes empaques, debido a que el Opti-bar es el que más área ocupa, es el óptimo, por lo cual es el empaque usado para la rehabilitación de la torre de enfriamiento

La segunda grafica muestra el porcentaje total evaluando las cinco criterios y es el total de los porcentajes mostrado en la primera figura.

Con respecto a los indicadores financieros, muestran que la propuesta de rehabilitación de los componentes de la torre usando el empaque Opti-Bar es factible debido a que la TIR de 19% es mayor a la tasa de interés de 12% y es rentable ya que el índice de rentabilidad es mayor a uno y el valor presente neto mayor a 0 (Infante 1988).

La recuperación de la inversión es de 5 años, en la Figura 28 se muestran las contribuciones la valor presente neto, donde realizando un balance de los benéficos menos los costos dan el valor presente neto del proyecto.



**Figura 28. Contribución al valor presente neto.**



## 9 CONCLUSIONES

El presente trabajo estuvo enfocado a presentar una propuesta de rehabilitación de los componentes internos y externos de una torre para la evaluación y mejora de la capacidad de enfriamiento de las torres de enfriamiento y la revisión de opciones tecnológicas sobre rellenos, lo cual en conjunto permitiera disminuir la temperatura de agua de enfriamiento suministrada a la planta de proceso y las condiciones de operación.

Existen diversas metodologías para la evaluación de los empaques de una torre de enfriamiento. Para cada caso en particular se debe de seleccionar el que más se adecúa con respecto a las condiciones de operación a las cuales se encuentra la torre de enfriamiento de estudio, y las condiciones deseadas para optimizar sus funciones. En este trabajo, se utilizaron metodologías de simulación de operación resultado de la experiencia de tecnólogos fabricantes de torres de enfriamiento y aprobadas por estudios realizados por Cooling Technology Institute (CTI).

En el presente trabajo se evaluó un caso de estudio de una torre de enfriamiento de un complejo petroquímico que por motivos de confidencialidad de la información fue designada como DE-500.

La rehabilitación para la torre de enfriamiento DE-500 consistió en el cambio de componentes internos y externos que se encuentran dañados así como el mantenimiento correctivo de las partes en mal estado que no requerían remplazo, lo anterior con el objetivo de disminuir la temperatura de agua de enfriamiento de 92.1°F a 90.256°F y por consiguiente ahorrar agua además de minimizar las pérdidas por arrastre, pérdidas de las purgas y eliminación de fugas.

Para disminuir 1.84°F (1°C) la temperatura de agua de enfriamiento respecto a las condiciones actuales el presente estudio, se centró en la adecuación del empaque y se determinó la cantidad necesaria de empaque para tres distintas



tecnologías de empaques, la simulación se efectuó bajo las mismas condiciones de operación de acuerdo a la propuesta para los tres empaques.

Esta disminución de temperatura representó un aumento en la disipación de calor en la planta de proceso, con un ahorro de agua de 10000 GPM, que es la capacidad que opera una celda en las torres normalizadas en México.

Este ahorro de 10000 GPM es el beneficio que se obtiene con la propuesta hecha en el presente trabajo, lo cual permitiría poner fuera de servicio una celda, con un consecuente ahorro de energía y la ganancia en flexibilidad de una celda para las operaciones de mantenimiento.

De acuerdo a los resultados de la simulación de tres distintos empaques se concluye que el empaque Opti-Bar es la mejor opción. Es el empaque que ofrece los mayores beneficios. Comparado con el TURBO Splash tiene la disponibilidad de operar en torres de enfriamiento con flujos muy altos que hizo que fuera descartado y comparado con el V-Bar se requiere 5ft menos por celda, tomando en cuenta que una celda para torres de flujo cruzado tiene dos secciones y cada sección una longitud y un ancho (Air Travel) que multiplicado con el número de celdas, esta diferencia de la cantidad de empaque es considerable, además de que el material es resistente a distintas calidades de agua. Por otra parte, el costo no es elevado y su disponibilidad en el mercado es amplia.

Para el caso de la propuesta de rehabilitación de la torre DE-500, la inversión total, tomando en cuenta el mantenimiento correctivo y el cambio de los componentes dañados a unos de reciente tecnología, representa una inversión aproximada de \$USD 1, 309,008 con un gasto de mantenimiento de \$USD 254,008 con un valor presente neto de \$USD 637,014 y una TIR 19%, el periodo de recuperación es de cinco años considerando los beneficios de la propuesta.

La rehabilitación permitiría un aumento del 86.23% a 97.24% de la capacidad térmica de la torre TE-500 con respecto al diseño original, además de un



ahorro de agua de 10000 GPM (54,509.9 m<sup>3</sup>/h) que representa un ingreso aproximado de 497,403 \$USD/año.

En términos generales se puede concluir, que aplicando la metodología usada en el presente trabajo a la propuesta de rehabilitación de torres de enfriamiento resulta factible y económicamente rentable además de obtener beneficios técnicos como la mejora de la capacidad térmica, además de beneficios ambientales en un ahorro de agua en la torre de enfriamiento DE-500.



## 10 BIBLIOGRAFÍA

1. Donald Q. Kern (1999) *“Procesos de transferencia de calor”* Compañía editorial continental S.A. Páginas 653-680.
2. Herbert W. Stanfotd III (2003) *“HVCA Water chillers and cooling towers”* Editorial. Marcel Dekker, Inc. Páginas. 129-137, 147-155.
3. Robert E. Treybal (1991) segunda edición, *“Operaciones de transferencia de masa”* Editorial Mc GRAW HILL.
4. Henley Ernest J. y Seader J. D. (2000). Editorial Reverté, S.A. *“Operaciones de separación por etapas de equilibrio en ingeniería química”*.
5. Hensley, J. (2009). *“Cooling Tower fundamentals”* segunda edición; Editorial SPX Cooling Technologies, Inc; USA
6. Cruz Mendiola, J. (2007). *“Guía para la evaluación técnica de torres de enfriamiento en operación”*, Facultad de Química. Tesis de licenciatura en Ingeniería Química.
7. Blanco Frantz (2007). *“Propuesta de ahorro de agua en torres de enfriamiento mediante la evaluación y mejora de la eficiencia térmica”* Facultad de Química. Tesis de licenciatura en Ingeniería Química.
8. Ibarra Carlos A. (2008). *“Diagnóstico y propuestas de mejora del funcionamiento de una torre de enfriamiento y de su red de distribución de agua en una refinería”* Facultad de Química. Tesis de licenciatura en Ingeniería Química.
9. Infante Villareal Arturo (1988). *“Evaluación financiera de proyectos de inversión”* Editorial Norma. Páginas 85-114, 136-147.



10. Lledó Pablo “*Comparación entre distintos Criterios de decisión (VAN, TIR y PRI)*”. Producido por (Mas Consulting) ([www.masconsulting.com.ar](http://www.masconsulting.com.ar))
11. Bimsa (2010) “Costos de Construcción - Obra y mantenimiento industrial” Publicación cuatrimestral de Bimsa Reports, S.A de C.V. 2ª actualización
12. Chemical and Technology (2003) “Cooling Tower Thermal Design Manual”. Manual de diseño de torres de enfriamiento.
13. “Cooling Tower Performance Curve”. Blue Book CTI cooling Tower y se encuentra en <http://www.cti.org>.
14. Robert Fulkerson, Fulkerson Enterprises (1999). “*A Comparison of Crossflow Cooling Tower Splash-Type Fills*” publicado en CTI.
15. Dr. Hamid Reza Goshayshi, Azad University (2009). “*A Novel Approach to Design Compact Mass Transfer Packing for Maximum Efficiency*” Publicado en CTI

### Referencias electrónicas

1. “Cooling Tower Operation” (2009) (GEA Heat Exchangers GEA Polacel Cooling Towers) publicado por empresa dedicada a la solución y fabricación de torres de enfriamiento y se encuentra en [http://www.gea-energytechnology.com/opencms/opencms//pcl/en/thermal\\_engineering/downloads](http://www.gea-energytechnology.com/opencms/opencms//pcl/en/thermal_engineering/downloads)
2. Star cooling towers (2009) “Selección del relleno”. Star cooling towers. Julio del 2009. Disponible en línea en .



<http://starcoolingtowers.com/NewsArticles/articleType/ArticleView/articleId/14/Getting-your-Fill/>

3. "Handbook of Industrial Water Treatment" Cooling water systems Capítulo 31 (Open Recirculating Cooling System) Actualizado de 1997-2010, publicado por General Electric Power and Water.  
<http://www.gewater.com/products/index.jsp>
4. "Cooling Tower Performance Basic Theory and Practice" publicado por SPX Cooling Technologies (consultada en Enero 2010) disponible en <http://spxcooling.com/en/library/detail/cooling-tower-performance-basic-theory-and-practice/>
1. SPX Cooling Technologies 2010, principal fabricante de torres de enfriamiento y sistemas de enfriamiento y se encuentra en <http://spxcooling.com/es/> (Consultada en Marzo 2010).
2. Brentwood Industries Cooling Towers Products 2010, empresa America especialista en sistemas de enfriamiento (proporcio las curvas características de los empaques) visitada en (Mayo del 2010) <http://www.brentwood-ind.com/cool/index.htm>
3. Comisión Nacional de Ahorro de Energía en México (CONAE), 2010 disponible en <http://www.conae.gob.mx> (consultada en Julio de 2010).
4. Ecodyne 2007-2009 empresa especialista en torres de enfriamiento que da servicios de ingeniería diseño y construcción <http://www.ecodynecoolingtowers.com/index.htm> (consultada diciembre 2009)
5. C.E.Sherpherd 2010, empresa especialista en torres de enfriamiento y elementos internos disponible en <http://www.ceshepherd.com/> (consultada en Abril 2009)



6. EvapTech 2010, empresa americana dedicada en la fabricación de internos de torres de enfriamiento (en línea) y se encuentra en <http://www.evaptech.com/index.php> (consultada en Junio del 2010)
7. YWCT Custom Cooling Tower 2010, empresa fundada en Israel dedicada a la fabricación y mantenimiento de torres de enfriamiento, está disponible en <http://www.customcoolingtowers.com/profile.asp> (consultada en Junio 2010)
8. Ingeniería y tecnología para la industria FIBER. Última actualización noviembre del 2009, empresa chilena fabricante de módulos de enfriamiento (en línea) y se encuentra en <http://www.fibertower.cl/torres.htm> (consultada en mayo de 2010)
9. Cooling Tower Depot 2010, sitio que proporciona estimados de los costos de cada componente interno y externo de las torres de enfriamiento disponible en <http://www.ctdepotinc.com/content/parts/cooling-tower-parts> (consultada en Junio 2010)



# ANEXOS



## 11 ANEXOS

### Anexo 1 Método de los cuatro puntos de Tchebycheff

La ecuación de transferencia de calor es integrada por el método de los cuatro puntos de Tchebycheff, que utiliza valores de “y” a valores predeterminados de “x” dentro del intervalo de “a” a “b” en la evaluación numérica de la integral  $\int_b^a y dx$ . La suma de esos valores de “y” multiplicados por una constante del intervalo (b-a) da el valor deseado de la integral. En estos cuatro puntos de los valores de “y”, son seleccionados para tomar valores de “x”, de 0.102673..., 0.406204..., 0.593796..., y 0.897327..., del intervalo (b-a). Para la determinación del  $\frac{KaV}{L}$ , el redondeo de estos valores a la decima es adecuada. La formula

aproximada obtenida es:

$$\int_a^b y dx = (b - a) \cdot \frac{(y_1 + y_2 + y_3 + y_4)}{4}$$

Donde

$$y_1 = \text{Valor de } y \text{ a } x = a + 0.1 \cdot (b - a) = CWT + 0.1 \cdot \text{Rango}$$

$$y_2 = \text{Valor de } y \text{ a } x = a + 0.4 \cdot (b - a) = CWT + 0.4 \cdot \text{Rango}$$

$$y_3 = \text{Valor de } y \text{ a } x = b - 0.4(b - a) \text{ o } x = a + 0.6(b - a) = CWT + 0.6 \cdot \text{Rango}$$

$$y_4 = \text{Valor de } y \text{ a } x = b - 0.1(b - a) \text{ o } x = a + 0.9(b - a) = CWT + 0.9 \cdot \text{Rango}$$

Para la evaluación de  $\frac{KaV}{L}$  se tiene:

$$\frac{KaV}{L} = Cw \int_{tw_1}^{tw_2} \frac{dtw}{hw - ha} = (tw_2 - tw_1) \cdot \frac{1}{4} \left[ \left( \frac{1}{\Delta h_1} \right) \cdot \left( \frac{1}{\Delta h_2} \right) \cdot \left( \frac{1}{\Delta h_3} \right) \cdot \left( \frac{1}{\Delta h_4} \right) \right]$$

Donde:

$$\Delta h_1 = \text{valor de } (hw - ha) \text{ a una temperatura de } CWT + 0.1 \cdot \text{Rango}$$

$$\Delta h_2 = \text{valor de } (hw - ha) \text{ a una temperatura de } CWT + 0.4 \cdot \text{Rango}$$

$$\Delta h_3 = \text{valor de } (hw - ha) \text{ a una temperatura de } CWT + 0.6 \cdot \text{Rango}$$

$$\Delta h_4 = \text{valor de } (hw - ha) \text{ a una temperatura de } CWT + 0.9 \cdot \text{Rango}$$

El método Tchebycheff fue seleccionado por ser de consistencia adecuada y de precisión sobre el volumen propuesto.



**Anexo 2 Datos generados a condiciones por el CTI**  
**Condiciones Actuales.**



**Tower Performance Report**  
 Torre DE-500  
 Owner: Facultad de Química UNAM  
 Project: Tesis  
 Location: Coatzacoalcos, Veracruz  
 Manufacturer: Morelos DE-36D-01  
 Tower Type: Induced Draft

**Cooling Tower Design and Test Data**

Parameters	Design	Test
Water Flow Rate	110000.0 gpm	104347.0 gpm
Hot Water Temp.	110.00 °F	109.50 °F
Cold Water Temp.	89.60 °F	92.10 °F
Wet Bulb Temp.	81.71 °F	83.40 °F
Dry Bulb Temp.	90.94 °F	90.75 °F
Fan Driver Power	125.00 bhp	125.00 bhp
Barometric Pressure	29.811 in. Hg.	29.811 in. Hg.
Liquid to Gas Ratio	1.330	1.255

**Cold Water Temperatures vs. Range**  
 At 83.40 °F Test Wet Bulb

Range	98112.8 gpm	108792.0 gpm	118471.2 gpm
14.07 °F	88.30 °F	89.30 °F	90.74 °F
18.41 °F	89.10 °F	90.28 °F	91.90 °F
35.28 °F	89.87 °F	91.20 °F	92.98 °F

**Cold Water Temperature vs. Water Flow**  
 At 83.40 °F Test Wet Bulb and 17.40 °F Test Range

98112.8 gpm	108792.0 gpm	118471.2 gpm
88.94 °F	90.08 °F	91.65 °F

**Exit Air Properties**

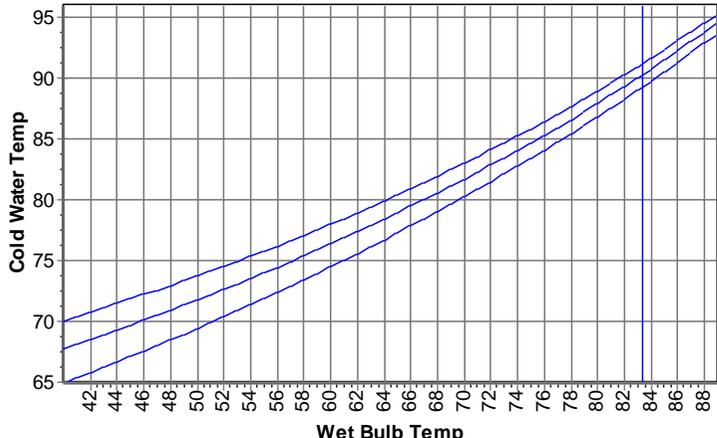
	Wet Bulb Temp	Density	Sp. Vol.	Enthalpy
Design	100.41	0.06880	15.1740	72.7020
Test	98.54	0.06913	15.0647	69.3681

**Test Results** \* Indicates predicted flow is extrapolated.

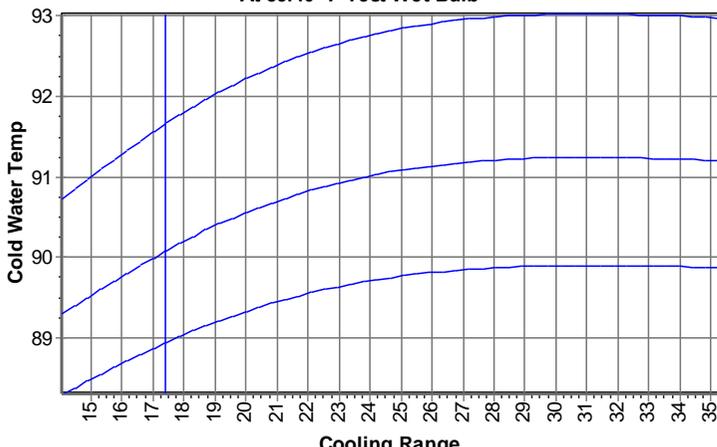
Adjusted Flow	Predicted Flow	CWT Deviation	Tower Capability
104512.6 gpm	121206.1 gpm *	3.18 °F	86.2%

This test result is only certified by CTI if the test data was collected by a CTI Licensed Testing Agency. See www.cti.org for an agency list.  
 Torre DE-500.bhp\Frueba Produced by CTI Toolkit@ 3.0

**Flow = 108792 gpm**



**At 83.40 °F Test Wet Bulb**





Condiciones Propuesta.



**Tower Performance Report**

Torre DE-500  
 Owner: Facultad de Química UNAM  
 Project: Tesis  
 Location: Coatzacoalcos, Veracruz  
 Manufacturer: Morelos DE-36D-01  
 Tower Type: Induced Draft

**Cooling Tower Design and Test Data**

Parameters	Design	Test
Water Flow Rate	110000.0 gpm	104347.0 gpm
Hot Water Temp.	110.00 °F	109.50 °F
Cold Water Temp.	89.60 °F	90.25 °F
Wet Bulb Temp.	81.71 °F	83.40 °F
Dry Bulb Temp.	90.94 °F	90.75 °F
Fan Driver Power	125.00 bhp	125.00 bhp
Barometric Pressure	29.811 in. Hg.	29.811 in. Hg.
Liquid to Gas Ratio	1.330	1.260

**Cold Water Temperatures vs. Range**  
 At 83.40 °F Test Wet Bulb

Range	98112.8 gpm	108792.0 gpm	118471.2 gpm
14.07 °F	88.30 °F	89.30 °F	90.74 °F
18.41 °F	89.10 °F	90.28 °F	91.90 °F
35.28 °F	89.87 °F	91.20 °F	92.98 °F

**Cold Water Temperature vs. Water Flow**  
 At 83.40 °F Test Wet Bulb and 19.25 °F Test Range

98112.8 gpm	108792.0 gpm	118471.2 gpm
89.23 °F	90.43 °F	92.07 °F

**Exit Air Properties**

	Wet Bulb Temp	Density	Sp. Vol.	Enthalpy
Design	100.41	0.06880	15.1740	72.7020
Test	99.91	0.06889	15.1442	71.7881

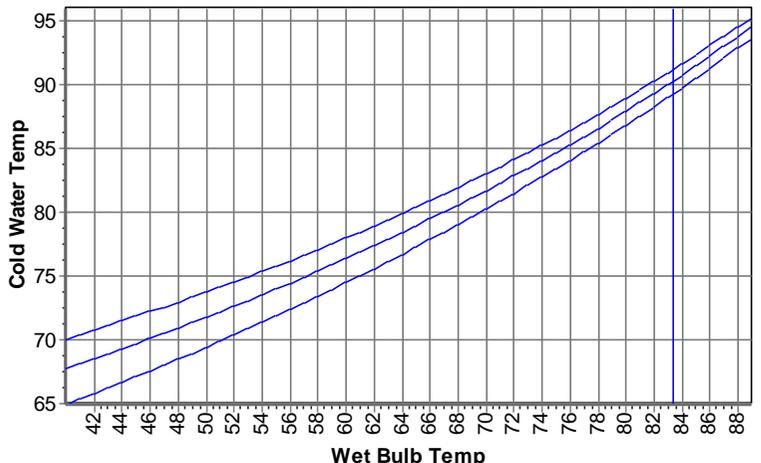
**Test Results**

Adjusted Flow	Predicted Flow	CWT Deviation	Tower Capability
104391.8 gpm	107349.2 gpm	0.51 °F	97.2%

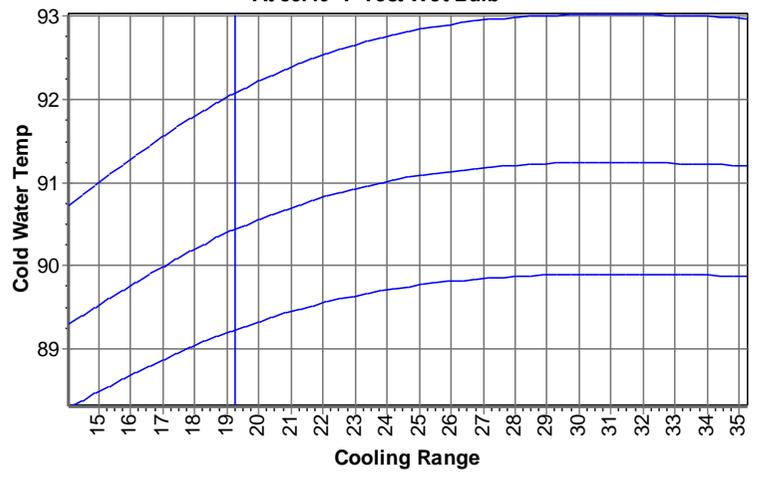
This test result is only certified by CTI if the test data was collected by a CTI Licensed Testing Agency. See www.cti.org for an agency list.

Torre DE-500.bbp/Praeba 2 Produced by CTI Toolkit© 3.0

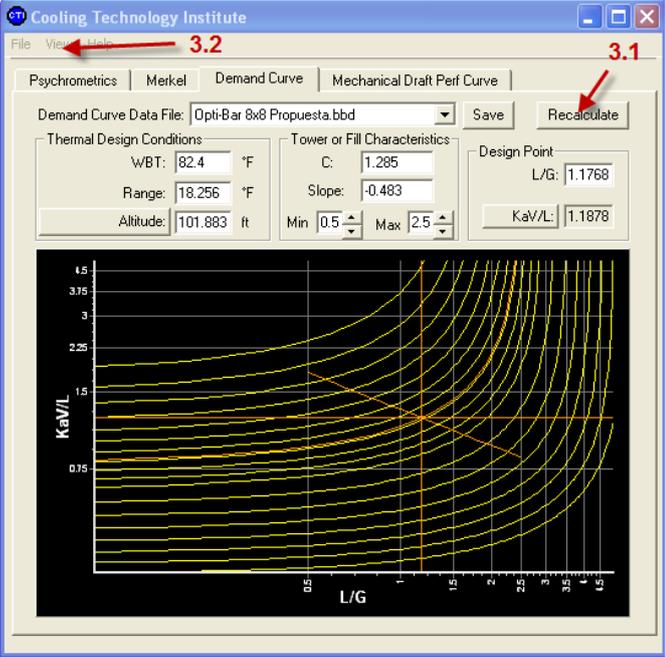
**Flow = 108792 gpm**

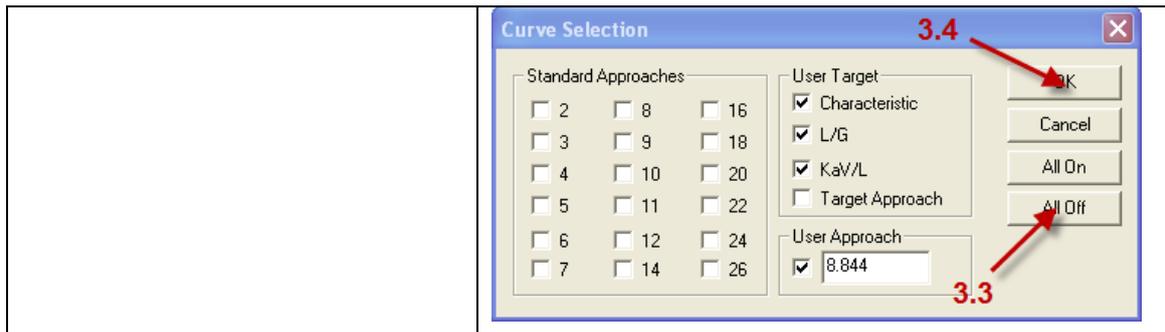


**At 83.40 °F Test Wet Bulb**



**Anexo 3 Funcionamiento del apartado Demand Curve del CTI.**

<b>1. Datos requeridos</b>	
Flujo de agua (GPM) WBT (°F) CWT (°F) Rango (°F) Aproximación (°F) Presión barométrica o Altitud (in Hg) o (ft) respectivamente. Altura del relleno (ft) Air travel (ft) C (en función de la altura y/o el air travel) n (especifico para cada empaque) L/G (obtenido del cálculo de la capacidad de enfriamiento)	
<b>2. Insertar datos requeridos por el simulador</b>	
WBT (°F) Rango (°F) Altitud (ft) C (en función de la altura y/o el air travel) n (especifico para cada empaque) L/G (obtenido del cálculo de la capacidad de enfriamiento)	
<b>3. Uso del Software CTI</b>	
<b>3.1.</b> Clico en recalcular	
<b>3.2.</b> Clic en view y clic en all off	
<b>3.3.</b> Marcar Característica L/G KaV/L y Aproximación con el valor de la propuesta	
<b>3.4.</b> Clic Ok y Clic en Recalcular.	

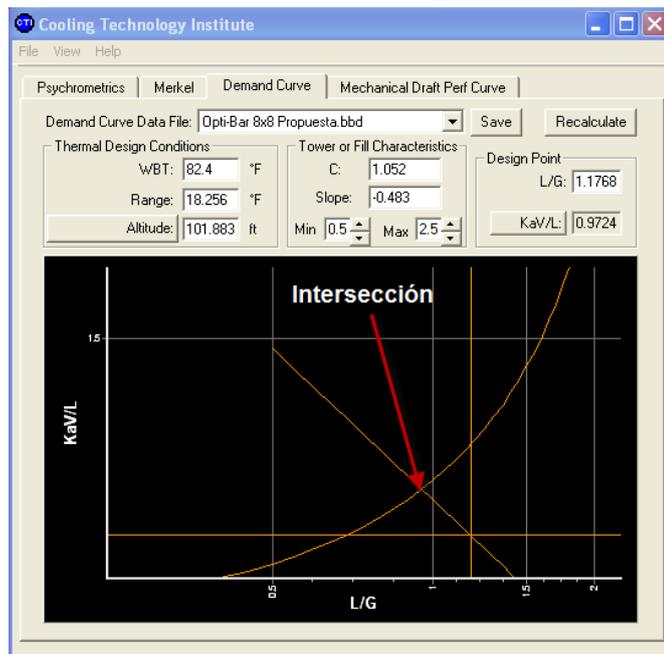


#### 4. Resultado de las dimensiones del relleno

Después de realizar pasos anteriores, se obtiene la altura del empaqué.

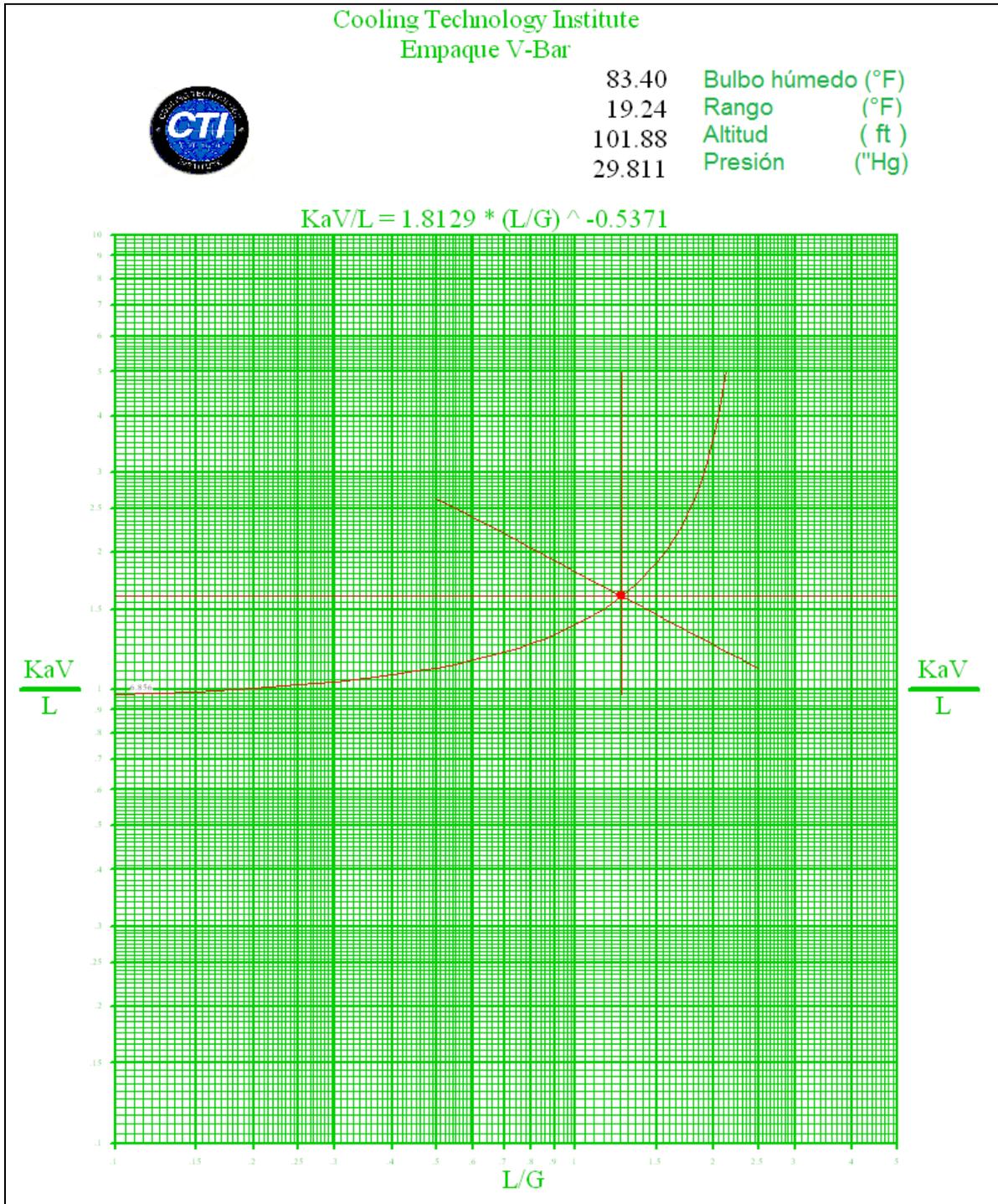
El primer paso es observar donde está la **intersección** de la curva del empaque y de las condiciones de la torre.

Después, se cambian los valores de C hasta que coincidan las diferentes curvas, tomando en cuenta que  $C=f(H)$ ,  $f(A)$  de tal forma que se obtiene así las dimensiones del empaque usado en las torres de enfriamiento.





Anexo 4 Curvas características de los tres tipos de empaques a condiciones rehabilitadas.



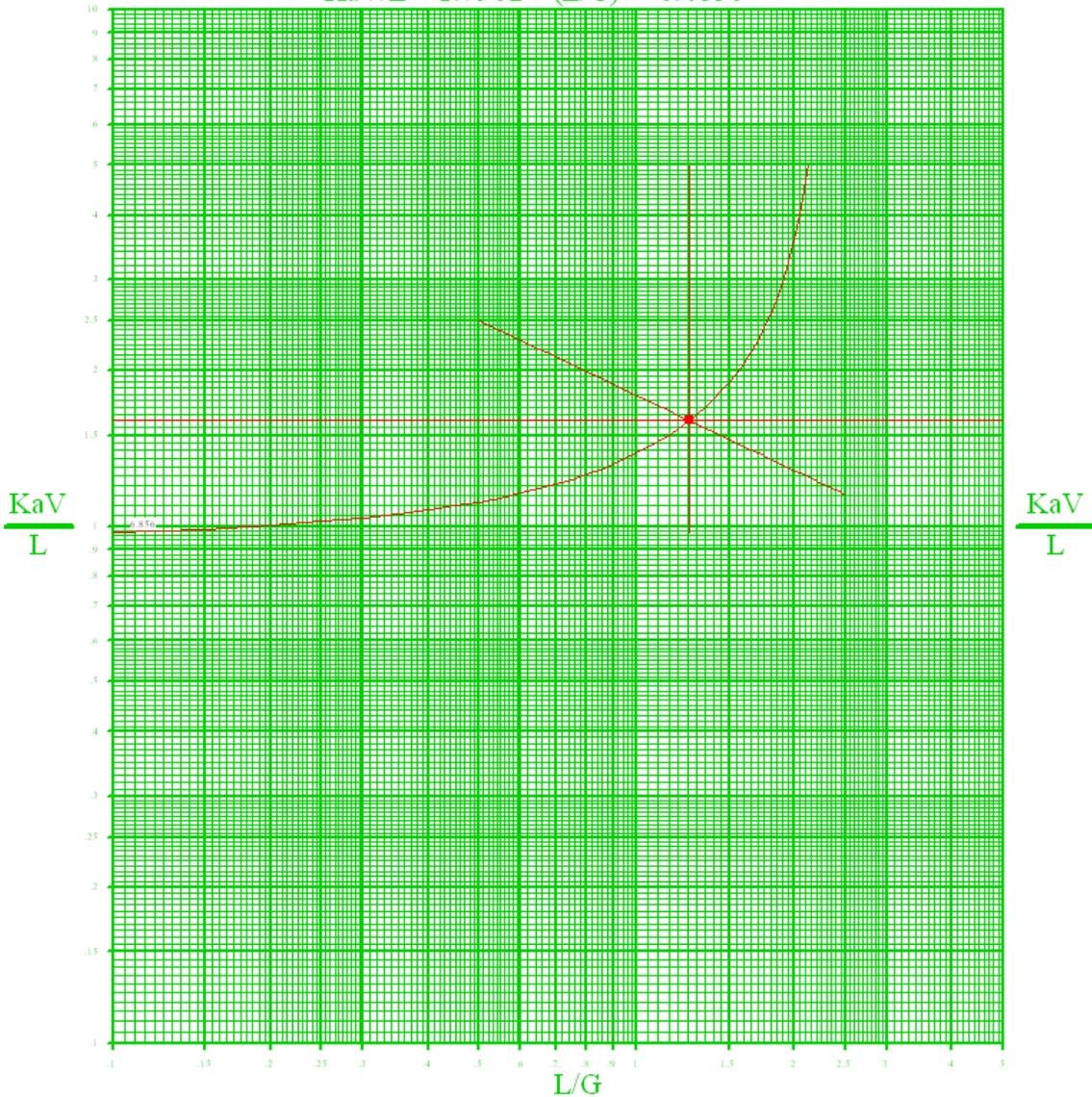


Cooling Technology Institute  
Empaque Opti-Bar



83.40	Bulbo húmedo (°F)
19.24	Rango (°F)
101.88	Altitud (ft)
29.811	Presión (”Hg)

$$KaV/L = 1.7902 * (L/G)^{-0.4830}$$



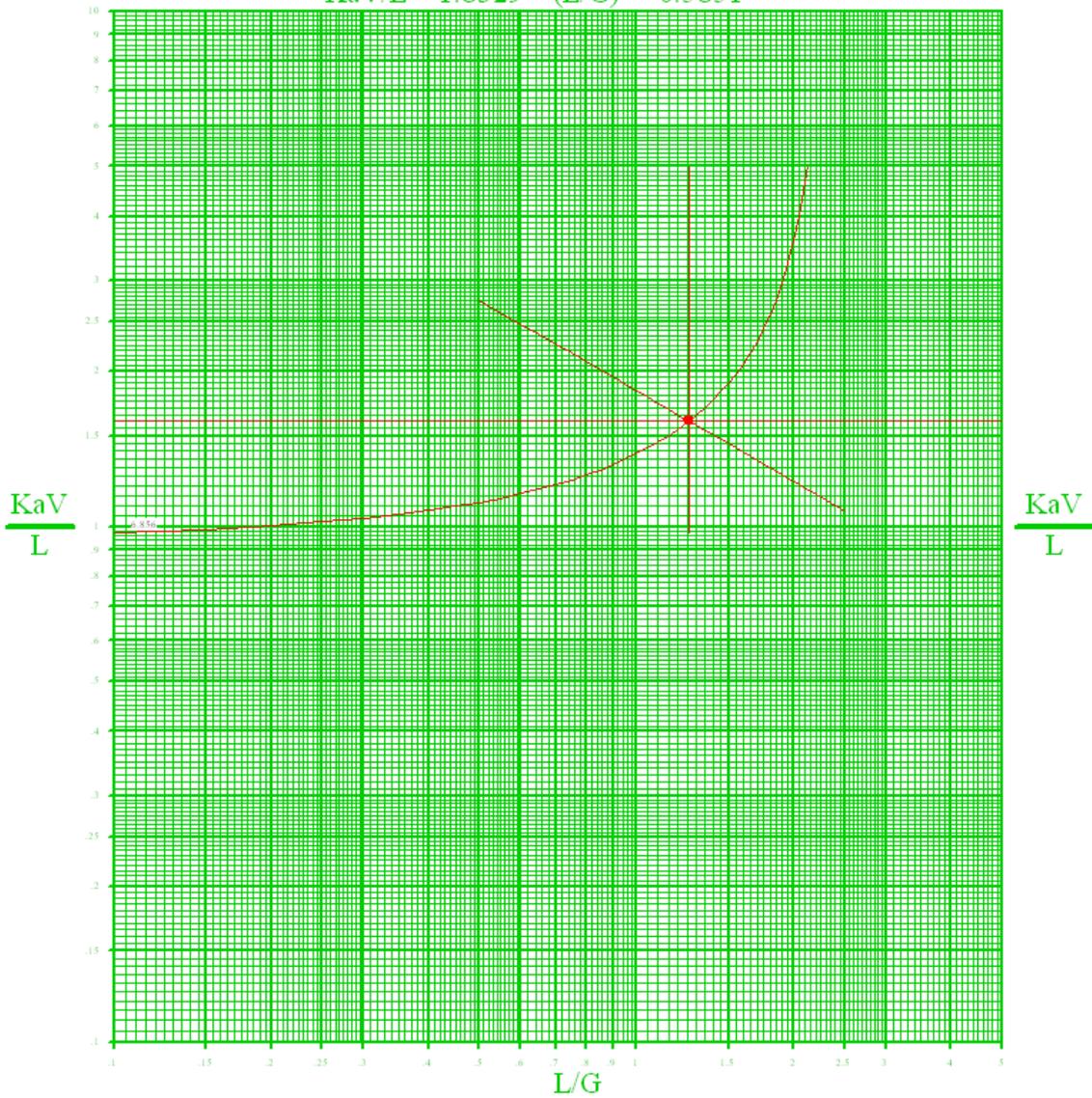


Cooling Technology Institute  
Empaque TURBO-Splash



83.40	Bulbo húmedo (°F)
19.24	Rango (°F)
101.88	Altitud (ft)
29.811	Presión ("Hg)

$$KaV/L = 1.8329 * (L/G)^{-0.5851}$$





**Anexo 5 Estimación de costos totales de la rehabilitación de la torre DE-500.**

Torre de enfriamiento DE-500										
Componente	Cantidad por unidad		Costo por unidad		Daños Total %	Costo de reparación \$ USA	Costo de mano de obra civil	Costo de materiales de	Mantenimiento Preventivo	Inversion Total \$USD
	Por Celda	Total	Por Celda	Total						
Celdas	1	11	-	-	-	-	-	-	-	-
Secciones	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-
Estructura general	1	11	14500	159500	40	63800	47850.0	54230.0	33176.0	165880.0
Sellos de Bombas	0.5	6	33158	364733	60	218840	164129.9	186013.9	113796.7	568983.6
Eliminador de rocío	16	176	514.56	5660	20	1132	849.0	962.2	588.7	2943.3
Boquillas	760	8360	4744.832	52193	50	26097	19572.4	22182.1	13570.2	67851.1
Válvulas	2	22	8588	94468	30	28340	21255.3	24089.3	14737.0	73685.0
Ventiladores	1	11	13230	145530	10	14553	10914.8	12370.1	7567.6	37837.8
Reductor	1	11	27316	300476	10	30048	22535.7	25540.5	15624.8	78123.8
Persianas	28	308	1961	21575	40	8630	6472.6	7335.6	4487.7	22438.4
Chimeneas	1	1	16869	185556	20	37111	27833.4	31544.5	19297.8	96489.2
Mallas del relleno	10	110	2500.00	27500	70	19250	14437.5	16362.5	10010.0	50050.0
Barras de V-Bar	4171	45879	6606.52	72672	60	43603	32702.3	37062.6	24853.7	113367.8
Barras de Opti-Bar	3526	38785	8433.92	92773	60	55664	41747.9	47314.3	21152.3	144726.0
Barras de TURBO Splas	2617	28788	8875.78	97634	60	58580	43935.1	49793.1	38662.9	152308.3
Inversión 1	A diferentes tipos de empaque					\$491,404	\$368,552.87	\$417,693.25	\$257,710.14	\$1,277,649.95
Inversión 2						\$503,465	\$377,598.51	\$427,944.98	\$254,008.69	\$1,309,008.16
Inversión 3						\$506,381	\$379,785.71	\$430,423.81	\$271,519.31	\$1,316,590.46

<b>Estadísticos de materiales y maquinaria</b>	85.0%
<b>Estadísticos de Mano de Obra Civil</b>	75%
<b>Mantenimiento</b>	52%



## Anexo 6 Metodología de cálculo de indicadores financieros

Las fórmulas para el cálculo de los indicadores de rentabilidad a que se hace referencia en este documento son:

### VPN: Valor Presente Neto.

$$VPN = -F_0 + \sum_{j=1}^n \frac{F_j}{(1+i)^j}$$

Donde:

$j$ , año calendario, en donde el año 0 corresponde al inicio de las erogaciones.

$n$ , número de años del horizonte de evaluación.

$F_0$ , Flujo neto inicial del proyecto.

$F_j$ , Flujos netos del proyecto en los siguientes períodos.

$i$ , Tasa Social de Descuento.

### TIR: Tasa Interna de Retorno.

Corresponde a aquella tasa de descuento que hace que el VPN del proyecto sea exactamente igual a cero.

$$0 = -F_0 + \sum_{j=1}^n \frac{F_j}{(1 + TIR)^j}$$



## Anexo 7 Desarrollo de la curva Opti-Bar

Para el desarrollo de la curva Opti-Bar primero se toman dos puntos de (L/G) que son conocidos, el primero es de 1.33 de acuerdo a “*A Comparison of Crossflow Cooling Tower Splash-Type Fills*” (1999) y el siguiente punto es de 1, ya que cuando L/G es igual a 1 facilita la ecuación y queda:

$$\frac{KaV}{L} = c(L/G)^{-n}$$

$$\frac{KaV}{L} = c(1)^{-n}$$

$$\frac{KaV}{L} = c$$

De esta manera se puede justificar la Ecuación 28 ya que con la curva que describe el empaque Opti-Bar y los diferentes puntos de la grafica se deduce dicha ecuación. A continuación se muestra la los datos con los que se puede graficar la curva característica del Opti-bar, también se muestran todos los puntos de la grafica a diferentes velocidad de aire, recordando que la velocidad de aire promedio que se consideró fue de 500 ft/min, ya que el rango recomendado para empaques tipo salpiqueo en torres de enfriamiento de flujo cruzado es de 450 a 550 ft/min.

Cuando  $c=2.02$  se tiene columna con  $KaV/L^*$  que considera la variables que se adaptaron a la curva del Opti-Bar de acuerdo a una regresión de esos puntos y que se muestra en la grafica para 500 ft/min y que los resultados son iguales a con el  $KaV/L$ .

$$\frac{KaV^*}{L} = .10281 (L/G)^{-0.485} (H)^{0.4579} (AT)^{0.5014}$$

$$\frac{KaV}{L} = 2.01(L/G)^{-0.483}$$



<b>C= 1.95</b>	
<b>A vel. aire de 700 ft/min</b>	
<b>KaV/L</b>	<b>L/G</b>
2.73	0.5
2.60	0.55
2.50	0.6
2.40	0.65
2.32	0.7
2.24	0.75
2.17	0.8
2.15	0.82
2.12	0.84
2.10	0.86
2.07	0.88
2.05	0.9
2.03	0.92
2.01	0.94
1.99	0.96
1.97	0.98
1.95	1
1.93	1.02
1.91	1.04
1.90	1.06
1.88	1.08
1.86	1.1
1.85	1.12
1.83	1.14
1.82	1.16
1.80	1.18
1.79	1.2
1.77	1.22
1.76	1.24
1.74	1.26
1.73	1.28
1.72	1.3
1.71	1.32
1.69	1.34
1.68	1.36
1.67	1.38
1.66	1.4

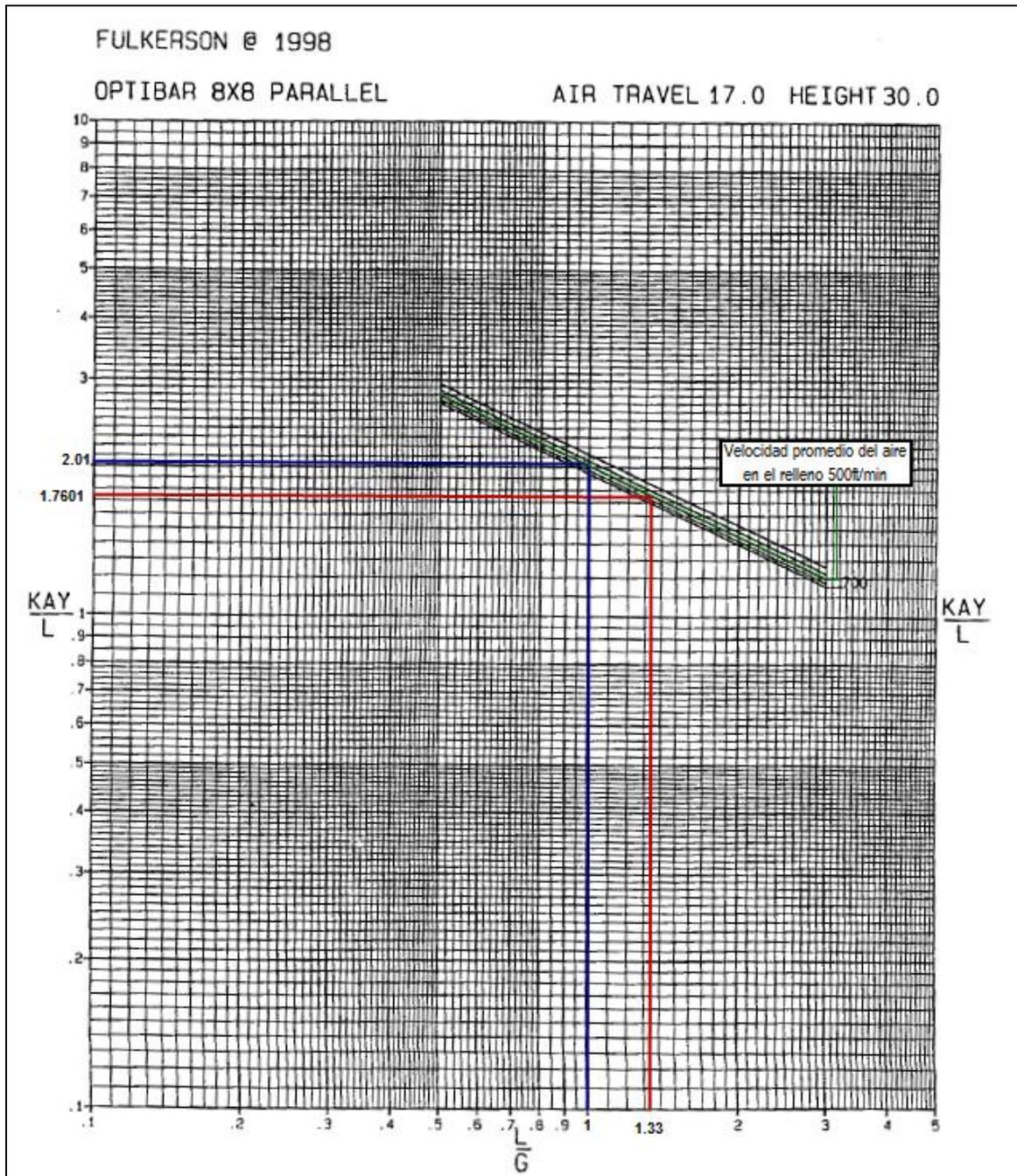
<b>C= 1.97</b>	
<b>A vel. aire de 600 ft/min</b>	
<b>KaV/L</b>	<b>L/G</b>
2.75	0.5
2.65	0.54
2.52	0.6
2.48	0.62
2.34	0.7
2.31	0.72
2.19	0.8
2.17	0.82
2.14	0.84
2.12	0.86
2.10	0.88
2.07	0.9
2.05	0.92
2.03	0.94
2.01	0.96
1.99	0.98
1.97	1
1.95	1.02
1.93	1.04
1.92	1.06
1.90	1.08
1.88	1.1
1.87	1.12
1.85	1.14
1.83	1.16
1.82	1.18
1.80	1.2
1.79	1.22
1.78	1.24
1.76	1.26
1.75	1.28
1.74	1.3
1.72	1.32
1.71	1.34
1.70	1.36
1.69	1.38
1.67	1.4

<b>KaV/L*</b>	<b>C= 2.02</b>	
	<b>A vel. aire de 500 ft/min</b>	
	<b>KaV/L</b>	<b>L/G</b>
2.82	2.82	0.5
2.72	2.72	0.54
2.59	2.59	0.6
2.54	2.54	0.62
2.40	2.40	0.7
2.37	2.37	0.72
2.25	2.25	0.8
2.22	2.22	0.82
2.20	2.20	0.84
2.17	2.17	0.86
2.15	2.15	0.88
2.13	2.13	0.9
2.10	2.10	0.92
2.08	2.08	0.94
2.06	2.06	0.96
2.04	2.04	0.98
<b>2.02</b>	<b>2.02</b>	<b>1</b>
2.00	2.00	1.02
1.98	1.98	1.04
1.96	1.96	1.06
1.95	1.95	1.08
1.93	1.93	1.1
1.91	1.91	1.12
1.90	1.90	1.14
1.88	1.88	1.16
1.86	1.86	1.18
1.85	1.85	1.2
1.84	1.84	1.22
1.82	1.82	1.24
1.81	1.81	1.26
1.79	1.79	1.28
1.78	1.78	1.3
<b>1.76</b>	<b>1.76</b>	<b>1.33</b>
1.75	1.75	1.34
1.74	1.74	1.36
1.73	1.73	1.38
1.72	1.72	1.4



<b>C= 2.09</b>	
<b>A vel. aire de 400 ft/min</b>	
<b>KaV/L</b>	<b>L/G</b>
2.92	0.5
2.81	0.54
2.67	0.6
2.63	0.62
2.48	0.7
2.45	0.72
2.33	0.8
2.30	0.82
2.27	0.84
2.25	0.86
2.22	0.88
2.20	0.9
2.18	0.92
2.15	0.94
2.13	0.96
2.11	0.98
2.09	1
2.07	1.02
2.05	1.04
2.03	1.06
2.01	1.08
2.00	1.1
1.98	1.12
1.96	1.14
1.95	1.16
1.93	1.18
1.91	1.2
1.90	1.22
1.88	1.24
1.87	1.26
1.86	1.28
1.84	1.3
1.83	1.32
1.81	1.34
1.80	1.36
1.79	1.38
1.78	1.4

<b>C= 2.13</b>	
<b>A vel. aire de 300 ft/min</b>	
<b>KaV/L</b>	<b>L/G</b>
2.98	0.5
2.87	0.54
2.73	0.6
2.68	0.62
2.53	0.7
2.50	0.72
2.37	0.8
2.34	0.82
2.32	0.84
2.29	0.86
2.27	0.88
2.24	0.9
2.22	0.92
2.19	0.94
2.17	0.96
2.15	0.98
2.13	1
2.11	1.02
2.09	1.04
2.07	1.06
2.05	1.08
2.03	1.1
2.02	1.12
2.00	1.14
1.98	1.16
1.97	1.18
1.95	1.2
1.93	1.22
1.92	1.24
1.91	1.26
1.89	1.28
1.88	1.3
1.86	1.32
1.85	1.34
1.84	1.36
1.82	1.38
1.81	1.4



Además cuando  $L/G$  es igual a 1 también es posible comparar diferentes empaques a simple vista, sin necesidad de realizar la simulación de cada empaque. Ya que como se explicó en el apartado 3.2 el  $KaV/L$  es medida del orden de dificultad para los requerimientos del enfriamiento del líquido, así que entre mayor sea el  $KaV/L$  que alcancen las curvas de cada empaque, mejor será el funcionamiento de dicho empaque. A continuación se muestran diferentes tipos de empaques donde se realiza una comparación a un  $L/G$  igual a uno y muestra que el empaque Opti-Bar alcanza la mejor eficiencia.

