



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**Propuesta de ahorro de agua en
torres de enfriamiento mediante la
evaluación y mejora de la eficiencia
térmica**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

IVÁN FRANTZ BLANCO HERNÁNDEZ



MÉXICO, D.F.

2007



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:

Presidente	Prof. Rodolfo Torres Barrera
Vocal	Prof. Víctor Manuel Luna Pabello
Secretario	Prof. Alfonso Durán Moreno
1er. Suplente	Prof. Ernesto Rivera García
2º. Suplente	Prof. Fulvio Mendoza Rosas

Sitio en donde se desarrolló el tema:

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
TORRE DE INGENIERÍA.
CUARTO PISO, ALA NORTE

Asesor del tema:

DR. ALFONSO DURÁN MORENO

Sustentante:

IVÁN FRANTZ BLANCO HERNÁNDEZ

Dedico esta tesis a la memoria de mi abuelito José Ángel Hernández Cortes, quien fue un padre y un gran maestro para mí, a mi abuelita Maria Margarita Granados Ruiz, a mi Mama Isabel Hernández Granados, a mis hermanos Lennart Hans y Jonathan a quienes les debo todo lo que soy y a quienes les agradezco todo su apoyo.

Sin ellos nada de esto seria posible.

Las cadenas de la esclavitud solamente atan las manos: es la mente lo que hace al hombre libre o esclavo.

Franz Grillparzer

AGRADECIMIENTOS

A mi mamá Isabel que gracias a todo su apoyo y amor incondicionales han sido parte muy importante para el logro de mis metas.

A mis hermanos Hans y Jonathan que me han soportado y apoyado a lo largo de toda mi vida.

A todos mis tíos y primos que siempre están al pendiente de mi avance en la carrera y siempre dispuestos a apoyarme.

A Alma Lilia por todo su apoyo y momentos maravillosos que hemos pasado.

A mis amigos Yarina, Flor, Jorge, Benjamín, Karina, Erika, Juanita del Departamento de Óptica de Costco Mixcoac, ellos son los cimientos de este trabajo.

A mis amigos de la Prepa 8 Fernando, Sandra, Rubi que siempre han estado cuando los he necesitado.

A mis amigos de la carrera Juan, Petry, El oso, Checo, Dianita, Martha, Monzy, Nadia, Saúl y León que me brindaron todo su apoyo desinteresado a lo largo de la carrera.

A mis amigos de la Torre de Ingeniería Pavel, Rulo, Jorge, Adriana, Paula, Javier y Akemi por hacer tan amenas todas esas pijamadas.

Al Dr. Alfonso Duran Moreno por su valiosa y desinteresada ayuda en la revisión y corrección de este trabajo.

A las muchas personas que a lo largo de la carrera siempre me han apoyado.

A todos los jefes y compañeros de trabajo con los que he compartido tantas cosas a lo largo de todo este tiempo.

**INDICE**

RESUMEN.....	5
1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1. PROBLEMÁTICA.....	7
1.2. OBJETIVO GENERAL.....	8
1.3. OBJETIVOS PARTICULARES.....	8
2. FUNDAMENTOS.....	9
2.1. Agua de enfriamiento en la refinación de petróleo.....	9
2.2. Funcionamiento de las torres de enfriamiento.....	10
2.3. Clasificación de las torres de enfriamiento.....	11
2.3.1. Torres de circulación natural.....	11
2.3.1.1. Las torres atmosféricas.....	11
2.3.1.2. La torre de tiro natural.....	12
2.3.2. Torres de tiro mecánico.....	13
2.3.2.1. Las torres de tiro forzado.....	13
2.3.2.2. Las torres de tiro inducido.....	14
2.3.3. Las torres de flujo cruzado.....	15
2.4. Comparación de tipos de torres.....	16
2.5. Partes importantes de las Torres de enfriamiento.....	19
2.5.1. Bacín y cárcamo.....	19
2.5.2. Distribuidores de agua.....	19
2.5.3. Ventiladores motores.....	19
2.5.4. Eliminadores de niebla.....	20
2.5.5. Persianas.....	20
2.5.6. Relleno o Empaque.....	20
2.6. Materiales de Construcción.....	20
2.6.1. Estructura.....	20
2.6.2. Rellenos.....	20
2.6.3. Equipo mecánico.....	21
2.6.4. Ventiladores.....	21
2.6.5. Reductores de velocidad.....	21
2.7. Definición de conceptos utilizados en el estudio de torres de enfriamiento.....	22
2.7.1. Capacidad térmica.....	22
2.7.2. Temperatura de bulbo húmedo.....	22
2.7.3. Diferencial de temperatura.....	23
2.7.4. Gasto o flujo.....	24
2.7.5. Intervalo.....	24
2.7.6. Acercamiento o aproximación.....	24
2.7.7. Ciclos de concentración.....	25
2.7.8. Pérdidas.....	25
2.8. Evaluación de la capacidad de enfriamiento de las torres.....	26
2.8.1. Balance de materia y energía.....	26
2.8.1.1. La simbología usada en el balance:.....	26
2.8.1.2. Cálculo de balance de materia.....	27
2.8.2. Cálculo de disipación de calor.....	28
2.8.3. Cálculo de % de capacidad de enfriamiento.....	28
2.8.4. Cálculo del BHP de diseño.....	30

2.8.5.	Cálculo de presión de velocidad.....	30
2.8.6.	Cálculo de la presión total.....	31
2.8.7.	Cálculo del $(KaV/L)_{PRUEBA}$	32
2.8.8.	Cálculo de la entalpía del aire:	33
2.8.9.	La obtención del $(L/G)_0$	34
2.8.10.	Cálculo de la capacidad actual de la torre.....	34
2.8.11.	Determinación de la capacidad.....	34
2.8.12.	Determinación de la eficiencia Térmica	34
2.9.	Caso de estudio.....	35
3.	METODOLOGÍA	36
3.1.	Inspección física de una torre de enfriamiento	37
3.1.1.	Limpieza de las torres	37
3.1.2.	Pared externa de la torre.....	37
3.1.3.	Acceso a la torre de enfriamiento	38
3.1.4.	Estructura	38
3.1.5.	Persianas.....	38
3.1.6.	Escaleras.....	38
3.1.7.	Barandales	39
3.1.8.	Pasillos	39
3.1.9.	Bacín de agua fría	39
3.2.	Internos de una torre de enfriamiento.....	40
3.2.1.	Bacín de agua caliente.....	40
3.2.2.	Tubería	40
3.2.3.	Válvulas de control de flujo	40
3.2.4.	Boquillas de distribución.....	41
3.2.5.	Relleno	41
3.2.6.	Eliminador de niebla	41
3.2.7.	Ventilador.....	42
3.2.8.	Reductor de velocidad.....	42
3.2.9.	Flecha de transmisión	42
3.2.10.	Chimenea o cono venturi	42
3.2.11.	Válvula de agua de repuesto.....	43
3.3.	Mediciones de temperatura.....	43
3.4.	Mediciones de flujo en tubería cerrada.....	44
3.4.1.	Preparación del sitio de medición.....	45
3.5.	Flujo de aire en la chimenea	47
3.6.	Las purgas	48
3.7.	Proveedores.....	48
4.	RESULTADOS	49
4.1.	Determinación de la capacidad actual de enfriamiento.	49
4.1.1.	Método de curvas de comportamiento.....	49
4.1.2.	Método de curvas características por el criterio de Merkel.	50
4.1.3.	Método alternativo balance térmico.	51
4.2.	Torres existentes en el mercado	52
4.2.1.	Tipo de torres de enfriamiento existentes en el mercado.....	52

4.2.2.	Principales Marcas	56
4.2.3.	Torres de enfriamiento tipo modulares	58
4.3.	Rellenos o empaques	61
4.3.1.	Los empaques o rellenos de película	65
4.3.1.1.	Ejemplo: con relleno o sin relleno	65
4.3.2.	Alternativas al empaque	66
4.4.	Los Eliminadores.....	67
4.5.	Condensadores Evaporativos	68
4.6.	Persianas.	70
4.7.	Ventiladores.	71
4.8.	Características del agua	72
4.9.	Selección del tipo de material	73
4.10.	Ahorro de agua	76
4.10.1.	Intervalo de enfriamiento	77
4.10.2.	Ciclos de concentración	77
4.10.3.	Los eliminadores de niebla.....	78
4.10.4.	Otras alternativas de ahorro.....	79
4.10.4.1.	Recuperadores de Evaporación.....	79
4.10.4.2.	Recuperación de purgas.....	79
4.10.4.3.	Recuperación en otros puntos de proceso:	79
4.10.4.4.	Ventiladores:.....	80
4.11.	Consideraciones Técnicas	80
4.11.1.	Orientación de la torre.....	81
4.11.2.	Humedad del aire	82
4.11.3.	Aire de entrada.....	82
4.11.4.	Recirculación de agua	82
4.11.5.	Tamaño de las gotas de agua.....	82
4.11.6.	Leyes de los ventiladores	82
4.11.7.	Problemas más comunes	83
5.	PROPUESTA	84
5.1.	Relleno	84
5.2.	Eliminador de niebla.....	84
5.3.	La calidad de agua	84
5.4.	Ámbito Económico.....	85
6.	CONCLUSIONES.....	86
7.	BIBLIOGRAFÍA	88
8.	ANEXOS	92
8.1.	Anexo 1 “Balance”	92
8.2.	Anexo 2 “Gráfica”	111
8.3.	Anexo 3 “Mediciones en tubería cerrada”	112

TABLAS

Tabla 1.	Ventajas y desventajas de las torres de enfriamiento	17
Tabla 2.	Datos de diseño de la torre TE-00	35
Tabla 3.	Temperaturas de la torre TE-00.....	44
Tabla 4.	Flujos de la torre TE-00	46
Tabla 5.	Velocidad del aire	48

Tabla 6.	Características de las torres de enfriamiento.....	53
Tabla 7.	Principales marcas de torres de enfriamiento.....	57
Tabla 8.	Torres de enfriamiento tipo modulares.	59
Tabla 9.	Materiales de los rellenos para torres de enfriamiento	62
Tabla 10.	Características de Rellenos V Bar y Opti-bar	64
Tabla 11.	Principales fabricantes de condensadores evaporativos	69
Tabla 12.	Criterios del agua de enfriamiento.....	72
Tabla 13.	Inversión.....	85

FIGURAS

Figura 1	Esquema de una torre de tiro natural.	13
Figura 2	Torre de flujo a contracorriente y tiro forzado.	14
Figura 3	Torre de flujo a contracorriente y tiro inducido.	15
Figura 4	Torre de flujo cruzado (tiro inducido)	16
Figura 5	Nomenclatura del balance de materia.....	27
Figura 6	Procedimiento para evaluar una torre de enfriamiento.....	36
Figura 7	Perfil de temperatura.....	44
Figura 8	Mediciones en tubería cerrada.....	46
Figura 9	Diagrama de un tubo Pitot Estándar (utilizado durante las mediciones)(EPA)	47
Figura 10	Foto del tubo Pitot Estándar (utilizado durante las mediciones).....	48
Figura 11	Torres de Enfriamiento Modulares.....	61
Figura 12	Relleno de salpiqueo y de película	62
Figura 13	Rellenos V-bar y Opti-bar evaluados	64
Figura 14	Rellenos de película comerciales.....	65
Figura 15	Eliminadores de niebla comerciales	68
Figura 16	Torre sin persianas y empaque con persianas	71
Figura 17	Ventiladores de una torre	71
Figura 18	Ahorro de agua	73
Figura 19	Calor disipado.....	74
Figura 20	Ahorro de agua & eliminador.....	75
Figura 21	Agua evaporada	76



RESUMEN

La industria de refinación de petróleo, actualmente procesa altos volúmenes de petróleo, por lo que requiere una cantidad de servicios en cada una de sus plantas, entre los que destacan: el vapor, la electricidad, agua de enfriamiento, aire comprimido, entre otros.

En tiempo atrás usaban al caudal de un río o alguna otra fuente para poder satisfacer la demanda de agua, cubriendo el servicio de agua de enfriamiento; pero hoy en día en una filosofía ambiental maneja el ahorro de recursos y ha recomendado la recirculación de agua de enfriamiento, para lograr esto se requiere la mejora de eficiencia térmica en las torres de enfriamiento.

El presente trabajo se enfoca al estudio de una torre de enfriamiento, en dicho equipo se lleva a cabo un proceso simultáneo de intercambio de calor y más a, durante éstos el agua se evapora promoviendo el intercambio de calor; estos equipos constituyen una parte importante en la industria de refinación de petróleo, para ello será necesario llevar a cabo una evaluación de su estado actual, verificando las últimas modificaciones al sistema o bien si opera conforme a diseño, así como una comparación entre las distintas y nuevas tecnologías para incrementar la disipación de calor y ciclos de concentración y conlleve al ahorro de agua.

Con base en lo anterior será posible determinar si la industria de refinación de petróleo, tiene una mayor capacidad térmica contribuyendo al ahorro de los recursos naturales, principalmente en el ahorro de agua.



1. INTRODUCCIÓN

Las torres para enfriamiento de agua son dispositivos cuya finalidad es extraer calor del agua a través del contacto directo con el aire. Estas torres tienen múltiples aplicaciones, desde relativamente pequeñas instalaciones de aire acondicionado, hasta en grandes complejos de generación de energía eléctrica o refinerías de petróleo. Se puede decir que su uso está justificado en sistemas que utilizan agua como medio refrigerante, donde sea necesario disipar grandes cantidades de calor.

Componentes importantes de las torres son:

- La estructura, a través de la cual circulan todos los fluidos.
- El relleno, cuya finalidad principal es aumentar la superficie de transferencia por unidad de volumen de la torre.
- El grupo impulsor está integrado por: ventilador, motor, transmisión, en ciertos casos el subsistema de control de velocidad de aire.
- El sistema de distribución de agua que incluye los tubos de distribución internas, las charolas de distribución o espreas y el depósito o bacín de recolección.

De acuerdo a cómo se genera el movimiento de aire pueden distinguirse dos tipos de torres: las de tiro natural y las de tiro mecánico. Las primeras pueden ser atmosféricas, con o sin asistencia mecánica. Las de tiro mecánico pueden ser de flujo forzado (aire impulsado al interior) o bien de flujo inducido (aire aspirado desde el interior). En este último tipo de torres el flujo de aire respecto al del agua puede ser cruzado o a contracorriente.

El presente trabajo consiste en la evaluación de la capacidad térmica de una torre de enfriamiento de flujo cruzado con capacidad de diseño de 60,000 GPM (13,627.5 m³/h), con la finalidad de presentar una propuesta de mejora ahorrar agua y mejorar su capacidad térmica.



La propuesta de mejora consiste en el cambio de internos de la torre a dos principales tecnologías una aumenta la transferencia de calor y la otra disminuye la cantidad de agua que se pierde por arrastre.

La propuesta de cambio de tecnología tendrá como resultado un ahorro de agua de aproximado de 883,600 m³/año que se encuentra alrededor de los 7,600,000 \$/año. La inversión aproximada del cambio de tecnología es de \$1,400,000 más el costo adicional aproximado del tratamiento de agua es de 3,000,000 \$/año.

1.1. PROBLEMÁTICA

La industria de la refinación de petróleo en México es un gran consumidor de agua. En dicha industria casi el 70% del agua consumida se utiliza para operaciones de enfriamiento. En las refinerías se cuenta con torres de enfriamiento las cuales son equipos que tienen por objetivo disminuir el consumo de agua al enfriarla para poder reutilizarla para el enfriamiento de equipos de proceso. Sin embargo, debido al principio de enfriamiento de agua que consiste principalmente en la transferencia de calor latente, se pierden grandes cantidades de agua por evaporación y arrastre (50-70% del agua de repuesto) y por purgas (30 – 50%). Si aunado a lo anterior se considera que en las refinerías mexicanas la mayoría de las torres de enfriamiento tienen una antigüedad superior a 15 años y que en ocasiones operan a condiciones alejadas de las de diseño, entonces las pérdidas de agua en estos equipos se incrementa sensiblemente (20 – 50% de consumo adicional de agua con respecto al diseño). La evaluación térmica de una torre de enfriamiento permite conocer cuál es la capacidad de enfriamiento de agua con respecto a las condiciones de diseño. 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 evaluar, cuantitativa y cualitativamente, la energía que disipa dicha torre y su eficiencia térmica, con el fin de elaborar una propuesta de mejora que permita incrementar la capacidad térmica y así obtener un ahorro de agua.

1.3. OBJETIVOS PARTICULARES

1. Presentar metodologías para la evaluación térmica de una torre de enfriamiento.
2. Revisar y comparar opciones tecnológicas para definir un posible cambio que conlleve a una mejora en la torre de enfriamiento en estudio.
3. Elaborar una propuesta de modernización para la mejora con un consecuente ahorro de agua.



2. FUNDAMENTOS

El uso del agua en la industria se puede clasificar en tres categorías, de enfriamiento, de calderas y de proceso (Jiménez, 2001). En el caso del agua de enfriamiento se puede decir que las torres de enfriamiento manejadas dentro del intervalo de su operación normal, ahorran agua (Vázquez, 2000).

2.1. Agua de enfriamiento en la refinación de petróleo

El agua de enfriamiento en la industria de refinación se utiliza para extraer calor de algunos procesos por medio de intercambiadores de agua, a partir de haces de tubos con o sin aletas. El sistema que se ocupa para la recirculación del agua de los intercambiadores de calor, enfriadores, entre otros son las torres de enfriamiento.

El agua de las torres de enfriamiento en refinería se puede contaminar con los materiales y subproductos de proceso, como el dióxido de azufre, el ácido sulfhídrico y el dióxido de carbono. Existe riesgo de exposición con productos químicos de tratamiento del agua o a ácido sulfhídrico cuando se tratan aguas residuales y se utilizan conjuntamente torres de enfriamiento. Al estar el agua saturada de oxígeno por haber sido refrigerada con aire, las posibilidades de corrosión son mayores. Un medio de prevenir la corrosión es añadir al agua de enfriamiento un material que forme una película protectora sobre las tuberías y otras superficies metálicas.

Cuando el agua de enfriamiento está contaminada con hidrocarburos, se desprenden vapores inflamables y se mezclan con el aire de descarga. Si hay una fuente de ignición o se produce una chispa eléctrica, existe la posibilidad de que se declare un incendio. También se corre este riesgo cuando hay zonas relativamente secas en torres de enfriamiento de tiro inducido de estructura combustible. La interrupción de la alimentación eléctrica a los ventiladores de las torres de enfriamiento o a las bombas de agua puede tener graves consecuencias en las operaciones de proceso (OSHA, 1996).



2.2. Funcionamiento de las torres de enfriamiento

En las torres de enfriamiento se consigue disminuir la temperatura del agua caliente que proviene de un circuito de refrigeración, mediante la transferencia de calor y materia al aire que circula por el interior de la torre. A fin de mejorar el contacto aire-agua, se utiliza un entramado denominado “relleno”. El agua entra en la torre por la parte superior y se distribuye uniformemente sobre el relleno. De esta forma se consigue un contacto óptimo entre el agua y el aire atmosférico (Khan, 2003).

El relleno sirve para aumentar el tiempo de residencia y la superficie de intercambio entre aire-agua. Una vez establecido el contacto aire-agua, tiene lugar una transferencia de calor del agua hacia el aire, ésta se produce debido a dos mecanismos que son la convección y la difusión.

En la transferencia de calor por convección, se produce un flujo de calor en dirección al aire que rodea el agua a causa de la diferencia de temperaturas entre ambos fluidos.

En la transferencia de calor por difusión; la tasa de enfriamiento por evaporación es de gran magnitud; alrededor del 90 % del agua de repuesto es perdida por este fenómeno. Al entrar en contacto el aire con el agua se forma una fina película de aire húmedo saturado sobre la lámina de agua que desciende por el relleno, esto es debido a que la presión parcial de vapor de agua en la película de aire es superior a la del aire húmedo que circula por la torre, produciéndose una sección de vapor de agua fenómeno llamado evaporación. Esta más a de agua evaporada extrae el calor latente de vaporización del agua. Este calor latente es cedido al aire, para obtener un enfriamiento del agua y un aumento de la temperatura del aire. La diferencia entre la temperatura del agua a la salida y la temperatura húmeda del aire se llama “acercamiento” o “aproximación”, ya que representa el límite termodinámico de enfriamiento al que puede llegar el agua en una torre de enfriamiento (Cruz, 1999).



2.3. Clasificación de las torres de enfriamiento

La forma más simple y usual de clasificar las torres de enfriamiento es con respecto con la forma en que se mueve el aire a través de éstas. Según este criterio, existen torres de circulación natural y torres de tiro mecánico. En las torres de circulación natural, el movimiento del aire sólo depende de las condiciones climáticas y ambientales, mientras que las torres de tiro mecánico utilizan ventiladores para mover el aire a través del relleno.

2.3.1. Torres de circulación natural

Se clasifican, a su vez, en torres atmosféricas y en torres de tiro natural.

2.3.1.1. Las torres atmosféricas

Las torres atmosféricas utilizan las corrientes de aire de la atmósfera. El aire se mueve de forma horizontal y el agua cae verticalmente este mecanismo se llama “flujo cruzado”. Son torres de gran altura y pequeña sección transversal. Deben instalarse en lugares muy despejados, de forma que ningún obstáculo pueda impedir la libre circulación de aire a través de la torre. El mantenimiento es reducido al no existir partes mecánicas móviles. Una torre de este tipo puede ser una solución muy buena para determinadas necesidades de enfriamiento si se puede garantizar que funcionará habitualmente expuesta a vientos de velocidades iguales o superiores a los 8 km/h. Si la velocidad promedio del viento es baja, los costos fijos y de bombeo aumentan mucho en relación a una torre de tiro mecánico y no compensan el ahorro del costo de ventilación. Actualmente, las torres atmosféricas están en desuso.

2.3.1.2. La torre de tiro natural

La torre de tiro natural es aquella en la que el aire es inducido por una gran chimenea situada sobre el relleno, como lo muestra la Figura 1. La diferencia de densidades entre el aire húmedo caliente y el aire atmosférico es el principal motivo por el cual se crea el tiro de aire a través de la torre. La diferencia de velocidades entre el viento circulante a nivel del suelo y el viento que circula por la parte superior de la chimenea también ayuda a establecer el flujo de aire. Por ambos motivos, las torres de tiro natural han de ser altas y, además, deben



tener una sección transversal grande para facilitar el movimiento del aire ascendente.

Estas torres tienen bajos costos de mantenimiento y son muy indicadas para enfriar grandes caudales de agua. Al igual que las torres atmosféricas, no tienen partes mecánicas. La velocidad media del aire a través de la torre suele estar comprendida entre 3.6 y 7.2 km/h. Las torres de tiro natural no son adecuadas cuando la temperatura seca del aire es elevada, ya que ésta debe ser siempre inferior a la del agua caliente. No es posible conseguir un valor de acercamiento pequeño y es muy difícil controlar exactamente la temperatura del agua. En las torres de tiro natural no se pueden utilizar rellenos de gran compactación, debido a que la resistencia al flujo de aire debe ser lo más pequeña posible. Estas torres son muy utilizadas en centrales térmicas o núcleo eléctricas, muy pocas veces son aplicables a plantas industriales debido a la fuerte inversión inicial necesaria y a las condiciones climatológicas especiales que se requieren para un correcto funcionamiento.

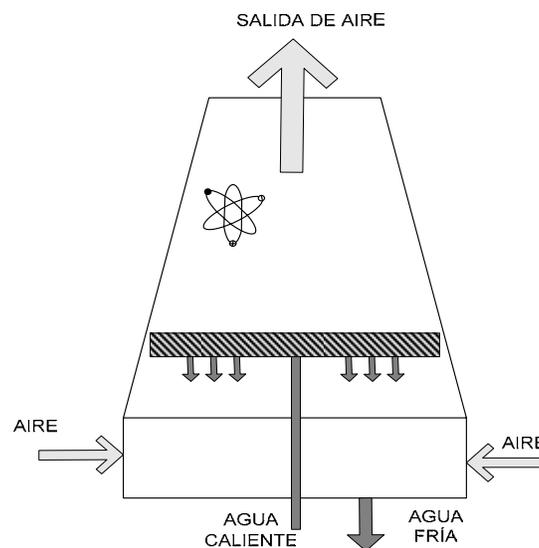


Figura 1 Esquema de una torre de tiro natural.

2.3.2. Torres de tiro mecánico

Las torres de tiro mecánico proporcionan un control total sobre el caudal de aire suministrado. Se trata de torres compactas, con una sección transversal y una altura de bombeo pequeñas en comparación con las torres de tiro natural. En



estas torres se puede controlar de forma precisa la temperatura del agua de salida, y se pueden lograr valores de acercamiento muy pequeños (hasta de 1 ó 2 °C, aunque en la práctica acostumbra a ser de 3 ó 4 °C). Si el ventilador se encuentra situado en la entrada de aire, se clasifica como “tiro forzado” cuando, el ventilador se ubica en la zona de descarga del aire, se clasifica como de “tiro inducido”.

2.3.2.1. Las torres de tiro forzado

En las torres de tiro forzado el aire se descarga a baja velocidad por la parte superior como lo muestra la Figura 2. Estas torres son, casi siempre, de flujo a contracorriente y son más eficientes que las torres de tiro inducido, puesto que la presión dinámica convertida a estática realiza un trabajo útil.

El aire que se mueve es aire frío de mayor densidad que en el caso de tiro inducido, esto también significa que el equipo mecánico tendrá una duración mayor que en el caso de tiro inducido, ya que el ventilador trabaja con aire frío y no saturado, menos corrosivo que el aire caliente y saturado de la salida. Como inconveniente debe mencionarse la posibilidad de que exista recirculación del aire de salida hacia la zona de baja presión, creada por el ventilador en la entrada de aire.

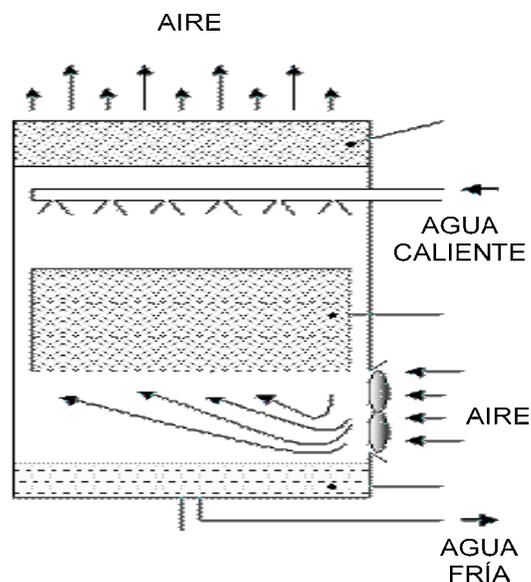


Figura 2 Torre de flujo a contracorriente y tiro forzado.



2.3.2.2. Las torres de tiro inducido

Las torres de tiro inducido pueden ser de flujo a contracorriente o de flujo cruzado. El flujo a contracorriente significa que el aire se mueve verticalmente a través del relleno, de manera que los flujos de agua y de aire tienen la misma dirección pero sentido opuesto como se muestra en la Figura 3. La ventaja que tiene este tipo de torres es que el agua más fría se pone en contacto con el aire más seco, lográndose un máximo rendimiento. En éstas, el aire puede entrar a través de una o más paredes de la torre, con lo cual se consigue reducir en gran medida la altura de la entrada de aire. Además, la elevada velocidad con la que entra el aire hace que exista el riesgo de arrastre de suciedad y cuerpos extraños dentro de la torre. La resistencia del aire que asciende contra el agua que cae se traduce en una gran pérdida de presión estática y en un aumento de la potencia de ventilación en comparación con las torres de flujo cruzado.

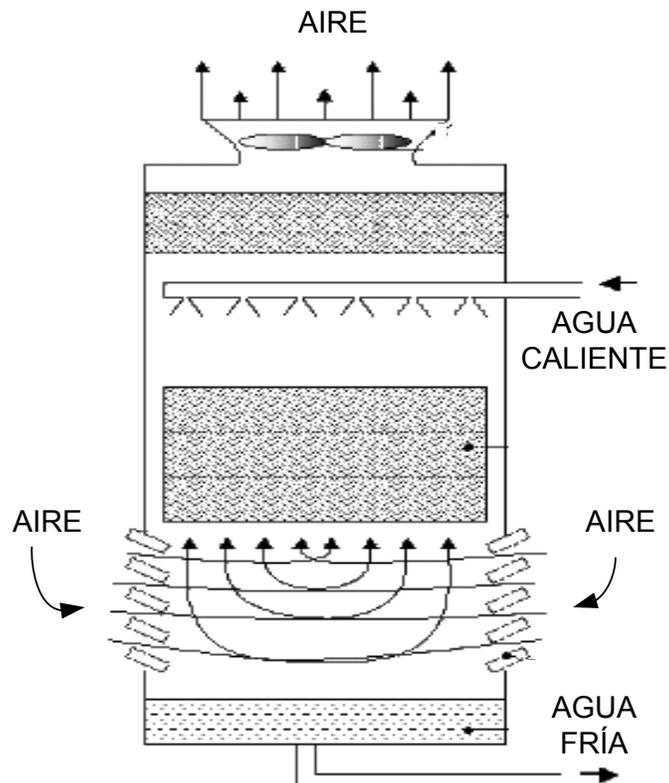


Figura 3 Torre de flujo a contracorriente y tiro inducido.



2.3.3. Las torres de flujo cruzado

En las torres de flujo cruzado el aire circula en dirección perpendicular respecto al agua que desciende como se muestra en la Figura 4. Estas torres tienen una altura menor que las torres de flujo a contracorriente, ya que la altura total de la torre es prácticamente igual a la del relleno. El mantenimiento de estas torres es menos complicado que en el caso de las torres a contracorriente, debido a la facilidad con la que se pueden inspeccionar los distintos componentes internos de la torre. La principal desventaja de estas torres es que no son recomendables para aquellos casos en los que se requiera un gran salto térmico y un valor de acercamiento pequeño, puesto que ello significará más superficie transversal y más potencia de ventilación, que en el caso de una torre de flujo a contracorriente (Tecnofiber, 2007).

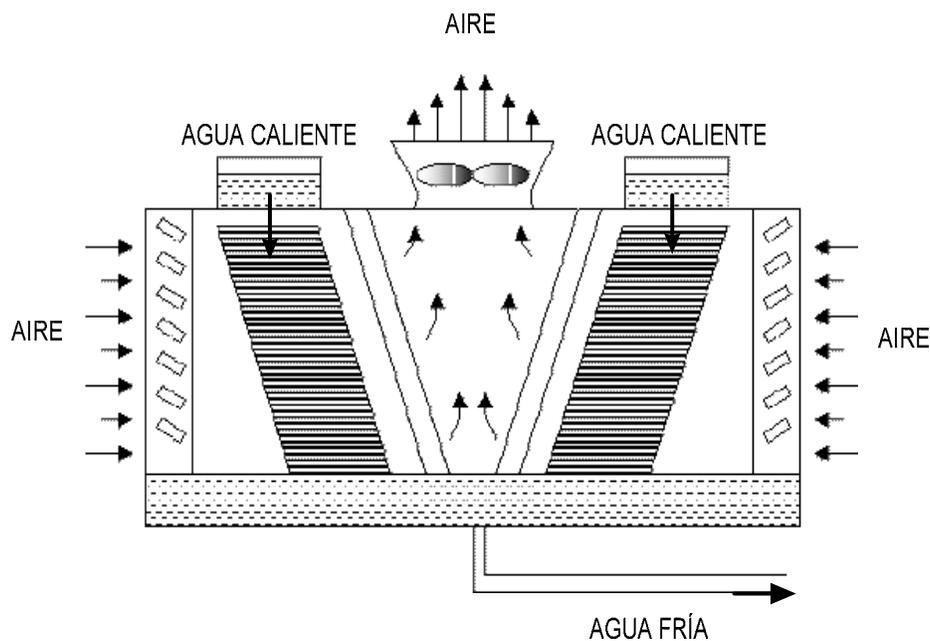


Figura 4 Torre de flujo cruzado (tiro inducido)



2.4. Comparación de tipos de torres

En la Tabla 1, se muestran las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de torres de enfriamiento definidas anteriormente.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de las torres de enfriamiento

Tipo de torre	Ventajas	Desventajas
Torre Atmosférica	<p>Ofrece bajos costos de mantenimiento.</p> <p>Ofrece costos de operación muy bajos, por no requerir fuerza en ventiladores.</p> <p>Poco mantenimiento y revisión.</p>	<p>Su costo inicial por construcción e instalación son altos, motivo por el cual no se utiliza en la actualidad.</p> <p>Su altura es grande</p> <p>Su intervalo de enfriamiento se afecta bastante por las condiciones ambientales del lugar, en comparación con las torres de tiro mecánico. La temperatura del agua fría nunca es cercana a la de bulbo húmedo.</p> <p>No debe existir obstrucciones en su localidad para bajas capacidades.</p>
Torre Atmosférica con espreas	<p>Puede cambiar la dirección del viento a base de mamparas en forma persianas.</p> <p>Requiere muy poco mantenimiento y revisión preventiva.</p> <p>Se usa cuando se manejan flujos muy pequeños.</p> <p>No consume energía eléctrica por ventiladores.</p>	<p>Son angostas pero de gran altura. Tienen pérdidas por arrastre de viento.</p> <p>Hay problemas de operación con las espreas.</p> <p>No tiene empaque alguno, lo cual afecta la eficiencia.</p> <p>Requiere de una colocación donde se aproveche mejor la dirección de vientos dominantes.</p> <p>Requiere de un alto consumo de energía por parte de las bombas de recirculación.</p>
Torre de tiro natural	<p>Sus pérdidas por arrastre son pequeñas No tiene equipo mecánico.</p> <p>El cascarón es de concreto su base es de madera o plástico y su empaque es de madera tratada.</p> <p>Apropiadas para grandes cantidades de agua de enfriamiento.</p>	<p>Su inversión inicial es muy alta porque no es flexible en su operación puesto que opera a base de una diferencia de densidades.</p> <p>Sólo tiene máxima eficiencia en invierno o cuando se instalan en lugares fríos o húmedos.</p> <p>Sólo se emplean cuando se tiene un gasto de recirculación mayor a los 100,000 GPM de lo contrario no son económicas.</p>

**Continua Tabla 1. Ventajas y desventajas de las torres de enfriamiento**

Tipo de torre	Ventajas	Desventajas
Torre de tiro forzado	El ventilador está antes del relleno metiendo aire a la torre por lo que no se requiere protección contra calor o humedad. Requieren de menos área efectiva para enfriamiento que la torre atmosférica.	Requieren de una altura mayor que las de tiro inducido. Tienen consumo de energía eléctrica en ventiladores y por bombeo de agua Tienen recirculación de vapores y aire caliente.
Torre de tiro forzado	Presentan menos pérdidas por arrastre de vientos, que las de tiro inducido.	Presentan canalizaciones del aire en lugar de tener reparto uniforme. Su eficiencia varía irregularmente.
Torre de tiro inducido con flujo a contracorriente	El ventilador se encuentra después del empaque sacando el aire caliente hacia arriba con mínima recirculación. La transferencia de calor es más eficiente que las otras. Área efectiva menor que las de tiro inducido de flujo cruzado.	Su altura es mayor que la de una inducida de tiro cruzado. Sus costos de operación comparados con los de una torre de tipo atmosférico son mayores. Mayores pérdidas por arrastre que las forzadas Tienen mayor caída de presión lo que aumenta el costo en comparación con las forzadas.
Torre de tiro inducido con flujo cruzado	El ventilador que está después del empaque saca el aire caliente de la torre sin recirculación. Tiene una altura menor que la de contracorriente. Ofrece menor costo por consumo de energía en ventiladores y bombas. Sirven para un gasto mayor de agua de recirculación con respecto a la torre atmosférica de tiro natural con espesas hasta 10,000 GPM como mínimo. Su acercamiento es mayor.	Requiere de más área de exposición. Tiene más pérdidas por arrastre. Ocupan mayor área que una torre de flujo a contracorriente aunque sus eficiencias son casi iguales para cualquier capacidad.

(Cruz, 1999)



2.5. Partes importantes de las Torres de enfriamiento

2.5.1. Bacín y cárcamo

Es el recipiente o cisterna en el cual cae el agua directamente del escurrimiento del empaque, se fabrica generalmente de concreto reforzado con varilla de acero, debe de ser hecha con desnivel con dirección donde se encuentra la succión de las bombas de recirculación.

Se debe tener extremo cuidado con el diseño del cárcamo ya que es una zona crítica y si está mal diseñado habrá problemas con la succión de las bombas de recirculación.

2.5.2. Distribuidores de agua

Se pueden clasificar en dos tipos, por gravedad y por presión.

- Por gravedad, cuando se tiene una caja con perforaciones de mismo diámetro con una distribución geométrica no al azar, esta caja generalmente puede ser de concreto de la misma estructura de la torre e incluso de acero.
- Por presión, cuando se tiene una tubería a la cual se le instalan espreas las cuales distribuyen el agua por el empaque en secciones circulares las espreas son generalmente de acero inoxidable.

2.5.3. Ventiladores motores

Los ventiladores son los equipos que facilitan el flujo de aire requerido para la transferencia de calor, por lo regular son fabricados de acero forjado con aspas de poliéster reforzado con fibra de vidrio en algunos casos son de hierro galvanizado en caliente con aspas de aluminio.

Los motores son los elementos que proporcionan la potencia para el movimiento del ventilador se recomienda que cuenten con una protección contra la humedad.



2.5.4. Eliminadores de niebla

Su función es de separa el agua que arrastra el aire de la salida de la torre, su forma principal hace que el aire tenga cambios de dirección ya que esta forma le ayuda a que las gotas de agua sean detenidas en el primer cambio de dirección que se encuentra, generalmente se fabrican de PVC (cloruro de polivinilo).

2.5.5. Persianas

Su función es de proporcionar la entrada de aire sin permitir la salida del agua por lo general están instaladas con ángulos inclinados y están construidas casi siempre del mismo material de las paredes de la torre.

2.5.6. Relleno o Empaque

Es el material con el cual está rellena la torre cuya finalidad es proporcionar el área de contacto para facilitar la transferencia de calor. El tipo de empaque determina el coeficiente de transferencia de más a en función de los flujos empleados generalmente son de materiales plásticos.

2.6. *Materiales de Construcción*

2.6.1. Estructura

La estructura de las torres de enfriamiento puede ser construida de madera, acero, concreto o poliéster reforzado con fibra de vidrio dependiendo del diseño de la torre y su aplicación. Para aplicaciones de proceso, químico y petroquímico la madera era común.

Las torres de estructura de concreto con interno de PVC o poliéster reforzado fibra de vidrio es lo más común aunque las torres más modernas utilizan estructura de poliéster reforzado con fibra de vidrio (FRP) y sólo la tornillería es de acero.

2.6.2. Rellenos

El relleno de madera tratada tiene propiedades tales como resistencia química, fuerza estructural el PVC es utilizado extensivamente y ofrece una excelente



resistencia química, sus propiedades de retardante de formación de fuego son superiores a la madera tratada, pero las propiedades mecánicas y las limitantes de temperatura necesitan una consideración para su aplicación. El polipropileno ofrece ambas resistencias químicas y una relación de costo que compite con la madera. El polipropileno es un material premium ya que se utilizan en lugares donde raramente existen heladas.

2.6.3. Equipo mecánico

Este es el corazón de la torre, por esta razón debe de ser diseñada para la operación continua bajo condiciones corrosivas debido a sus características, tiene mucha importancia en el proceso y la gran responsabilidad que existe con estos equipos. Existen fabricantes para el equipo mecánico junto con las torres pero no aplica a los motores.

2.6.4. Ventiladores

Los tipos de ventiladores adecuados son utilizados para entregar grandes cantidades de aire contra bajas presiones estáticas con una alta eficiencia de 80% menos en tamaños grandes. Las aleaciones de aluminio y fibra de vidrio dominan el mercado así como las refacciones.

Las fibras de vidrio o los termoplásticos son un estándar en los abanicos de cubierta. Para soldar la maquinaria es usualmente utilizado al acero inoxidable pero materiales como el níquel, cromo y cobre pueden ser sustituidas.

2.6.5. Reductores de velocidad

Los requerimientos son vigor y alta vida. Los reductores de velocidad deben ser construidos para el servicio continuo en un medio severo, como es el lugar donde se localizan. Muchos materiales de engranaje son utilizados.

La lubricación es vital para alargar, los servicios de garantía por problemas. Deberá tener una mirilla adecuada afuera del cilindro del ventilador para provocar un buen mantenimiento. Los lubricantes y los procedimientos de lubricación deberán ser seguidos cuidadosamente con las recomendaciones del proveedor (Cruz, 1999).



2.7. Definición de conceptos utilizados en el estudio de torres de enfriamiento

2.7.1. Capacidad térmica

La determinación de la cantidad de calor que se disipará en una torre es esencial pues no sólo afecta el tamaño de la torre sino también su efectividad. La capacidad térmica en una torre de enfriamiento se determina de acuerdo al proceso involucrado. Hoy en día existen un compendio de ecuaciones para llevar a cabo esta determinación además de tablas confiables en las que se muestra el calor absorbido por el agua de enfriamiento en diversos tipos de equipo energético, es decir, condensadores de vapor, compresores, motores diesel y motores de gas natural.

2.7.2. Temperatura de bulbo húmedo

Para hacer esta determinación deben tomarse en cuenta la naturaleza del proceso y las condiciones atmosféricas locales. La definición de este valor tendrá consecuencias en el diseño tamaño y selección del equipo de evaporación del agua de enfriamiento. La temperatura de bulbo de una mezcla de aire-agua proporciona una medida de la humedad de la mezcla; entre menos sea la humedad mayor será la diferencia entre la temperatura de bulbo húmedo con respecto al seco. Teóricamente, una torre de enfriamiento enfría el agua a la temperatura de bulbo húmedo (temperatura mínima a la cual el agua puede enfriarse). El acercamiento está en función de las condiciones térmicas y de la capacidad de la torre.

Es importante tener en cuenta la medición de la temperatura de bulbo húmedo (TBH) del aire de entrada, podrá medirse utilizando psicrómetros de aspiración mecánica que cumplan con los siguientes requerimientos:

1. El indicador deberá de estar graduado en incrementos de no más 0.11 °C de (0.2 °F)
2. La sensibilidad de temperatura del elemento deberá fijarse a ± 0.05 °C (0.1 °F)
3. La temperatura del elemento sensitivo deberá de protegerse de la acción directa de la luz del sol o de otras fuentes que irradian calor.



4. La temperatura del elemento sensitivo deberá de estar cubierta con una mecha y deberá estar continuamente alimentado el depósito de agua destilada.
5. La temperatura del agua destilada utilizada para humedecer el elemento sensitivo deberá de ser similar a la temperatura del bulbo húmedo a medir.
6. La mecha debe de cubrir el sensor al menos en 2 cm.
7. La velocidad sobre el elemento sensitivo de temperatura deberá de conservarse entre 17.3 a 19.2 km/h (950 a 1050 ft/min).
8. Deberán de colocarse dos psicrómetros uno a cada lado de la entrada de la celda, los psicrómetros deberán de colocarse a 4 pies de distancia de cada lado de la celda.

El promedio de 3 lecturas sucesivas tomándose en un intervalo de 10 segundos en cada estación se considera la TBH para cada lectura; el promedio aritmético de las TBH tomadas en los dos lados de la celda se considera la temperatura de TBH de prueba (CONAE, 2005).

2.7.3. Diferencial de temperatura

Es la diferencia que existe entre las temperaturas del agua a la entrada y la salida de la torre, es una variable que nos indica cuantos grados enfría la torre. La temperatura de entrada tiene influencia de los vapores de la recirculación, para fines prácticos no cuenta esa influencia.

2.7.4. Gasto o flujo

Es el volumen de agua que recircula a través de la torre esta reportado regularmente en GPM. Esta variable está íntimamente relacionada con el intervalo de temperaturas pues un aumento en el gasto ocasionando una disminución en el intervalo de enfriamiento. Además esta variable es de utilidad para dimensionar la torre.



2.7.5. Intervalo

Se expresa de acuerdo a la Ec. 1, que indica la relación entre la capacidad térmica y el flujo de recirculación en la torre; depende de las características de operación del equipo.

En general, los intervalos pueden clasificarse como cortos 2.77 a 5.55 °C (5 a 10°F), medianos 5.55 a 0.13.88°C (10 a 25°F) y largos 13.88 a 36.11 °C (25°F a 65°F). Los intervalos cortos se utilizan en acondicionamiento de aire, refrigeración y algunos procesos críticos, los intervalos medianos en plantas generadoras de condensados de vapor entre otro, los intervalos largos se utilizan generalmente en refinerías y fundadoras de acero. El intervalo de una torre se puede determinar con la ecuación 1.

$$\text{Intervalo}(\text{°F}) = \frac{\text{Capacidad}_\text{térmica}(\text{BTU}/\text{min})}{\text{flujo}(\text{lbagua}/\text{min})} \quad \text{Ecuación 1}$$

o también $\text{Intervalo}(\text{°F}) = \frac{\text{BTU}/\text{min}}{\text{GPM} * 8.33}$

2.7.6. Acercamiento o aproximación

Es la variable más importante en el espacio de las temperaturas de una torre pues se trata de la diferencia entre la temperatura del agua fría y la temperatura de bulbo húmedo que como se estableció en la temperatura de bulbo húmedo es la mínima temperatura que puede enfriarse el agua.

El acercamiento es el que puede tener mayor influencia en el tamaño y en el costo de la torre, porque a una capacidad térmica dada, el tamaño de la torre disminuye conforme el acercamiento aumenta.

2.7.7. Ciclos de concentración

Es el número de ciclos que completa el agua de la torre antes de ser purgada. Recibe el nombre de ciclos de concentración debido a que el agua de la torre se evapora a las condiciones ambientales y los sólidos presentes en ella se van concentrando; cuando la acumulación de sólidos en el bacín es elevada es necesario purgar.



2.7.8. Pérdidas

En una torre de enfriamiento existen tres tipos de pérdidas de agua las cuales se definen de la siguiente manera:

1. *Pérdidas por arrastre (P_A)*: se deben a la presencia del viento que se lleva consigo pequeñas gotas de agua, este tipo de pérdidas es muy común en torre de tiro inducido y de tiro forzado pues el viento pasa a través de la torre, las pérdidas por arrastre en las torres de tiro atmosférico son casi nulas.
2. *Pérdidas por evaporación (P_E)*: pueden alcanzar porcentajes significativos en lugares donde la temperatura ambiente es alta la mayor parte del año y por ende la evaporación del agua es constante y está en función de la diferencia de temperatura.
3. *Pérdidas por Purga (P_P)*: se lleva a cabo para regular los ciclos de concentración de una torre y son consecuencia directa de los tipos de pérdidas antes mencionadas así como de la calidad del agua. Debido a que el agua de la torre empieza a evaporarse y los sólidos empiezan a concentrarse. Llega un momento donde los sólidos están tan concentrados que es necesario aplicar la purga para eliminarlos en su mayoría. El número de ciclos que completa el agua de la torre antes de ser purgada recibe el nombre de *ciclos de concentración (c.c.)*. Los ciclos de concentración pueden calcularse en base sílice o en base conductividad o simplemente haciendo la diferencia entre la concentración de sílice o la conductividad a la entrada y a la salida de la torre (López, 2001).

2.8. Evaluación de la capacidad de enfriamiento de la torres

La evaluación térmica de una torre de enfriamiento consiste en la elaboración de balances de materia y energía de un sistema abierto. En el balance de materia se evalúan las entradas (repuesto o “make up”) y las salidas de agua (evaporación “evaporation”, purga o “blowdown” y arrastre o “windage”). Para el balance de energía se utilizan tres metodologías diferentes: 1) Método de



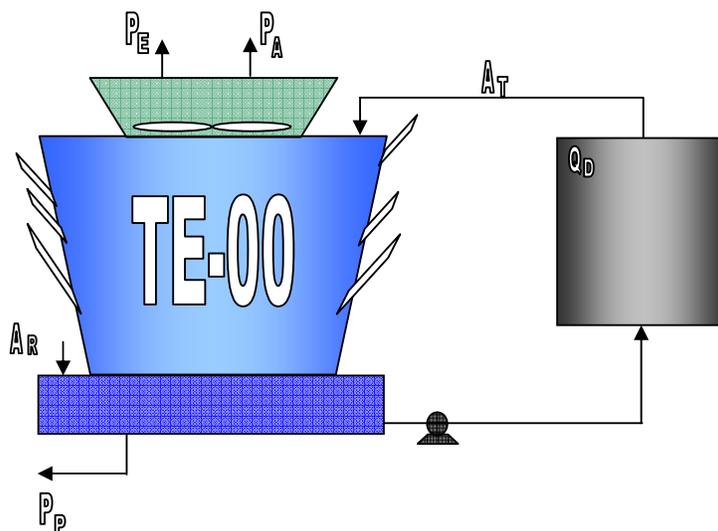
curvas, 2) Método de Merkel, y 3) Alternativo. A continuación se presentan las ecuaciones utilizadas para la realización de los balances antes mencionados (CONAE, 2005).

2.8.1. Balance de materia y energía

2.8.1.1. La simbología usada en el balance:

Variable	Descripción	Unidades
A_T	Flujo de agua de enfriamiento	GPM
P_E	Pérdidas por Evaporación	GPM
P_P	Pérdidas por Purga	GPM
P_A	Pérdidas por Arrastre	GPM
A_R	Agua de Repuesto	GPM
TAF	Temperatura de agua Fría	°F
TAC	Temperatura de agua Caliente	°F
c.c.	Ciclos de Concentración	
Q_D	Calor Disipado	BTU/h
C_P	Capacidad Calorífica del agua	1 BTU/h °F

En la Figura 5, se muestra la nomenclatura utilizada en el balance de materia y energía.



**Figura 5 Nomenclatura del balance de materia****2.8.1.2. Cálculo de balance de materia**

Para el cálculo de pérdidas por evaporación, se utiliza la ecuación 2.

$$P_E = 0.001x A_T x (TAC - TAF) \quad \text{Ecuación 2.}$$

Para el cálculo de pérdidas por arrastre, se utiliza la ecuación 3.

$$P_A = 0.002x A_T \quad \text{Ecuación 3.}$$

En el cálculo de la purga, se utiliza la ecuación 4.

$$P_P = \frac{P_E}{c.c. - 1} - P_A \quad \text{Ecuación 4.}$$

Volumen de repuesto se utiliza la ecuación 5.

$$A_R = P_E + P_A + P_P \quad \text{Ecuación 5.}$$

Para el cálculo de los ciclos de concentración se utiliza la ecuación 6.

$$c.c. = \frac{A_R}{P_P + P_A} \quad \text{Ecuación 6.}$$

2.8.2. Cálculo de disipación de calor

La disipación de calor es la cantidad de energía requerida para llevar a cabo el fenómeno de enfriamiento de agua. El cálculo de la disipación de calor se realiza con la ecuación 7.

$$Q_D = A_T x (TAC - TAF) x C_p x 501 \quad \text{Ecuación 7.}$$

Donde: 501 = Factor de conversión a BTU/h.

2.8.3. Cálculo de % de capacidad de enfriamiento

De acuerdo al código CTI - ATC - 105, el % de capacidad de enfriamiento se obtiene mediante la ecuación 8.



$$\% \text{ de Capacidad} = \frac{\left(\frac{L}{G}\right)_{DISEÑO}}{\left(\frac{L}{G}\right)_0} \times 100 \quad \text{Ecuación 8.}$$

En donde:

$\left(\frac{L}{G}\right)_{DISEÑO}$ = Relación de diseño del flujo de agua con respecto al flujo de aire seco, en $[lb \text{ agua} / lb \text{ aire} \text{ sec o}]$

$\left(\frac{L}{G}\right)_0$ = Relación corregida del flujo de agua con respecto al flujo de aire seco, este valor se determina en una gráfica que posteriormente se determina con los valores de $\left(\frac{L}{G}\right)$ y $\left(\frac{KaV}{L}\right)$ de diseño y prueba $[lb \text{ agua} / lb \text{ aire} \text{ sec o}]$
 % de capacidad = % de capacidad de una celda de la torre.

Para el cálculo de $\left(\frac{L}{G}\right)_0$, se necesita primero obtener el $\left(\frac{L}{G}\right)_{PRUEBA}$ y $\left(\frac{KaV}{L}\right)_{PRUEBA}$

Cálculo del $\left(\frac{L}{G}\right)_{PRUEBA}$

El cálculo del $\left(\frac{L}{G}\right)_{PRUEBA}$ se determina mediante la ecuación 9.

$$\left(\frac{L}{G}\right)_{PRUEBA} = \left(\frac{L_{PRUEBA}}{L_{DISEÑO}}\right) \times \left(\frac{BHP_{DISEÑO}}{BHP_{PRUEBA}}\right)^{1/3} \times \left(\frac{L}{G}\right)_{DISEÑO} \quad \text{Ecuación 9}$$

En donde:

L_{PRUEBA} = Flujo de agua de prueba, (GPM).

$L_{DISEÑO}$ = Flujo de agua de diseño, (GPM).

BHP_{PRUEBA} = Es la potencia al freno del ventilador de prueba, determinada a partir del voltaje y amperaje y factor de potencia del motor del ventilador en (HP).

$BHP_{DISEÑO}$ = Es la potencia al freno del ventilador de diseño, proporcionada por el fabricante, o calculada a partir de datos de diseño o nominal, en (HP).

$\left(\frac{L}{G}\right)_{PRUEBA}$ = Relación de diseño de flujo de agua con respecto al flujo de aire seco.

Para el cálculo de la potencia al freno del ventilador “BHP de prueba” La potencia al freno del ventilador “BHP de prueba” se calcula mediante la ecuación 10 ó 11 dependiendo el tipo del motor.



$$BHP_{PRUEBA} = \frac{\sqrt{3} \times V \times A \times F.P.}{0.7457 \times 1000} \text{ para un motor trifásico} \quad \text{Ecuación 10.}$$

$$BHP_{PRUEBA} = \frac{V \times A \times F.P.}{0.7457 \times 1000} \text{ para un motor monofásico} \quad \text{Ecuación 11.}$$

En donde:

$\sqrt{3}$ = valor para el motor trifásico del ventilador (adimensional).

V = Voltaje del motor del ventilador, este valor se toma, (Volts).

A = Amperaje del motor del ventilador, este valor se toma, (Ampere).

F.P. = Factor de potencia del motor del ventilador, este valor es adimensional.

0.7457 = Factor de conversión de Watts a HP (1 HP = 0.7457 kW).

1000 = Valor para convertir watts a kilowatts (1 kW = 1000 W).

BHP de prueba = Potencia al freno del ventilador de prueba BHP, en caballos de potencia (HP).

2.8.4. Cálculo del BHP de diseño

El BHP de diseño, se obtiene de la hoja de datos de la torre, en caballos de potencia (HP). En caso de que no se cuente con este valor se deberá calcular mediante la ecuación 12.

$$BHP_{DISEÑO} = \frac{ACFM * \Delta P_{TOTAL}}{6356 * \eta^{RED} * \eta^{VENT}} \quad \text{Ecuación 12.}$$

En donde:

ACFM = Cantidad de aire real incluyendo agua evaporada, en pies por minuto (ft/min).

ΔP_{TOTAL} = Caída de presión total que tiene que vencer el ventilador. Es decir, incluye la presión estática total (pérdidas a través de la torre, más la presión de velocidad), en pulgadas de agua (pulg H₂O).

η^{RED} = Eficiencia del reductor de velocidad, en porcentaje (%).

η^{VENT} = Eficiencia del ventilador, en porcentaje (%).

6356 = Factor de conversión, para obtener potencia.

BHP diseño = Potencia al freno de diseño a la entrada del motor, (HP).



2.8.5. Cálculo de presión de velocidad

Cálculo de presión de velocidad en la salida del ventilador (PVS) se realiza con la ecuación 13.

$$PVS = \left| \frac{Vs^2}{1096.5 / (\rho)^{1/2}} \right| = (\text{pulg H}_2\text{O}) \quad \text{Ecuación 13.}$$

Cálculo de presión de velocidad en la garganta del ventilador (PVG).se realiza con la ecuación 14.

$$PVG = \left| \frac{Vg^2}{1096.5 / (\rho)^{1/2}} \right| = (\text{pulg H}_2\text{O}) \quad \text{Ecuación 14.}$$

En donde:

ρ = Densidad del aire saliente de la torre, en libras por pie cúbico (lb/ft³).

PVS = Presión de velocidad a la salida, (pulg de H₂O).

PVG = Presión de velocidad en la garganta, (pulg de H₂O).

2.8.6. Cálculo de la presión total

Se realiza mediante las ecuaciones 15, 16 y 17

$$REC = \eta^{REC} \cdot (PVG - PVS) \quad \text{Ecuación 15.}$$

$$PVREC = PVG - REC \quad \text{Ecuación 16.}$$

$$\Delta P_{TOTAL} = P_{est.tot} + PVREC = [\text{pulg H}_2\text{O}] \quad \text{Ecuación 17.}$$

El valor obtenido de ΔP_{TOTAL} y los valores del por el fabricante (ACFM, η^{RED} , η^{VENT}), se sustituye en la ecuación 12 para obtener el BHP de diseño.

En donde:

REC = Recuperación de velocidad, (pulg H₂O).

PVREC = Presión de velocidad recuperada, (pulg H₂O)

ΔP_{TOTAL} = Caída de presión total en la torre de enfriamiento, en (pulg H₂O).



En caso de no contar con el BHP del fabricante de la torre de enfriamiento, se puede obtener un valor preliminar del BHP de diseño, utilizando la potencia nominal del motor del ventilador.

2.8.7. Cálculo del $\left(\frac{KaV}{L}\right)_{PRUEBA}$

Éste se calcula de acuerdo a las ecuaciones 18 y 19.

$$\left(\frac{KaV}{L}\right)_{PRUEBA} = \int_{TAF}^{TAC} \frac{dT}{h_w - h_a} \quad \text{Ecuación 18.}$$

$$\left(\frac{KaV}{L}\right)_{PRUEBA} = \left(\frac{TAC - TAF}{4}\right) \times \left(\left(\frac{1}{\Delta h1}\right) + \left(\frac{1}{\Delta h2}\right) + \left(\frac{1}{\Delta h3}\right) + \left(\frac{1}{\Delta h4}\right)\right) \quad \text{Ecuación 19.}$$

En donde:

$$\left(\frac{KaV}{L}\right)_{PRUEBA} = \text{Valor característico de la torre,}$$

$\int \frac{dT}{h_w - h_a}$ Representa el perfil de temperaturas, en la torre para $TAF_{hw-h a}$.

Calcular la transferencia de calor, la integral se resuelve por el criterio de Merkel, evaluando por incrementos, y se estiman cuatro temperaturas en la torre; a éstas temperaturas se calcula la entalpía de la mezcla de aire agua y posteriormente se calcula la entalpía de la corriente de aire, evaluando así a la integral, el procedimiento es el siguiente:

Determinación del perfil de las cuatro temperaturas.

$$T1^* = TAF + 0.1 (TAC-TAF) \quad \text{Ecuación 20.}$$

$$T2^* = TAF + 0.4 (TAC-TAF) \quad \text{Ecuación 21.}$$

$$T3^* = TAC - 0.4 (TAC-TAF) \quad \text{Ecuación 22.}$$

$$T4^* = TAC - 0.1 (TAC-TAF) \quad \text{Ecuación 23.}$$



En donde:

T1*, T2*, T3* y T4* son las temperaturas estimada en los puntos (1, 2, 3 y 4) del perfil de temperatura.

El cálculo de las diferentes temperaturas se encuentra en el anexo 1 y la grafica de entalpías en el anexo 2.

2.8.8. Cálculo de la entalpía del aire:

La entalpía del aire se determina mediante la ecuación 24.

$$hg2 = (L / G)_{\text{prueba}} \times (TAC - TAF) + hgi \quad \text{Ecuación 24.}$$

Se calcula el perfil de entalpías del aire en los cuatro puntos de la torre (Criterio de Merkel), mediante las ecuaciones 25, 26, 27 y 28.

$$ha1 = hgi + 0.1 (TAC - TAF) * (L/G)_{\text{PRUEBA}} \quad \text{Ecuación 25.}$$

$$ha2 = hgi + 0.4 (TAC - TAF) * (L/G)_{\text{PRUEBA}} \quad \text{Ecuación 26.}$$

$$ha3 = hg2 - 0.4 (TAC - TAF) * (L/G)_{\text{PRUEBA}} \quad \text{Ecuación 27.}$$

$$ha4 = hg2 - 0.1 (TAC - TAF) * (L/G)_{\text{PRUEBA}} \quad \text{Ecuación 28.}$$

En donde:

$(L/G)_{\text{PRUEBA}}$ = Relación de prueba del flujo de agua con respecto al flujo de aire seco (lb agua / lb aire seco).

TAC = Temperatura de agua caliente, en (°F).

TAF = Temperatura de agua fría, en (°F).

hgi = Entalpía del aire a la temperatura de bulbo húmedo, (BTU / lb aire seco).

hg2 = Entalpía del aire, en (BTU / lb aire seco).

ha1, ha2, ha3 y ha4 = Entalpías del aire en los puntos 1, 2, 3 y 4

Se calcula la diferencia de entalpía de la mezcla aire-agua y la entalpía del aire, mediante la ecuación 29 de los 4 puntos:



$$\Delta h_1 = h_{w1} - h_{a1} \quad \text{Ecuación 29.}$$

2.8.9. La obtención del $\left(\frac{L}{G}\right)_0$

La relación de flujo de agua y líquido corregido $\left(\frac{L}{G}\right)_0$, se hace gráficamente, mediante el uso de la curva característica de la torre de enfriamiento, la cual se presentan dos curvas, una para obtener los datos en general y otra para cálculos posteriores.

2.8.10. Cálculo de la capacidad actual de la torre

En la ecuación 30, se sustituyen los valores anteriormente obtenidos.

$$\% \text{ de Capacidad} = \frac{\left(\frac{L}{G}\right)_0}{\left(\frac{L}{G}\right)_{\text{DISEÑO}}} \times 100 \quad \text{Ecuación 30.}$$

2.8.11. Determinación de la capacidad

Es el flujo que puede enfriar la torre a las condiciones medidas.

El valor obtenido en la expresión anterior es multiplicado por el flujo de diseño como lo muestra la ecuación 31.

$$\% \text{ de Capacidad real} = \text{Flujo de diseño} \times \% \text{ de capacidad} \quad \text{Ecuación 31.}$$

2.8.12. Determinación de la eficiencia Térmica

Esta eficiencia es determinada mediante la relación entre la disipación de calor experimental y disipación de calor de diseño, el cual es calculado a partir de los criterios de diseño conforme la ecuación 32 (Martínez, 1999).

$$E_T = \frac{Q_{\text{exp}}}{Q_{\text{dis}}} \quad \text{Ecuación 32.}$$

Donde:

Q_{exp} = Disipación de Calor Experimental.

Q_{dis} = Disipación de Calor de Diseño (CONAE, 2005).



2.9. Caso de estudio

La torre de enfriamiento TE-00 es una torre construida de concreto armado de tiro inducido a flujo cruzado de 6 celdas y un ventilador por celda, diseñada para una capacidad total de 60,000 GPM con un intervalo de 18 °F con pérdidas máximas de arrastre y evaporación de 569.36 GPM operando con agua cruda de pozo.

En la Tabla 2, se presentan los datos de diseño de la torre TE-00.

Tabla 2. Datos de diseño de la torre TE-00

CONCEPTO	TE-00
Año puesta en servicio	1990
Material de construcción	Concreto
Capacidad	13,627.5 m ³ /h (60,000 GPM)
Temperatura de agua caliente	42 °C (107.6 °F)
Temperatura de agua fría	32 °C (89.6°F)
Temperatura de bulbo húmedo	28 °C (82.4 °F)
Pérdidas por arrastre máximo	0.15 m ³ /h (0.66 GPM)
Pérdidas por evaporación máxima	129.2 m ³ /h (568.7 GPM)
No. de celdas	6
Ciclos de concentración	3 A 5
No. de ventiladores por celda	1
No. total de ventiladores	6
Diámetro de los ramales de la torre de enfriamiento	4" Polipropileno
Volumen del bacín	3,202 m ³ (113,007 ft ³)
Volumen del sistema	4,213 m ³ (148,781 ft ³)
L/G	1.8
KaV/L	2.47

La torre de enfriamiento TE-00 se encuentra actualmente operando en un 61.16 % por debajo del intervalo de diseño, lo cual ocasiona que se necesite más flujo de agua, eso significa grandes pérdidas económicas por recircular más agua para enfriamiento, cabe mencionar que los componentes mecánicos, motores de bombas y ventiladores operan normalmente.



3. METODOLOGÍA

En este trabajo de tesis se determinó la eficiencia del funcionamiento de una torre de enfriamiento; se evaluó su operación actual con respecto a las especificaciones de diseño, para dar una propuesta de modernización. Para lo anterior se necesitó realizar los balances de materia y energía de la operación actual, consultar información de los fabricantes de las torres de enfriamiento y hacer mediciones en el sitio de temperaturas, flujo de agua y aire.

En la Figura 6 se muestra los principales pasos para la evaluación de una torre de enfriamiento.

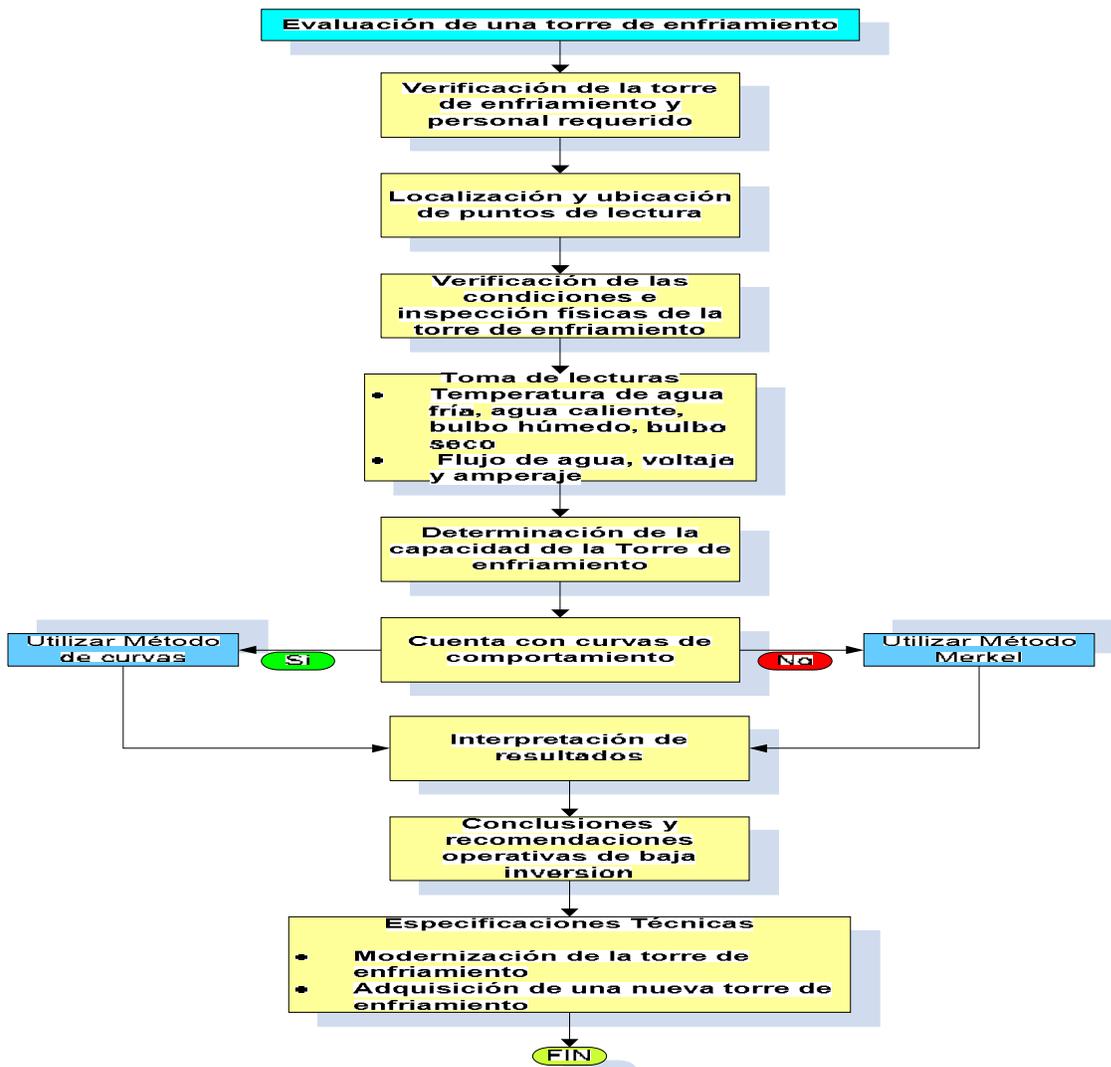


Figura 6 Procedimiento para evaluar una torre de enfriamiento



3.1. Inspección física de una torre de enfriamiento

Partiendo de lo general a lo específico se deben examinar cada una de las partes de una torre de enfriamiento, lo que se busca es que el operador y/o técnico tenga una herramienta de apoyo en la inspección de los equipos, ya que por tiempos o espacios se dificultan los trabajos en campo y por medio de la guía lograr que el trabajo sea más eficiente sin olvidar detalles importantes para la evaluación del equipo.

3.1.1. Limpieza de las torres

Una torre sucia es un factor indeseable, debido a que puede presentar crecimiento biológico (hongos, musgos, algas) que afectan su capacidad térmica. Es importante examinar periódicamente el agua de la torre para saber si hay un buen tratamiento químico. La inspección debe incluir, una evaluación visual de la condición del agua, del bacín de agua fría y del cárcamo de distribución.

Un control biológico bueno conlleva a tener agua limpia, clara y sin algas. Un control pobre es detectado por el agua sucia y maloliente. Si las condiciones observadas indican un control biológico pobre, se debe limpiar el bacín de agua fría y el sistema de tratamiento de aguas debe ser evaluado.

3.1.2. Pared externa de la torre

Buscar fugas de agua, grietas, agujeros o deterioro general, incluyendo fugas de aire entre los paneles que conforman las paredes. Cerciorándose de que la tornillería que une los paneles a la estructura de la torre esté en buenas condiciones. Examinar, según sea el caso, los materiales de la cubierta, señas de corrosión en el acero, putrefacción, deslaminación y decaimiento de madera. Buscar grietas en las cubiertas de fibra de vidrio.



3.1.3. Acceso a la torre de enfriamiento

Revisar que las puertas de acceso funcionen adecuadamente, buscar indicadores de corrosión, pérdida de partes, acumulación de basura que impida el libre acceso y por último asegurarse que las puertas estén cerradas si la torre se encuentra en operación.

3.1.4. Estructura

La estructura comprende: diagonales, traveses, vigas y soportes. De éstas hay que examinar los componentes de acero, para saber si hay evidencia de corrosión y pérdida de metal. Revisar la tensión de las juntas, observar de cerca la soldadura de los empalmes de acero galvanizado buscando presencia de corrosión o de desprendimiento de concreto en toda la estructura de la torre.

3.1.5. Persianas

Revisar que las persianas estén debidamente colocadas en los soportes, buscar cualquier daño en las persianas como; corrosión, putrefacción (en caso de que las persianas estén echas de mader) o pérdida de metal Observar si hay crecimiento biológico excesivo. Revisar los soportes de las persianas y conexiones a la misma torre. En caso de requerir repuestos observar el arreglo, y anotar el espaciamiento vertical de las persianas.

3.1.6. Escaleras

Revisar que las persianas estén debidamente colocadas en los soportes, buscar cualquier daño en las persianas como; corrosión, putrefacción en madera (en caso de que las persianas estén echas de madera) o pérdida de metal. Observar si hay crecimiento biológico excesivo. Revisar los soportes de las persianas y conexiones



a la misma torre. En caso de requerir repuestos observar el arreglo, y anotar el espaciamiento vertical de las persianas.

3.1.7. Barandales

Revisar principalmente las conexiones entre el barandal y la torre, éstas deben estar apretadas y en buenas condiciones, buscar indicativos de corrosión o pérdida de metal, revisar las condiciones generales del material. Revisar la soldadura en barandales de acero y aluminio.

3.1.8. Pasillos

Las torres de enfriamiento cuentan con pasillos, descansos y andadores para el acceso a los diferentes componentes que la conforman. Hay torres que no cuentan con las protecciones necesarias en los pasillos por lo que todo tipo de trabajos deben ser suspendidos para disminuir los riesgos.

Buscar daños y fracturas en los andadores y pasillos. Examinar los pasos de acero para saber si hay evidencia de corrosión. Prestar atención a daños que comprometan la seguridad de los operadores.

3.1.9. Bacín de agua fría

Revisar si hay acumulación de lodo y escombros ya que proporciona un ambiente ideal para el crecimiento de bacterias. Ver las condiciones generales del cárcamo de bombeo y reja del cárcamo de bombeo la cual debe estar libre de sólidos. Observar cualquier índice de corrosión o pérdida de metal en componentes del bacín de agua fría. Inspeccionar la madera, el acero y la fibra de vidrio cuidadosamente para ver cualquier señal de fugas o fracturas en los materiales.



3.2. Internos de una torre de enfriamiento

Los componentes internos de las torres son más difíciles de evaluar debido al acceso. Por condiciones de proceso no es posible parar los equipos para hacer una evaluación a fondo, por lo que en su mayoría se evaluarán los componentes internos por su estado en general.

3.2.1. Bacín de agua caliente

Dependiendo el tipo de torre de enfriamiento puede tener un bacín o una red de distribución de agua, observar si existe daño en las partes de madera y acero, revisar el deterioro, decaimiento o corrosión. Buscar fugas entre las tinas colindantes. Examinar detenidamente el estado de los soportes y juntas del acero o fibra de vidrio.

3.2.2. Tubería

Examinar las tuberías para ver señas de corrosión, fracturas, fugas y falta de recubrimiento, revisar los soportes, para asegurar que el equipo trabaje continuamente. Buscar fugas en bridas e instrumentos, daños en tuberías de PVC o de la fibra de vidrio.

3.2.3. Válvulas de control de flujo

Por lo general se tiene una válvula de control por cada celda de éstas, se examinan los componentes para saber si hay corrosión o muestras de desgaste, finalmente buscar fugas en las bridas. Operar las válvulas manualmente al 100% de apertura y reajustar para balancear el flujo en cada celda de la torre.



3.2.4. Boquillas de distribución

Ya sean boquillas o inyector comprobar que no se encuentren tapados y que no muestren desgaste en la parte interna, en caso de requerirse desmontar la boquilla o inyector temporalmente para buscar obstáculos en su interior. Buscar cualquier pérdida de material resultando de la corrosión o de la erosión. Comprobar que las boquillas estén correctamente ensambladas al bacín de agua caliente para evitar que el agua pase en chorros.

3.2.5. Relleno

Para rellenos de tipo salpiqueo revisar la caída de agua si es tipo lluvia o en chorros, buscar piezas pandeadas, rotas o piezas que tengan diferente tamaño con respecto a las demás, buscar también piezas caídas o mal colocadas. Revisar el estado de las mallas de acero, buscar indicios de corrosión y que la soldadura esté en buen estado. Si una sección de la malla muestra daño excesivo, debe ser sustituido. Revisar también, los soportes donde se sostiene la malla. Para el relleno tipo película, revisar si hay acumulación de algas u otro tipo de contaminantes en la superficie de las hojas que conforman el relleno. También observar si hay erosión, hojas combas, rasgadas o con evidencia de daño por hielo. Revisar el estado de los soportes del empaque.

3.2.6. Eliminador de niebla

Asegurarse que todas las salidas de aire estén libres de basura. Revisar que el eliminador esté correctamente instalado, el estado del sello para evitar que pase el agua a través de los eliminadores y evitar la pérdida o deterioro de los sellos. En caso de que los marcos y eliminadores estén sujetos a condiciones de operación severas, verificar el estado de putrefacción o decaimiento de los materiales.



3.2.7. Ventilador

Para torres con ventiladores centrífugos, revisar que no tenga aspas rotas o fracturadas, buscar señales de corrosión o erosión en las láminas, particularmente cerca de la soldadura. Revisar las condiciones generales de las guardas y del buje que se encuentra entre la carcasa y la flecha.

3.2.8. Reductor de velocidad

Con el ventilador apagado revisar el nivel de aceite. Tomar una muestra de aceite y buscar evidencia de agua, residuos de metal o lodo. Revisar los sellos para saber si hay fugas de aceite (particularmente los sellos del piñón). Revisar el juego de la flecha moviéndola verticalmente de atrás hacia adelante, observando el movimiento libre que se tiene. Observar también el juego lateral levantando la flecha. Tomar la punta de un aspa del ventilador y mover verticalmente el aspa para observar el juego de la flecha de salida del reductor.

3.2.9. Flecha de transmisión

Comprobar la alineación de la flecha usando cualquier método aprobado, como un indicador o dispositivo óptico. Buscar señales de corrosión o daños en el tubo, particularmente cerca de la soldadura. Revisar todas las conexiones entre el tubo y los elementos flexibles, buscando signos de corrosión y fatigas en los elementos metálicos flexibles.

3.2.10. Chimenea o cono venturi

Revisar las condiciones generales del material, particularmente en las partes de acero y soldaduras del cono, revisar las condiciones y esfuerzos de los



ensamblajes y tornillería que sujeta al cono con la torre. Buscar cualquier fuga de aire entre las piezas que conforman el cono.

3.2.11. Válvula de agua de repuesto

Revisar las bridas y los componentes de la válvula buscando fugas de agua o señales de corrosión. Operar la válvula de agua de repuesto o el interruptor del flotador manualmente al 100% de apertura y reajustar el flujo para cerciorarse de que la válvula opere correctamente (Cruz, 2007).

Después de la inspección a los equipos y partes importantes de la torre se miden las variables de temperatura y flujo.

3.3. Mediciones de temperatura

Las mediciones de temperatura se realizan de manera, que el monitoreo dure un cierto tiempo, se puede recomendar que sea cada cuatro horas durante tres días lo cual ayuda a observar el perfil de temperatura que muestra la torre el cual debe de tener el intervalo sin presentar picos sin tendencia. La función del clima del lugar donde está localizada es un factor muy importante ya que puede modificar el funcionamiento de la torre. En la Figura 7, se representa el perfil de temperatura el cual cuenta con una tendencia la cual se puede identificar las temperaturas del día (más calientes) a las de la noche (más frías), si el perfil presentara picos pudieran ser producidos por alguna mala lectura de la temperatura o algún caso de mala operación de algún equipo de bombeo o de transferencia de calor (CONAE, 2005).

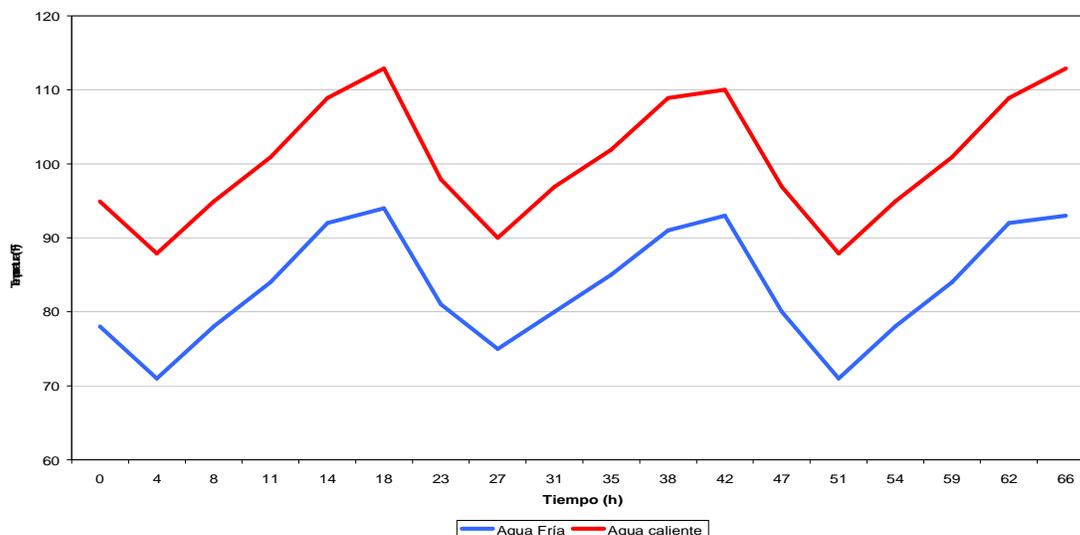


Figura 7 Perfil de temperatura

En la Tabla 3, se presentan los registros de temperatura de agua fría, agua caliente, bulbo húmedo, bulbo seco y humedad relativa que corresponden a la operación actual de la torre.

Tabla 3. Temperaturas de la torre TE-00

TEMPERATURAS	TORRE DE ENFRIAMIENTO
	TE-00
Temperatura de agua caliente, °F (°C)	100.6 (38.1)
Temperatura de agua fría, °F (°C)	93.7 (34.3)
Temperatura de bulbo seco, °F (°C)	85 (29.4)
Temperatura de bulbo húmedo, °F (°C)	81.2 (27.3)
Temperatura de agua caliente – fría, °F (°C)	16.9 (3.8)
Temperatura de agua fría - T bulbo húmedo, °F (°C)	22.5 (7)

3.4. Mediciones de flujo en tubería cerrada

Existen por lo general dos tipos de medidores ultrasónicos que son empleados para medir el gasto en tubería cerrada. El primero de ellos, denominado tiempo en tránsito (Transit-Time), emplea señales acústicas mediante la transmisión de pulsos. El segundo denominado de efecto Doppler, emplea la transmisión de una



onda continua. Estos dos tipos de medidores pueden ser considerados como complementarios, más que competitivos. Los medidores acústicos de efecto Doppler fueron considerados más versátiles en un principio, debido a su funcionalidad en flujos con una gran cantidad de aire y sólidos suspensión. Sin embargo, y debido al desarrollo de microprocesadores que permiten la transmisión multipulsos y con ello una mayor precisión bajo circunstancias difíciles del flujo, los medidores de tiempo en tránsito han recibido una mayor aceptación los últimos años, siendo desarrollados prototipos con un menor costo y mayor precisión que los de efecto Doppler.

Las mediciones de los flujos en tubería cerrada fueron realizadas con los medidores de flujo ultrasónico portátil de efecto Doppler, Thermo-polisonics X30 y Transit-Time GL Panametrics TP 787.

3.4.1. Preparación del sitio de medición

Con la finalidad de garantizar que el equipo de medición registre lectura de flujo es necesario realizar una serie de actividades previas a la obtención de lecturas de flujo adecuadas, las cuales se encuentran detalladas en el (anexo 3). En la Figura 8, se muestra un mapa conceptual de los pasos para la preparación del sitio de medición de flujo en tubería cerrada.

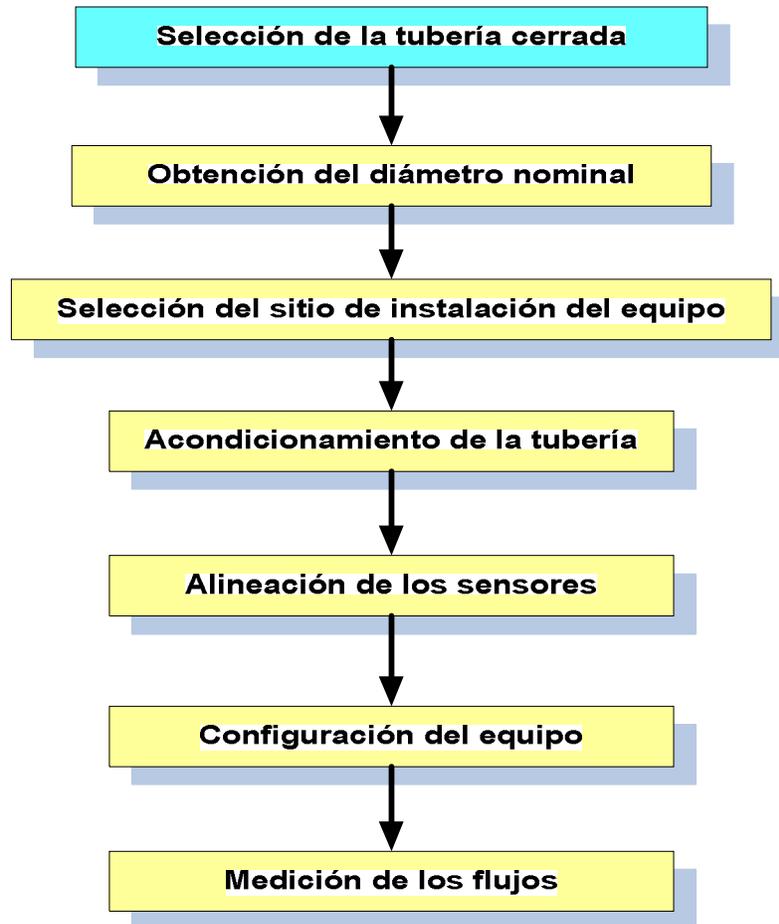


Figura 8 Mediciones en tubería cerrada

En la Tabla 4, se presenta los registros de los flujos de agua de repuesto recirculación retorno, etc. que corresponden a la operación actual en estudio los cuales fueron comprobados con las ecuaciones tratadas en el capítulo fundamento teórico.

Tabla 4. Flujos de la torre TE-00

Flujo	TORRE TE-00	
	m ³ /h	GPM
Repuesto (A_R)	93.8	413
Recirculación (A_T)	10,220.58	45,000
Evaporación (P_E)	70.5	310.5
Arrastre (P_A)	20.4	90
Purga (P_P)	2.8	12.5



3.5. Flujo de aire en la chimenea

La metodología para determinar la velocidad de aire y, en consecuencia el flujo de aire, en una de las chimeneas de la torre de enfriamiento está basada en los principios de medición de velocidad de un gas que pasa por un ducto. El principio se basa en determinar la caída de presión entre un punto y otro, como se ilustra en la Figura 9. La diferencia entre la presión dinámica y la presión estática se registra en varios puntos perpendiculares al flujo del ducto, se integran y se determina la velocidad del fluido en el ducto mediante una expresión algebraica (los detalles de la memoria de cálculo se presentan en el balance, anexo 1). Además de medir la diferencia de presión en los diferentes puntos de la chimenea, es necesario tomar datos de la geometría del sistema y las condiciones de operación en la chimenea (presión atmosférica, temperatura ambiente, temperatura de aire en la chimenea, composición de gases, humedad, dimensiones del sistema, por mencionar los datos principales) (EPA; NMX-AA-009-1993-SCFI; NMX-AA-054-1978).

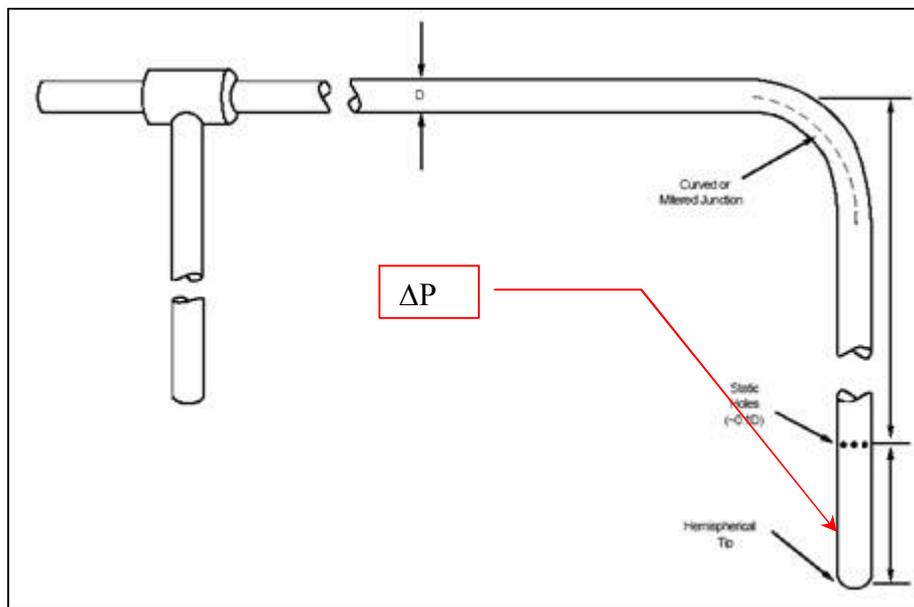


Figura 9 Diagrama de un tubo Pitot Estándar (utilizado durante las mediciones) (EPA)



Figura 10 Foto del tubo Pitot Estandar (utilizado durante las mediciones)

En la Tabla 5, se presenta el registro de la velocidad del aire en la chimenea los cuales fueron tomados en la chimenea 6 de la torre TE-00.

Tabla 5. Velocidad del aire

Torre	No. De chimeneas por celda	Chimenea	Velocidad		Flujo en chimenea	
			(m/s)	(ft/s)	(ft ³ /s)	(m ³ /s)
TE-00	1	CH-6	10.46	34.30	1,853.43	525.05

3.6. Las purgas

Las purgas fueron estimadas con el balance realizado a la torre de enfriamiento debido a que no se cuenta con un flujo constante de purga. La purga es realizada en función de la calidad de agua dentro del bacín de la torre.

3.7. Proveedores

La información proporcionada por los proveedores tanto, la que se encuentra en la red, los catálogos y las cotizaciones solicitadas son muy importantes para poder elegir la mejor opción.

Con ayuda de las entrevistas, la inspección, los registros de operación, los datos de diseño e información de los proveedores se puede realizar la evaluación para una propuesta de ahorro de agua y mejora en la capacidad de la torre.



4. RESULTADOS

La evaluación de la operación actual de la torre se puede llevar a cabo con las recomendaciones citadas en el código CTI ATC-105 de Cooling Technology Institute. Mediante las variaciones de operación de temperatura de agua fría, de agua caliente, del flujo de agua a enfriar, temperatura de bulbo húmedo del aire potencia de los ventiladores, entre otros.

4.1. *Determinación de la capacidad actual de enfriamiento.*

La capacidad de enfriamiento de la torre, se pueden determinar empleando dos métodos de cálculo aprobados por el código CTI ATC-105, método de curvas de comportamiento (método de curvas) y el método de curvas características por el criterio o método de Merkel.

En caso de que no se cuente con las curvas de comportamiento ni la característica de la torre, se desarrolla un balance térmico para estimar, en forma preliminar, las condiciones de operación de la torre.

4.1.1. Método de curvas de comportamiento

Este método se utiliza cuando se cuenta con las curvas de comportamiento proporcionadas por el fabricante de la torre.

Utilizando las curvas de comportamiento proporcionadas por el fabricante para condiciones de operación de 90%, 100% y 110% del flujo de agua de circulación (o como mínimo dos) y tomando los datos de la prueba el valor correspondiente al bulbo húmedo y haciéndolo coincidir con cada una de las curvas de comportamiento de la torre de enfriamiento, se podrá construir una curva donde el eje "x" es el intervalo y la eje "y" corresponde a la temperatura de agua fría.



En esa curva se fija el intervalo de enfriamiento que se obtuvo en la prueba y se construye la gráfica donde el eje “x” corresponde a la temperatura de agua fría y el eje “y” al gasto de recirculación predecible. Una vez elaborada esta curva y tomando como dato la temperatura de agua fría de la prueba se podrá determinar el flujo esperado.

A partir de este valor y de los datos reportados, se calcula el porcentaje de capacidad con la ecuación 33.

$$\%decapacidad = \frac{\%deflujodeprueba}{\%deflujoesperado} \times \left[\frac{BHPdiseño}{BHPprueba} \right]^{0.333} \times 100 \quad \text{Ecuación 33.}$$

Donde:

$BHPdiseño$ = potencia de diseño del ventilador.

$BHPprueba$ = potencia medida durante la prueba.

$\%deflujodeprueba$ = flujo de agua medido durante la prueba.

$\%deflujoesperado$ = flujo de agua determinado en el cálculo del método.

4.1.2. Método de curvas características por el criterio de Merkel.

Este método se utiliza cuando no se cuenta con las curvas de comportamiento proporcionadas por el fabricante de la torre y se utiliza una curva característica general que auxilia, para obtener los datos requeridos por el criterio de Merkel.

Localizar en la curva característica los valores de diseño, $(KaV / L)_{diseño}$ o la aproximación de diseño y con $(L / G)_{diseño}$, interceptar estos y localizar el punto de diseño que le corresponde. En este punto se traza una tangente con pendiente negativa de 0.6.

Se localizan ahora los valores de $(KaV / L)_{prueba}$ y con $(L/G)_{prueba}$ localizar la curva que le corresponde. En este punto se traza una tangente paralela a la curva característica con pendiente negativa de 0.6. Moverse sobre esta línea paralela



hasta interceptar a la curva característica con la aproximación (TAF-TBH) de diseño y leer el valor de (L/G) o que le corresponde.

A partir de estos valores se calcula el % de capacidad como se indica en el capítulo 3 en la ecuación 30:

De donde:

$(L/G)_o$ = Es la relación corregida del flujo de agua con respecto al flujo de aire.

$(L)_{\text{diseño}}$ = Es la relación de diseño del flujo de agua con respecto al flujo de aire.

La descripción más detallada de este método se presenta en el anexo 1.

4.1.3. Método alternativo balance térmico.

Este método se utiliza cuando no se cuenta con las curvas de comportamiento ni la curva característica de la torre, proporciona en forma muy global la condición de operación de la torre, para lo cual se requiere de los datos de diseño y de la prueba de comportamiento dentro de los límites de aceptación indicados por el CTI.

Los datos que se requieren tanto de diseño, como de prueba son los siguientes.

W = Flujo de agua = kg/h.

TAF = Temperatura de agua fría = °C.

TAC = Temperatura de agua caliente = °C.

C_p = Calor específico del agua ≈ 1 kcal/kg°C.

ρ = Densidad del agua ≈ 1 kg/L.

A partir de estos valores se calcula el calor disipado por la torre con las ecuaciones 34 y 35:

$$Q_D = W_D \times C_p \times (TAC_D - TAF_D) \quad \text{Ecuación 34.}$$



$$Q_P = W_P \times C_p \times (TAC_P - TAF_P) \quad \text{Ecuación 35.}$$

Donde:

Q_D = Calor disipado por diseño = kcal/h.

Q_P = Calor disipado en la prueba = kcal/h.

La ecuación 36 nos indica el porcentaje de calor que disipa la torre en condiciones de operación con respecto a las de diseño, de forma global:

$$\%Q_R = \frac{Q_P}{Q_D} \times 100 \quad \text{Ecuación 36.}$$

Donde:

$\%Q_R$ = Porcentaje del calor removido por la torre.

Es importante mencionar que el valor resultante de este cálculo es preliminar, por lo que solamente indica la forma de operar de la torre desde el punto de vista energético y no como un porcentaje de capacidad (CONAE, 2005).

4.2. Torres existentes en el mercado

4.2.1. Tipo de torres de enfriamiento existentes en el mercado.

La Tabla 6, muestra en resumen una clasificación en forma breve de las distintas torres de enfriamiento existentes en el mercado, así como las ventajas y desventajas de cada una de las torres en cuestión (Hensley, 2006).



Tabla 6. Características de las torres de enfriamiento

Torre de enfriamiento	característica	Criterios para su aplicación	Principales ventajas	Principales desventajas
<p>Tiro mecánico</p> <p>Utilizan uno o múltiples ventiladores para impulsar volumen de aire en su interior.</p>	<p>Tiro forzado</p> <p>El / o los ventiladores se localizan en la entrada de la corriente de aire de la torre. Existen velocidades altas de aire en la entrada y bajas en su salida.</p>	<p>La presencia de ventiladores compensa las condiciones atmosféricas cambiantes del medio ambiente al regular el flujo de aire que entra a la torre.</p>	<p>Es capaz de operar en contra de las altas presiones estáticas asociadas con la tubería.</p>	<p>Debido al arreglo del ventilador es susceptible a recirculación de aire caliente en su interior, además de tener severos enfriamientos en partes del ventilador resultando desbalanceo en el mismo.</p> <p>Requiere mayor potencia para su correcta operación.</p>
<p>Tiro mecánico</p>	<p>Tiro inducido</p> <p>El/ o los ventiladores se localizan en la parte superior de la torre desde donde succiona el aire en su interior.</p> <p>Tienen una velocidad de descarga de aire 3 o 4 veces más grande que la velocidad de entrada.</p>	<p>La presencia de ventiladores compensa las condiciones atmosféricas cambiantes del medio ambiente al regular el flujo de aire que entra a la torre.</p>	<p>La ubicación del ventilador dentro de la corriente de aire caliente provee una excelente protección en contra de la formación de hielo en sus componentes mecánicos.</p> <p>Torres muy versátiles debido a la existencia de instalaciones desde 15 hasta 700, 000 GPM.</p>	<p>Existe una pequeña tendencia de reducción en la zona de presión que puede ser creada por la acción de un solo ventilador.</p> <p>Puede existir recirculación de aire caliente en la torre debido a las condiciones ambientales del viento.</p>
<p>Tiro híbrido</p> <p>Combinación de dos tipos de torres de enfriamiento.</p>	<p>Torres de tiro natural con ventilador</p> <p>Externamente Torres de tiro natural e internamente de tiro mecánico.</p>	<p>El diseño intenta minimizar el caballaje requerido para el movimiento del aire en la torre.</p>	<p>Con el diseño apropiado los ventiladores pueden solo operar solamente durante periodos de extremo ambiente y cargas de máximo apogeo.</p>	<p>En localidades donde hay un bajo nivel de descarga de la "pluma" de la torre se puede probar que es inaceptable, la elevada descarga del ventilador ayuda de la torre de tiro natural.</p>



Continúa Tabla 6. Características de las torres de enfriamiento

Torre de enfriamiento	característica	Criterios para su aplicación	Principales ventajas	Principales desventajas
<p>Flujo de aire</p> <p>Por la relación de flujo relativo del aire y el agua con la torre.</p>	<p>Contra flujo</p> <p>El aire se mueve verticalmente hacia arriba a través del relleno en contra la caída descendente del agua.</p>	<p>Generalmente se aplican cuando es necesaria una alta eficiencia térmica en la torre, cuando se requiere en la operación valores grandes de acercamiento en la torre.</p> <p>Se aplican cuando la calidad de agua de suministro tiene buenos parámetros de calidad.</p>	<p>La ventaja que tiene este tipo de torres es que el agua más fría se pone en contacto con el aire más seco, lográndose un máximo rendimiento. En estas el aire puede entrar en una o más paredes de la torre, con lo cual se consigue reducir en gran medida la altura de la entrada de aire.</p>	<p>La elevada velocidad con la que entra el aire hace que exista riesgo de arrastre de suciedad y cuerpos extraños dentro de la torre, La resistencia del aire que asciende contra el agua que cae se traduce en una gran pérdida de presión estática y un aumento de la potencia de ventilación en comparación con las torres de flujo cruzado.</p> <p>Costos más altos de mantenimiento en los internos.</p>
<p>Flujo de aire</p>	<p>Flujo cruzado</p> <p>El aire circula en dirección perpendicular respecto al aire que desciende Estas torres tienen una altura menor que las torres de flujo a contracorriente, ya que la altura total de la torre es prácticamente igual a la de relleno.</p>	<p>Se aplican cuando la calidad de agua de suministro no tiene buenos parámetros de calidad.</p> <p>Cuando no se desean grandes costos de mantenimiento.</p>	<p>El mantenimiento de estas torres es menos complicado que en el caso de las torres a contracorriente, debido a la facilidad con la que se pueden inspeccionar los distintos componentes internos de la torre.</p> <p>El arreglo puede hacerse en doble flujo, lo que aumenta la cantidad de aire que entra en la torre.</p>	<p>La principal desventaja de estas torres es que no son recomendables para aquellos casos en los que se requiera un gran salto térmico y un valor de acercamiento pequeño, puesto que ello significará más superficie transversal y más potencia de ventilación, que en el caso de una torre de flujo contracorriente.</p>



Continúa Tabla 6. Características de las torres de enfriamiento

Torre de enfriamiento	característica	Criterios para su aplicación	Principales ventajas	Principales desventajas
<p>Llenado-spray</p> <p>Torres sin rellenos o empaques.</p>	<p>Llenado-spray</p> <p>La transferencia de calor en la torre depende solamente la desintegración del agua sin permitir su distribución en el sistema para promover el máximo contacto aire-agua.</p>	<p>El uso de estas torres normalmente esta limitada a ciertos procesos donde las temperaturas altas son permisibles. También es utilizada cuando el agua circulante tiene excesos en contaminación o en sólidos.</p>	<p>Ahorro de agua en cuanto a pérdidas por evaporación o arrastre.</p> <p>Costos más bajos en cuanto a mantenimiento de internos.</p>	<p>Baja eficiencia térmica en la torre, baja diferencia de temperaturas de agua de retorno y suministro de la torre.</p>
<p>Construcción</p> <p>Es característica en que sitio son construidas.</p>	<p>En campo</p> <p>La actividad de construcción toma lugar en el sitio de su uso final.</p>	<p>Se aplica para todas las grandes torres y muchas de las torres pequeñas.</p>	<p>La labor y/o supervisión para el ensamblaje final es usualmente proporcionado por el fabricante de la torre de enfriamiento.</p>	<p>Sus tiempos de montaje suelen ser largos.</p>
<p>Construcción</p>	<p>Ensamblada en fábrica</p> <p>Torres que pasan virtualmente un completo ensamblaje en el punto de manufactura, donde la forma en el sitio como pocas secciones es el modo de transportación permisible.</p>	<p>Se aplica para la construcción de grandes torres multiceldas que son ensambladas en sitio por módulos o son enviadas con la herramienta apropiado para su correcto uso.</p>	<p>Existencia de equipo opcional en la torre.</p> <p>Ayudan como celdas de relevo en el paro de una unidad.</p>	<p>Necesidad de muchas unidades para el manejo de grandes volúmenes de agua.</p> <p>Costos elevados.</p>



Continúa Tabla 6. Características de las torres de enfriamiento

Torre de enfriamiento	característica	Criterios para su aplicación	Principales ventajas	Principales desventajas
Forma	Rectilíneas Son construidas moda "celular" celdas lineales.	Se aplican en un espacio grande de terreno para su desempeño.	Se acomodan el número de celdas necesarias para un específico rendimiento térmico.	No aptas para pequeños de terreno en fabricas o plantas de proceso.
	(RMD) Redonda de tiro mecánico Son construidas en un arreglo redondo con los ventiladores agrupados muy cerca del centro de la torre.	Se aplican en una existente área menor de terreno.	Pueden manejar enormes cargas de calor. Menor recirculación de aire caliente que en las torres rectilíneas.	Costos de mantenimiento altos. Dependiente de las condiciones climatológicas.
Método de transferencia de calor.	Torres secas Se diferencia de todas los tipos de torres anteriormente descritas que son del tipo evaporativas. En las torres secas no existe contacto directo (no existe evaporación) entre el aire y el agua. El agua es enfriada totalmente por calor sensible.	Se aplica en sitios en los que existe poco abastecimiento o escasez de agua de sitio.	Se reducen las pérdidas de agua de enfriamiento debido a la evaporación y arrastre en estas.	Mayor costo de mantenimiento. Mayores caídas de presión por la acción de los ventiladores.

4.2.2. Principales Marcas

En la Tabla 7, se muestran 4 de las principales marcas constructoras de torres de enfriamiento en campo con sus principales tecnologías y materiales para su construcción (Termich, 2007; B.A.C., 2007; C.E. Shepherd, 2007; Ecodyne, 2007).



Tabla 7. Principales marcas de torres de enfriamiento

Concepto	TERMICH	BAC- TECNOEQUIP DE MÉXICO	INGEOSIN	ECO DYNE
Tecnólogo	SPX Cooling Technologies. (Ex -Marley)	(Baltimore).	(Shepherd).	Tower Components.
Tipo de torre	Contra flujo Tiro inducido.	Flujo cruzado Tiro inducido.	Contra flujo Tiro inducido.	Flujo cruzado Tiro inducido.
Componentes:				
Montaje	Instalación en campo de los componentes de la torre.	Instalación en campo de los componentes de la torre.	Instalación en campo de los componentes de la torre.	Instalación en campo de los componentes de la torre.
Bacín de recepción	Requiere bacín de concreto para recepción agua fría	Requiere bacín de concreto para recepción agua fría.	Incluye bacín de poliéster reforzado con fibra vidrio (FRP).	Requiere bacín de concreto para recepción agua fría.
Relleno	Sistema patentado: Tricklebloc de Polipropileno, incrementa rompimiento de gotas.	Hojas individuales de PVC.	Láminas de PVC tipo de película.	Sistema patentado: Opti bar de HDPE, incrementa rompimiento de gotas.
Eliminadores de rocío	Patentado: XCEL plus, Tipo Celular	Hojas de PVC.	Laminar, de PVC.	Sistema: Opti – Cel de PVC.
Pérdidas por arrastre	0.0010 %	No indica	0.008 %	0.002 %
Sistema de distribución de agua	Espreado de baja presión, boquillas patentadas: Modelo NS	Distribución del agua por gravedad.	Espreado de baja presión.	Distribución del agua por gravedad.
Columna de bombeo	Aproximadamente requiere entre 7 y 10 metros de altura.	Aproximadamente requiere entre 6 y 10 metros de altura.	Aproximadamente requiere entre 6 y 9 metros de altura.	Aproximadamente requiere entre 6 y 10 metros de altura.
Materiales de fabricación:				
Elementos estructurales	Fibra de vidrio Reforzado Poliéster (FRP) con retardante de fuego.	Estructura metálica con protección anticorrosivo.	FRP	FRP o Concreto.
Carcasa	Poliéster reforzado.	Paneles laterales de FRP.	FRP	Paredes de acrílico o policarbonato o FRP
Chimenea	FRP	No indica	FRP	FRP
Ventilador (hojas)	Laminado de Fibra de vidrio reforzado epoxi	Aluminio	Fibra de vidrio	FRP

**Continúa Tabla 7. Principales marcas de torres de enfriamiento**

Concepto	TERMICH	BAC- TECNOEQUIP DE MÉXICO	INGEOSIN	ECO DYNE
Equipo Mecánico				
Ventilador	Tecnología propia. Tipo Axial.	Tipo axial	Ventilador axial. El ángulo de las aspas es ajustable.	Ventilador axial
Reductor de velocidad	Tecnología propia. Angulo recto.	Por medio de bandas	No informa.	Angulo recto.

4.2.3. Torres de enfriamiento tipo modulares

Debido a que es una alternativa practica para no construir una torre de enfriamiento y perder tiempo para la construcción se muestra en la Tabla 8, una comparación de dos empresas fabricantes torres de enfriamiento tipo modulares, incluyendo principales características así como sus ventajas y desventajas (Tower Tech Inc., 2007; FIBER. 2005).



Tabla 8. Torres de enfriamiento tipo modulares.

TORRE DE ENFRIAMIENTO	CARACTERÍSTICAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
TOWER TECH, SERIE TTXE - Contraflujo - Tiro forzado	<p>Funcionamiento térmico en aplicaciones de cargas térmicas constantes o variables.</p> <p>Diseño modular. Flujo de agua a través del bacín.</p> <p>Boquilla rotatoria de flujo variable.</p> <p>Sistema de recolección de agua.</p> <p>Ventilador-motor instalados a nivel de piso</p>	<p>Facilidad en la limpieza de los depósitos de agua fría. Distribución uniforme de agua en el relleno.</p> <p>Motores de alta eficiencia que no necesitan transmisión o reductor.</p> <p>Relleno resistente a la degradación biológica y a la mayoría de los químicos (alcaloides o ácidos orgánicos e inorgánicos).</p> <p>Eliminadores de alta eficacia (pérdida por arrastre > 0.002%).</p> <p>Materiales de construcción de fibra de vidrio y acero inoxidable rígido y resistentes al deterioro y a la corrosión.</p>	<p>Existencia de Equipo opcional de la torre.</p> <p>Necesaria implementación de módulos para la demanda de agua en gran volumen.</p> <p>Torres de enfriamiento temporal, utilizadas como relevo de las torres de enfriamiento principal.</p> <p>Costo elevado.</p>



Continúa Tabla 8. Torres de enfriamiento tipo modulares

TORRE DE ENFRIAMIENTO	CARACTERÍSTICAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p style="text-align: center;">TORRE DE CELDAS MODULARES SULZER</p> <p>- Tiro inducido</p>	<p>Diseño modular.</p> <p>Filtro de canastillo para desagüe y recirculación.</p> <p>Silenciador de entrada.</p> <p>Revestimientos reductores del nivel de ruido del agua.</p> <p>Silenciador de salida.</p> <p>Escalera de aluminio con jaula protectora y plataforma con pasamano.</p> <p>Termostato para regular la velocidad del ventilador.</p> <p>Protección para ventiladores en marcha.</p> <p>Control de nivel de aceite.</p> <p>La cubierta de la torre de enfriamiento, la cual se puede pisar, viene en dos versiones: en segmentos lisos de plástico o en planchas antideslizantes de aluminio.</p> <p>La aspersion del agua se genera con toberas cónicas auto-limpiantes de material plástico.</p>	<p>Tasas de flujo variables (65 a 2200 m³/h).</p> <p>Aspas hidrodinámicas de plástico reforzado con fibra de vidrio o en aluminio, pueden ser ajustadas mientras el ventilador está detenido.</p> <p>Secciones de perfiles plásticos evitan que las gotas de agua sean arrastradas por la corriente de aire.</p> <p>El relleno es resistente al calor y libre de corrosión dado el material plástico del que está fabricado.</p> <p>Persianas de plástico que permiten la entrada del aire, evitan el salpicado de agua y son fáciles de desarmar y de limpiar.</p> <p>El receptáculo de recolección de agua, es de poliéster reforzado con fibra de vidrio.</p> <p>Sistema de calefacción para mantener la zona de desagüe libre de hielo en invierno.</p>	<p>Torres de enfriamiento temporal, utilizadas como relevo de las torres de enfriamiento principal.</p> <p>Pocos diseños e torres de enfriamiento.</p> <p>Lejanía de la empresa con respecto a la ciudad de México (Santiago de Chile).</p> <p>Pocas especificaciones de los productos y servicios de las torres de enfriamiento.</p>

En la Figura 11, se muestra dos imágenes de dos torres modulares en operación, las cuales son instaladas, no construidas en campo.



**TOWER TECH,
SERIE TTXE**



TORRE MODULAR SULZER



Figura 11 Torres de Enfriamiento Modulares

4.3. Rellenos o empaques

Las torres de enfriamiento regulan el fenómeno de enfriamiento mediante la evaporación controlada, reduciendo así la cantidad de agua de repuesto. Esto se logra cuando el agua en forma de gota se pone en contacto con el aire, se evapora una película exterior de la gota debido al aire que pasa alrededor de ella. Es decir, el enfriamiento se realiza tanto por calor sensible, que es un cambio de temperatura, y por calor latente, que es un cambio de estado físico.

El objetivo de la torre de enfriamiento es que el agua en forma de gota de este el mayor tiempo posible en contacto con el aire, lo cuál se logra con la altura de la torre y además interponiendo el paso con obstáculos lo cual logramos con el relleno, que la van deteniendo y al mismo tiempo la van fragmentando facilitando más el fenómeno de evaporación. En los nuevos sistemas los obstáculos en lugar de romper la gota de agua, hacen que se forme una película muy delgada en



donde se lleva a cabo el mismo fenómeno evaporación como se ilustra en la Figura 12, (Hensley, 2006).

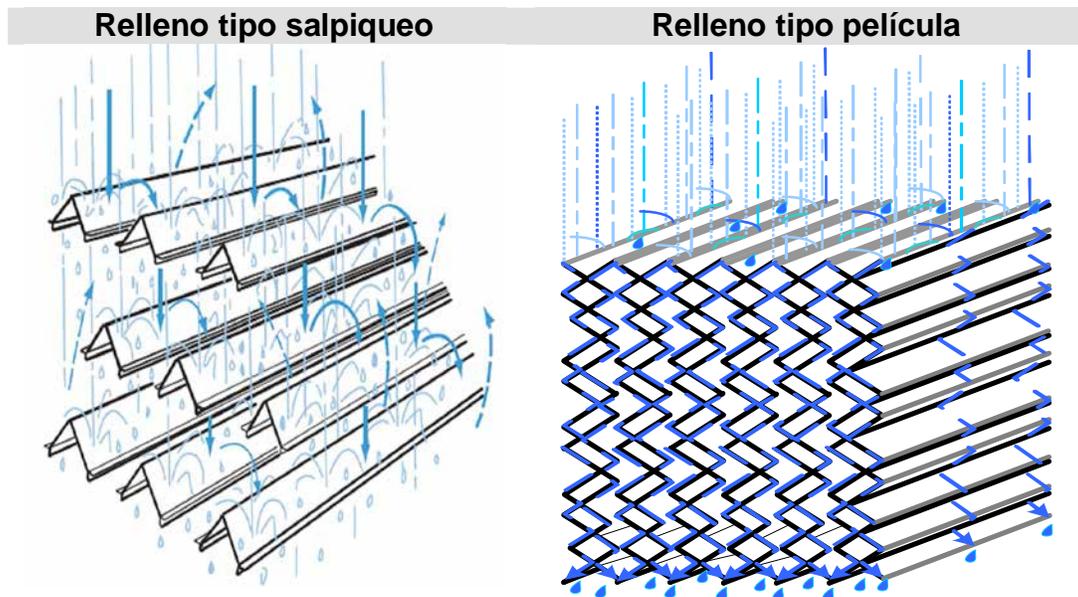


Figura 12 Relleno de salpiqueo y de película

La mayor parte de la información disponible para las torres de enfriamiento es de selección, no de diseño por lo cual se resumen en la Tabla 9 diferentes materiales que existen en el mercado de rellenos, como sus características, ventajas y desventajas ya que son una parte muy importante de la torre de enfriamiento.

Tabla 9. Materiales de los rellenos para torres de enfriamiento

Relleno	Característica	Criterios para su aplicación.	Principales ventajas	Principales desventajas.
Salpiqueo	<p>PVC Rompe la caída de agua e interrumpe su progreso vertical.</p>	Se aplican en torres de contraflujo o flujo cruzado. Se utilizan principalmente cuando el agua circulante tiene excesos en contaminación de sólidos.	El material más popular de los rellenos en torres de enfriamiento. Tiene resistencia alta al fuego, a los agentes químicos además de ser muy ligero.	Transferencia de calor baja con respecto a materiales no poliméricos.
	<p>Madera tratada Rompe la caída de agua e interrumpe su progreso vertical.</p>	Se aplican en torres de contraflujo o flujo cruzado. Se utilizan principalmente cuando el agua circulante tiene excesos en contaminación de sólidos.	Fuerza, durabilidad, disponibilidad y bajo costo.	Si no se le suministra recubrimientos existe un alto deterioro en este tipo de material.



Continuación Tabla 9 . Materiales de los rellenos para torres de enfriamiento

Relleno	Característica	Criterios para su aplicación.	Principales ventajas	Principales desventajas.
Salpiqueo	Polipropileno Rompe la caída de agua e interrumpe su progreso vertical.	Se aplican en torres de contraflujo o flujo cruzado. Se utilizan principalmente cuando el agua circulante tiene excesos en contaminación de sólidos..	Tiene resistencia alta al fuego y a los agentes corrosivos.	Transferencia de calor baja con respecto a materiales no poliméricos.
	Acero inoxidable Rompe la caída de agua e interrumpe su progreso vertical.	Se aplican en torres de contraflujo o flujo cruzado. Se utilizan principalmente en torres con estructura de acero donde es obligatorio que la construcción sea a prueba de fuego.	Durabilidad, Fuerza y resistencia a los agentes oxidantes.	No viables debido al costo elevado.
Película	PVC Hace que el agua el agua. Se extiende en una delgada película, fluyendo a grandes áreas verticales que promueven la máxima exposición al flujo de aire.	Se aplica principalmente en torres del tipo de flujo cruzado. Se aplican principalmente cuando la calidad de agua circulante es buena.	El material más popular de los rellenos en torres de enfriamiento. Tiene resistencia alta al fuego, a los agentes químicos además de ser muy ligero.	Transferencia de calor baja con respecto a materiales no poliméricos.

El relleno de una torre de enfriamiento, es el elemento donde se realiza la transferencia de calor, por lo cual son los elementos centrales en la optimización térmica. Están fabricados con polietileno de alta densidad, polipropileno ó PVC. Los nuevos materiales y formas permiten aumentar la capacidad de enfriamiento sin embargo la opción para aumentar la eficiencia térmica será alcanzar las condiciones de diseño originales. Entre los tipos de rellenos actuales que permiten un aumento en la capacidad de enfriamiento se encuentran: OptiBar y Tbar. En la Tabla 10, se muestran las características principales de estos dos tipos de relleno (Tower Components Inc. 2007).

El ensuciamiento de los empaques de película es provocado por el proceso de acumulación de materia suspendida y por el bio-crecimiento de algas en el área



plástica del empaque de película, lo cual inhibe o afecta severamente la capacidad de la torre; por esta razón, como la calidad de agua no se puede garantizar, se decidió descartar dicha opción (Qureshi, 2006).

Tabla 10. Características de Rellenos V Bar y Opti-bar

Concepto	V Bar	Opti-bar
Capacidad	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.
Distribución	Su distribución dentro de la torre fomenta la caída de agua en forma de cascadas, por el efecto canal que se crea en los extremos de relleno.	Realiza el fraccionamiento del agua en forma de salpiqueo mediante la formación de gotas.
Presión	Las caídas de presión son altas y dependen del modelo.	Las caídas de presión se minimizan.
Mejora	No menciona	Mejora el funcionamiento con respecto a las tecnologías antecesoras
Temperatura	Resiste cambios de temperatura.	Resistente a cambios de temperatura.
Resistencia	Poco resistente y con una resistencia al punto de fractura baja.	Duración prolongada y alta resistencia al punto de fractura.
Suciedad	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.

En la Figura 13, se muestran los rellenos V-bar y Opti-bar.

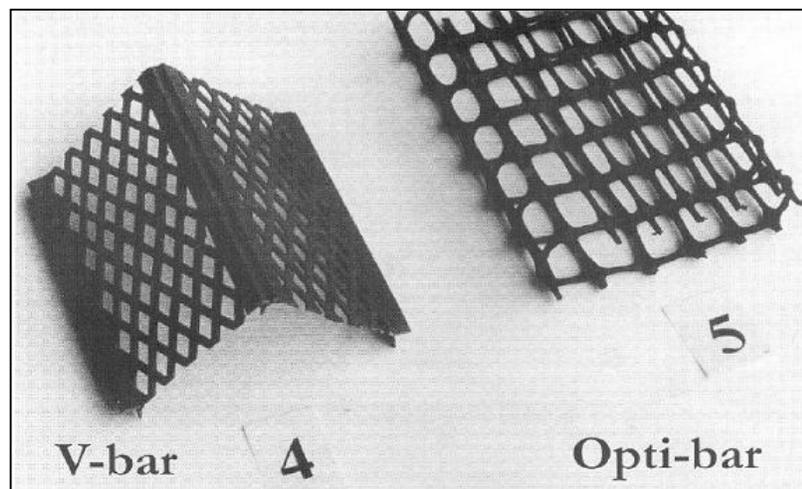


Figura 13 Rellenos V-bar y Opti-bar evaluados



4.3.1. Los empaques o rellenos de película

Los empaques o rellenos de película tienen muchas ventajas tan importantes como aumentar el área de transferencia lo cual genera una mejor eficiencia de la torre pero también presentan desventajas tan importantes como que dependen de la calidad de agua para no generar incrustaciones o taponamiento el cual provoca el paro de la celda para mantenimiento correctivo o preventivo, algunos rellenos de película en el mercado son el M106 crossflow film-fill y el FB20 counterflow film-fill, en la Figura 14, se presentan estos dos tipos de empaque de película (SPX Cooling Technologies, Inc. 2007).



M106 Crossflow Film Fill **FB20 Counterflow Film Fill**

Figura 14 **Rellenos de película comerciales**

4.3.1.1. Ejemplo: con relleno o sin relleno

Si el agua pasa a través de una boquilla capaz de producir pequeñas gotas, se dispondrá a una gran superficie para el contacto aire-agua. Puesto que la interfase agua-aire es también la superficie de transferencia de calor, el uso de la boquilla permite alcanzar buenos niveles de eficiencia por metro cúbico de aparato de contacto. Este es el principio de la torre de rocío.



Imagine una torre hipotética de rocío, el líquido que se alimenta desciende por gravedad a través de ella, si la torre que imagina es de 5.3 metros de alto y no se le aplica ninguna fuerza para que inicie la caída libre ($h = (1/2) * g * t^2$) donde h es la altura, g a la gravedad y t es el tiempo, la gota tardaría en caer un segundo. Si el líquido se alimenta a razón de una gota por segundo y no existe obstrucción, siempre habrá presente una gota en la torre y se eliminará continuamente una gota por segundo. La superficie efectiva en la torre es la de una gota.

Ahora imagine que introduciendo algunas formas geométricas en las que la gota pueda tropezar o desviarse, es posible hacer que la gota tarde cinco segundos en recorrer la altura de 5.3 metros de la torre, entonces si se alimenta una gota por segundo en la parte superior y se elimina por la parte inferior a razón de una gota por segundo, entonces tendremos cuatro gotas en la torre que significa cinco veces más de superficie de caída libre.

Se puede afirmar que la función del empaque es aumentar la superficie disponible en la torre ya sea distribuido el líquido sobre una gran superficie o retardando la caída de las gotas a través de la torre.

La ventaja de la caída interrumpida es que, cada vez que la caída se interrumpe (a cada quinta parte de la torre), es como si una gota con velocidad cero empieza a caer de nuevo y la equivalencia de la torre interrumpida es igual a la efectividad del primer quinto, es decir, cinco torres en serie (Cruz, 1999).

4.3.2. Alternativas al empaque

Otro medio de aumentar la superficie medio de contacto es atomizando el agua en lugar de formar gotas.

El empaque se puede hacer con tablas o tablillas, losetas huecas, láminas metálicas, tela metálica o rejillas especiales. Las maderas más comunes son de pino de California o ciprés las otras se deterioran con facilidad.



4.4. Los Eliminadores

Los eliminadores de niebla remueven el agua entrante desde la salida del aire lo cual produce severos cambios de dirección. La fuerza resultante separa las gotas de agua provenientes del aire depositándolas en la superficie del eliminador (Hensley, 2006).

Durante los años 70 el uso de los eliminadores en las torres de enfriamiento garantizaban un incremento en el intervalo de 3 a 10 °F contribuyendo a una mejora del 30% de la capacidad de la torre (Burger, 1975).

Con el paso de los años los diseñadores luchan por evitar pérdidas de presión excesivas en los movimientos de aire a través del eliminador, una cierta cantidad de presión diferencial es benéfica porque esta asiste en promover el flujo de aire uniforme a través del relleno de la torre.

Los eliminadores normalmente son clasificados por el número de sus cambios direccionales o “pasos”, con el incremento del número de pasos usualmente va acompañado un incremento en la caída de presión.

Estos pueden consistir en dos o más pasos con tablillas espaciadas posicionadas en cuadro o pueden ser moldeadas en una configuración de panal de abeja con pasajes en laberinto, algunas torres que utilizan relleno de película sus eliminadores de rocío son moldeados integralmente con las hojas del relleno.

Desde que los eliminadores son resistentes a la corrosión así como el relleno, varios materiales han sido incorporados en el diseño de los eliminadores, con madera tratada y muchos plásticos (predominantemente PVC) siendo este el más usado (Hensley, 2006).

Los eliminadores de PVC son diseñados para dejar pasar gotas de agua que se encuentra entre el 0.05 % hasta el 0.001 % del agua de recirculación. En el



mercado uno de los eliminadores más eficientes es el XCEL plus ya que reporta SPX cooling Technologies 2007 el dejar pasar solamente 0.001 % del agua de recirculación, al contrario con el HD Hidrotermica el cual reporta el 0.05 %, en la Figura 15 se muestran los 2 diferentes eliminadores (SPX Cooling Technologies, Inc. 2007; HD Hidrotermica. 2007).



Figura 15 Eliminadores de niebla comerciales

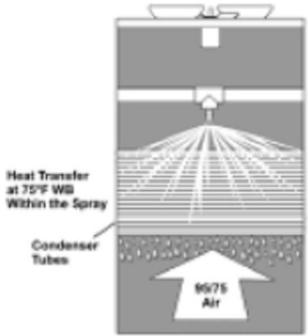
4.5. Condensadores Evaporativos

Para disminuir las pérdidas por evaporación se opta por la tecnología de condensadores evaporativos los cuales son una serie de intercambiadores aletados instalados en la parte superior de la torre o salida del aire el cual lleva consigo vapor de agua que es condensado para su recuperación (IDEA, 2006).

En la Tabla 11 se puede observar las principales fabricantes de esta tecnología algunos prometen en manera de estudio el recupera hasta un 30% de las pérdidas por evaporación porque los equipos tienen un costo elevado no son considerados en la propuesta de mejora, esta tecnología debe de ser diseñada junto con la torre para que sea representativo para la inversión (McQuary, 2007; BAC. 2007; Evapco. 2007).



Tabla 11. Principales fabricantes de condensadores evaporativos

Fabricantes de condensadores evaporativos		
 <p>McQuay internacional</p> <p>Americas Headquarters 13600 Industrial Park Blvd. Minneapolis, Minnesota 55441 800-432-1342 (Toll Free) 763-553-5330 (Direct) 763-553-5177 (Fax)</p> <p>http://www.mcquay.com</p>	<p>Los sistemas aplicados RoofPak™ del tejado de McQuay se pueden especificar con un condensador evaporativo, permitiendo que beneficios de ahorro de energía sean substanciales en el diseño, reducido los costos de la instalación de un sistema fábrica-empaquetado. pueden ahorrar el 40% en energía contra alternativas refrigerados</p>	<p>Evaporative-Cooled Condenser</p> 
 <p>Baltimore Aircoil Company</p> <p>Baltimore, Maryland 21227</p> <p>http://www.baltimoreaircoil.com</p>	<p>CXV los condensadores evaporativos están disponibles con modelos con capacidades que se encuentran a partir del 64 a 1,888 toneladas nominales R-717 o 81 a 2,390 toneladas nominales R-22.</p>	 
 <p>EVAPCO, Inc.</p> <p>5151 Allendale Lane Taneytown, MD 21787 USA Phone: (410) 756-2600 Fax: (410) 756-6450</p> <p>http://www.evapco.com</p>	<p>Evapco Evaporative Condenser- 269 Ton. Model: LRW-68-4-2. S/N's: M014878. Refrigerant: R-22. Conditions: 78 °F web bulb, 40 °F suction, 105 °F condensing temperature. Airflow: 43,240 cfm.</p> <p>Pumping capacity: 405 GPM. Coil volume: 266 gal. Centrifugal fan diameter: 27 in. Coil Test Pressure: 400 PSIG The LRW is a low noise, low height, forced draft centrifugal design unit. Standard construction features the patented, high efficiency</p>	 



4.6. Persianas.

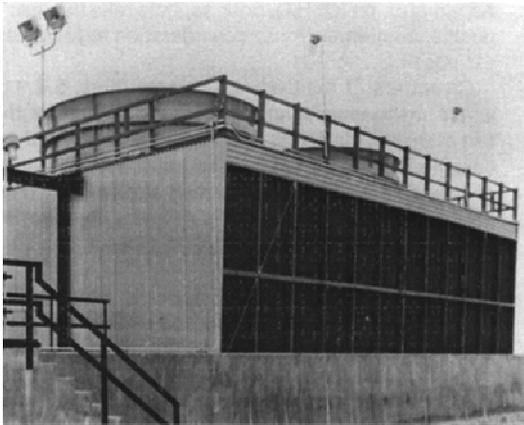
Cada buen diseño de torre a flujo cruzado es equipado con persianas de entrada, mientras que las torres a contraflujo sólo ocasionalmente requieren tener persianas en lugares donde existe una presencia de vientos fuertes. La idea es el de conservar el agua circulante dentro de los confines de la torre así como equalizar flujo de aire dentro del relleno.

Las persianas deben de ser capaces de soportar cargas de nieve, hielo y su diseño propio, el cual contribuye a una buena operación en un ambiente frío por retener el incremento en el flujo de agua adyacente en las entradas de agua, lo que es necesario para el control del hielo.

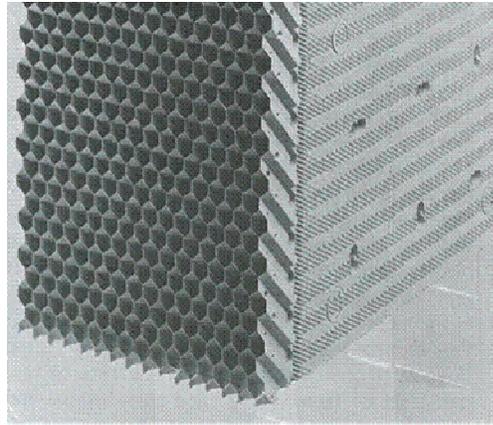
Los espacios reducidos inclinan abruptamente las persianas, esto permite una máxima contención de agua pero es una obstrucción al flujo de aire libre.

Los materiales más utilizados son fibras corrugadas resistentes al fuego, reforzadas en poliéster y madera de Douglas tratada para torres levantadas en campo, de acero galvanizado en torres de acero ensambladas en fábrica y de concreto en torres de concreto.

La evolución en el diseño de las persianas comenzó después de la época del relleno de tipo salpiqueo, las persianas son gran parte de visible en las torres de enfriamiento, gran parte de los modelos de las persianas se diseñan para que estas se amolden a los rellenos de las torres en especial los de tipo película, Los rellenos de tipo salpiqueo son usados en servicios de agua contaminada, el uso de relleno tipo película sin persianas en el exterior son exclusivas para procesos con grandes cargas de calor como lo muestra la Figura 16, (Hensley,. 2006).



- Cara de entrada de aire en torre a contraflujo.

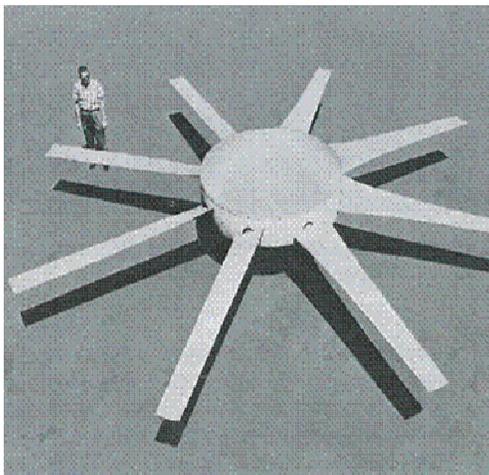


- Relleno moldeado íntegramente con entrada de aire en persianas.

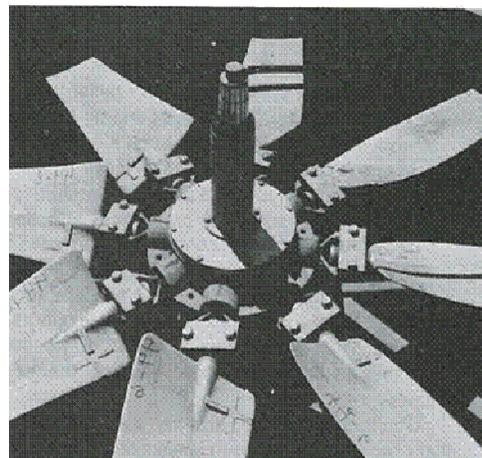
Figura 16 Torre sin persianas y empaque con persianas

4.7. Ventiladores.

Los ventiladores de las torres de enfriamiento pueden mover grandes volúmenes de aire eficientemente con un mínimo de vibración, los materiales de construcción no solo deben ser compatibles con el diseño de la torre, deben ser capaces de resistir los efectos de las atmósferas corrosivas en las que están expuestos al operar en la Figura 17, se muestran uno ventiladores típicos (Hensley, 2006).



- Diámetro típico de un ventilador utilizado en torres de enfriamiento.



- Ventilador con variables automáticas montadas en campo, utilizado para manejar flujo de aire y caballaje.

Figura 17 Ventiladores de una torre



4.8. Características del agua

Las características del agua de enfriamiento son: Tener baja temperatura, presentar una dureza menor de 50 mg/L como CaCO_3 , presentar una concentración menor de 0.5 mg/L de Hierro, Magnesio, Ácido sulfhídrico y el agua no debe ser corrosiva ni generar el desarrollo de hongos.

En la Tabla 12, se presenta la composición del agua requerida en una torre de enfriamiento. Los principales problemas que se pueden presentar debido a la mala calidad son dos. Primero, la formación de depósitos de carbonato o fosfatos de calcio y, en casos excepcionales, carbonato de magnesio; segundo, la corrosión en metales ferrosos, ocasionada por oxígeno disuelto, pH ácido o pH alcalino, baja alcalinidad y alto contenido de dióxido de carbono. La corrosión ocurre con mayor frecuencia en los circuitos semicerrados como se presentan en las refinerías (Jiménez, 2001).

Tabla 12. Criterios del agua de enfriamiento

Parámetros	Agua de enfriamiento (mg/L)
Alcalinidad	350
Aluminio	0.1
Bicarbonato	24
Calcio	50
Cloro	500
Dureza	650
Ácido sulfhídrico	-
Hierro	0.5
Manganeso	0.5
Aceite	-
pH (adimensional)	5.0-8.3
Sólidos suspendidos	100
Sílice	50
Sólidos disueltos totales	500 - 800
Sulfato	200



4.9. Selección del tipo de material

La selección del tipo de materia está en función del balance de la torre junto con las características de las alternativas de los rellenos y eliminadores, con los cuales se proyectaron las diferentes escenarios posibles por cada variable a considerar. En la Figura 18, se muestra el comportamiento del aumento de los ciclos de concentración con respecto al flujo de agua ahorrada.

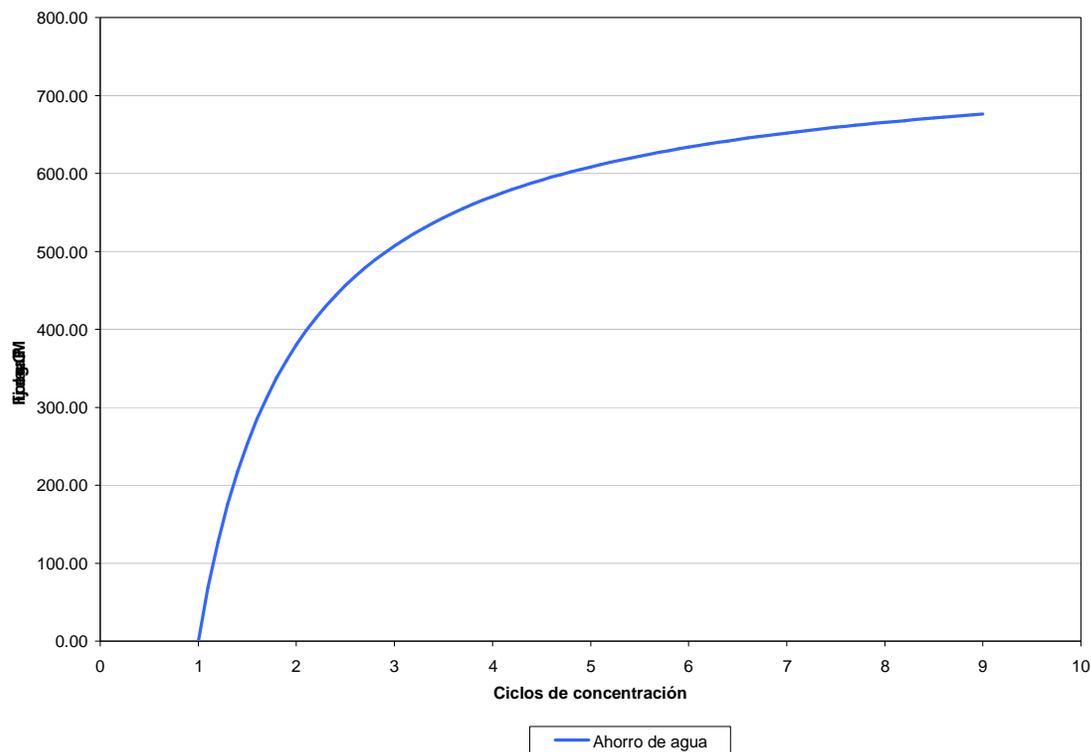


Figura 18 Ahorro de agua

Los sistemas más comunes de acondicionamiento son la eliminación de sólidos y del color y el ablandamiento (Jiménez, 2001).

Con lo cual se tomó la decisión proponer la instalación de dos filtros para eliminar la mayor cantidad de sólidos suspendidos para mejorar la calidad de agua uno en la entrada del agua caliente y el otro en la salida del agua fría, de esta manera se puede aumentar la calidad del agua, por lo consiguiente, la cantidad de 6 ciclos de concentración que esto equivale a 633.75 GPM ($143.94 \text{ m}^3/\text{h}$) de ahorro de agua.



En la Figura 19, se muestra el comportamiento de la disipación de calor al aumentar el ΔT de la torre esto se puede lograr cambiando el relleno de la torre ya que es el elemento que genera el aumento del área de transferencia con el aire de la torre.

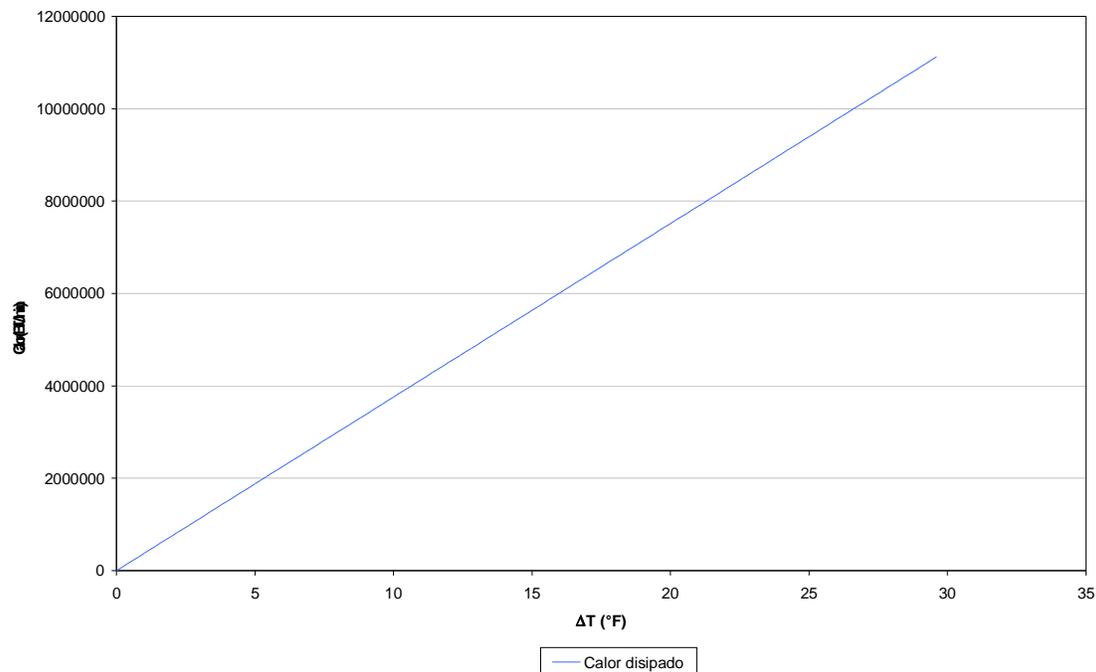


Figura 19 Calor disipado

Con la decisión del cambio relleno a un relleno Opti-bar se garantiza un aumento del 30% más calor disipado que las otras marcas con lo cual equivale a llegar a disipar una cantidad igual o superior de 117,234,00 BTU/h, lo que lleva a tener un gradiente de temperatura de 20 °F.

En la Figura 20, se muestra el ahorro de agua que está en función del coeficiente que reportan los fabricantes de los eliminadores de niebla basado en su diseño como en el ventilador utilizado.

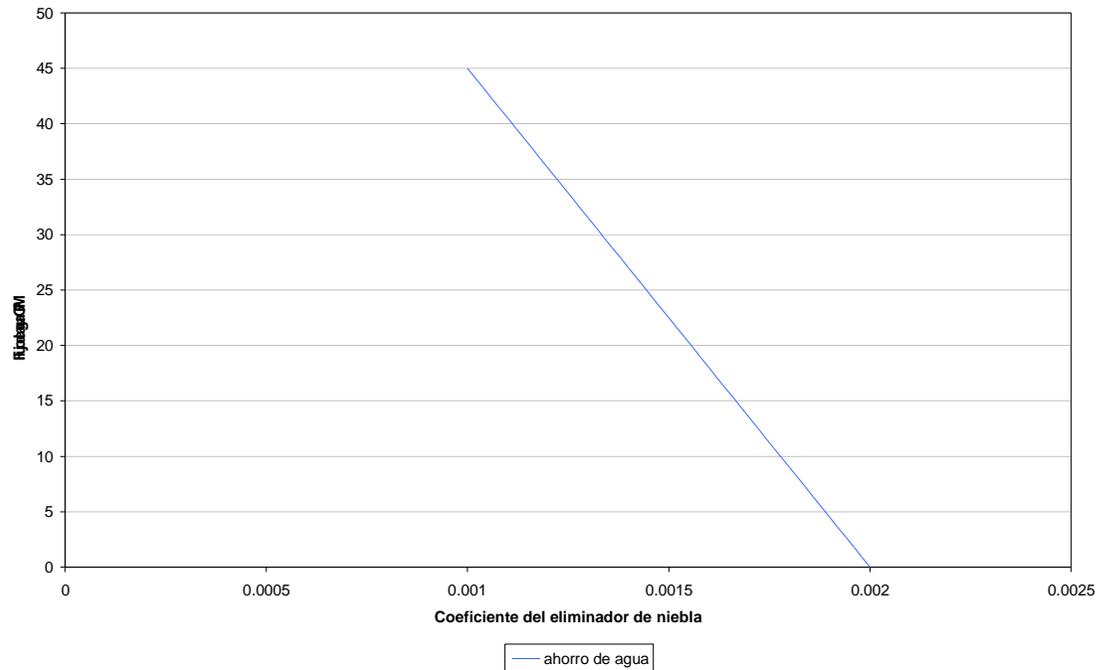


Figura 20 Ahorro de agua & eliminador

Con la decisión del cambio del eliminador existente al eliminador XCEL plus se garantiza operar con un coeficiente de 0.001 con la operación de los motores de los ventiladores existentes esto equivale a un ahorro de agua 45 GPM (10.22 m³/h).

En la Figura 21, se muestra el comportamiento del flujo de agua evaporada en la torre al aumentar el ΔT de la torre. Es evidente que si se desea que la torre disipe más calor se va a perder más agua por evaporación.

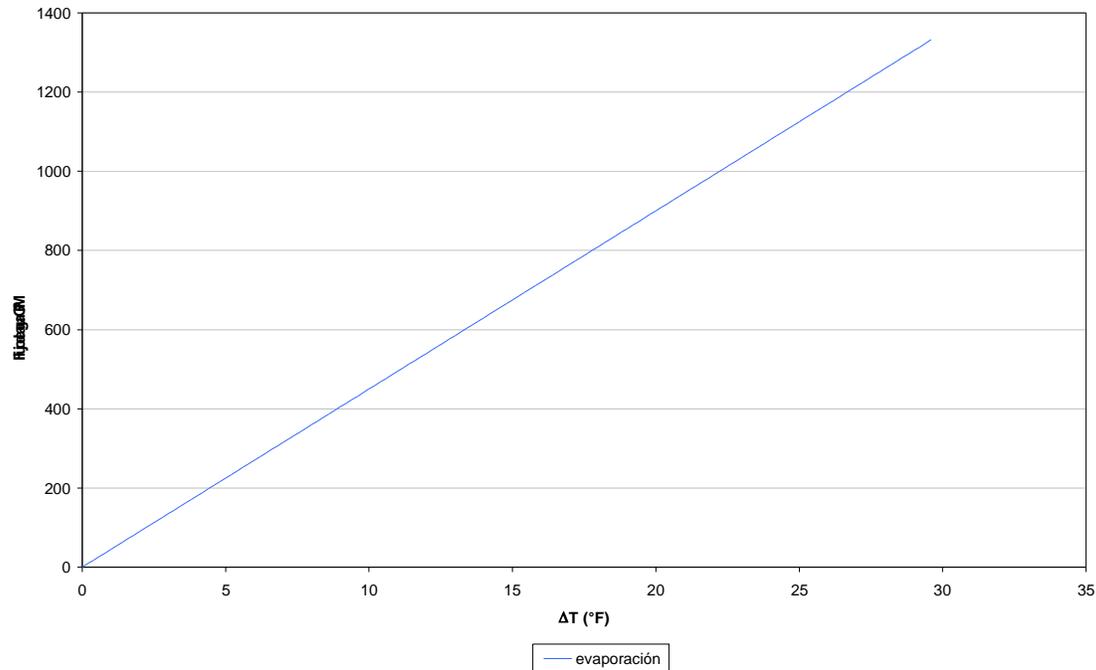


Figura 21 Agua evaporada

Con la decisión del cambio relleno a un relleno Opti-bar se garantiza un aumento del 30% más calor disipado que las otras marcas con lo cual equivale a llegar a una diferencia de temperatura de 20 °F y evaporar la cantidad 234 GPM (53.15 m³/h).

4.10. Ahorro de agua

El agua se puede ahorrar mediante la recirculación. Tener operación en circuito cerrado donde el agua no tiene contacto con la atmósfera se tiene la ventaja de reducir los costos del equipo, además de tratamiento.

Una torre de enfriamiento puede gastar enormes cantidades de agua la cual en algunos lugares resulta ser muy costosa. El costo del agua que entra a la torre se obtiene sumando el costo del agua cruda más el costo del tratamiento y/o acondicionamiento que se le dé al agua.



4.10.1. Intervalo de enfriamiento

El ajustar el intervalo actual de enfriamiento a las condiciones de diseño representa un potencial de ahorro y se define en la ecuación 37.

$$Potencial = 1 - \left(\frac{Intervalo_Operacion}{Intervalo_Diseño} \right) \quad \text{Ecuación } 37.$$

El ahorro en agua se puede calcular por medio de la ecuación 38 la cual representa un ahorro teórico máximo.

$$Ahorro_de_Agua = Potencial * flujo_actual \quad \text{Ecuación } 38.$$

El cambio de relleno de la torre modifica el intervalo de enfriamiento pero se modifican las condiciones de diseño y no aplica la ecuación 1, alguna alternativa como limpieza o reemplazo de equipo de las mismas especificaciones de diseño, no modifican el diseño entonces si aplican las ecuaciones 37 y 38 (López, 2001).

Para ajustar el intervalo de enfriamiento se debe de cambiar el relleno de la torre que tiene una inversión de \$ 1,143,532 por la desinstalación del empaque existente la instalación de 1,140 piezas por celda como la torre se conforma de 6 celdas, la inversión alcanza los \$ 6,861,192 que significa instalar alrededor de 8,650 piezas de relleno a la torre con lo que se pierde 234 GPM (53.15 m³/h) de agua debido a la evaporación y una cantidad al año de \$ 4,000,000.

4.10.2. Ciclos de concentración

El agua de la torre se evapora debido a las condiciones ambientales y los sólidos presentes en ella se van concentrando; llega un momento en que la acumulación de sólidos en el bacín es muy grande y es necesario purgar. El número de ciclos que completa el agua de la torre antes de ser purgada recibe el nombre de ciclos de concentración. Los ciclos de concentración se determinan a partir de la concentración de sílice o bien a partir de la conductividad utilizando las ecuaciones 39 o 40:

$$c.c. = \frac{Silice_salida}{Silice_entrada} \quad \text{Ecuación } 39.$$



$$c.c. = \frac{\text{Conductividad}_{\text{ salida}}}{\text{Conductividad}_{\text{ entrada}}} \quad \text{Ecuación 40.}$$

También se puede calcular con la ecuación 41

$$c.c. = \frac{A_R - P_A}{P_p} \quad \text{Ecuación 41.}$$

Es importante que la torre opere al máximo número de ciclos de concentración posible para así disminuir la frecuencia de las purgas y tener una pérdida menor de agua. Los ciclos de concentración se aumentan mejorando la calidad del agua de repuesto utilizando un tratamiento integral o un pretratamiento que remueva sólidos disueltos, suspendidos, turbiedad, sílice y conductividad (López, 2001).

La instalación de dos filtros en el suministro (agua fría) permite tener un pretratamiento mejor ya que se eliminan sólidos suspendidos y en consecuencia disminuye la turbidez además de que se aumentan los ciclos de concentración y se reducen purgas. Lo anterior significa un ahorro de 634 GPM (144 m³/h) de agua de repuesto lo que representa un ahorro de \$ 10, 800,000, sin considerar el costo de los equipos y los costos de operación y mantenimiento correspondientes.

4.10.3. Los eliminadores de niebla

Remueven el agua entrante desde la salida del aire lo cual produce severos cambios de dirección. La fuerza resultante separa las gotas de agua provenientes del aire depositándolas en la superficie del eliminador. El ahorro está en función del diseño y el ventilador aunque el más eficiente asegura dejar pasar no más del 0.001% del agua de recirculación de la torre.

Los proveedores de este tipo de equipos aseguran el 0.001% de pérdidas de arrastre máximas. Un cambio de eliminadores de niebla significa una inversión aproximada de \$1, 400,000 por la desinstalación del eliminador de niebla existente y reemplazo por 1,080 piezas. Sin embargo se tendrá un ahorro de agua de 45 GPM (10.22 m³/h) y significa una cantidad aproximada al año de \$ 770,000.



El ahorro aproximado de agua en la torre de enfriamiento en un año es de 883,600 m³ con un ahorro anual alrededor de \$ 5, 400,000 con una inversión aproximada total de \$ 9,300,000.

4.10.4. Otras alternativas de ahorro

4.10.4.1. Recuperadores de Evaporación

Son intercambiadores de calor tubos aletados o tubos llenos de agua instalados en la parte superior de la torre antes del eliminador de niebla que sirve para condensar la evaporación, el porcentaje que garantizan el proveedor es del 30% de recuperación para nuestro caso de estudio representaría 70.2 GPM (15.94 m³/h) y significaría un ahorro anual aproximado de \$ 1,200,000. No se tiene la información del costo de la inversión de esta tecnología por eso no se propone ya que no se cuenta con la seguridad de que si es rentable o no.

4.10.4.2. Recuperación de purgas

La recuperación de purgas resulta rentable cuando el costo del agua de repuesto es alto. Esta recuperación se puede realizar mediante la implementación de procesos fisicoquímicos para la remoción de sólidos en suspensión y sólidos disueltos; por lo regular se utiliza la clarifloculación, ultrafiltración y ósmosis inversa.

4.10.4.3. Recuperación en otros puntos de proceso:

Similar al punto anterior solamente que pueden ser la recuperación en algunos otros equipos como son calderas, dirigidos a los tratamientos adecuados para reusar como agua de repuesto (López, 2001).



4.10.4.4. Ventiladores:

El ahorro por el ajuste del ángulo de ataque en las aspas del ventilador, puede manejar más flujo de aire para lograr un enfriamiento más eficiente sin utilizar más agua. Así mismo, puede reducir la potencia en el motor del ventilador y en consecuencia, ahorrar en el consumo de la energía eléctrica (Hensley, 2006).

4.11. Consideraciones Técnicas

La experiencia ha llevado a formular relaciones para calcular las pérdidas por arrastre (P_A), por evaporación (P_E), por purga (P_P) las cuales se encuentran en el capítulo 2 en el punto 2.8.1.2 con la finalidad de conocer el volumen de agua de repuesto (A_R) necesaria para complementar el volumen constante del agua en la torre (A_T) (Perry 1995).

Aunque con las ecuaciones del capítulo 2 punto 2.8.1.2 se deben utilizar con flujos en GPM y temperatura en °F debido a que los factores son producto del aprendizaje empírico, se puede determinar un balance con unidades del sistema internacional como se muestra en la ecuación 42.

$$P_E = \frac{A_T \cdot x \Delta T \cdot C_p}{H_v} \quad \text{Ecuación 42.}$$

Donde

C_p es el calor específico del agua se encuentra alrededor de $4.184 \left[\frac{KJ}{Kg \cdot ^\circ C} \right]$

H_v es el calor latente de vaporización del agua se encuentra alrededor de $2260 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$

ΔT es la diferencia entre el agua fría y la caliente en $[^\circ C]$

Las pérdidas por arrastre (P_A), si el fabricante no las proporciona o no se tienen se pueden estimarse de la siguiente manera.



$P_A = 0.3$ a 1.0 % de A_T para torres de enfriamiento de tiro natural.

$P_A = 0.1$ a 0.3 % de A_T para torres de enfriamiento de tiro inducido.

$P_A =$ alrededor de 0.01% de A_T si la torre de enfriamiento tiene eliminadores de niebla

Los ciclos de concentración en las torres de enfriamiento en una refinería de petróleo normalmente se encuentran entre el 3 al 7. En algunas grandes plantas de energía. Los ciclos de concentración de las torres de enfriamiento pueden ser mucho más altos (López, 2001).

4.11.1. Orientación de la torre

Algunas torres de enfriamiento son construidas en una posición que de cierta forma resulta inadecuada para su operación pues existen árboles, tuberías elevadas, paredes, corrientes de aire que pueden ocasionar dos problemas:

1. Recirculación. Como ya se sabe, es un fenómeno que consiste en que la humedad del aire descargado de alguna forma se reintroduce en la torre. Esto incrementa la humedad del aire e inhibe la evaporación por lo tanto la capacidad térmica disminuye.
2. Reducción del volumen de aire de entrada. Esto ocasiona un decremento en la capacidad térmica de la torre.

Para prevenir la recirculación y la reducción en el volumen de aire las torres de enfriamiento deben construirse en libre de obstrucciones y factores influyentes. Sin embargo, una de las opciones más recurridas es la construcción de un muro que aislé a la torre en la forma deseada o bien, la construcción de una serie de persianas para que oriente de forma adecuada el aire y las chimeneas que orienten la pluma (Cruz, 1999).



4.11.2. Humedad del aire

Para determinar el coeficiente de transferencia se debe de tomar en cuenta la humedad del aire ya que los reportados por la literatura para la industria son más bajos; la entrada del aire húmedo óptimo para el relleno se refleja en una mayor capacidad térmica (Facão, 2004; Smrekar, 2006).

4.11.3. Aire de entrada

Es muy importante que las entradas de aire no se encuentren obstruidas para que el paso del aire por el relleno de la torre mayor capacidad térmica (Milosavljevic, 1999).

4.11.4. Recirculación de agua

Es necesario recordar que no se debe abusar de la recirculación, ya que el agua debe ser siempre regenerada, ya que la calidad baja debido a los elementos y compuestos que disuelve el agua, por lo que es necesario encontrar el costo óptimo entre el reacondicionamiento y el abastecimiento (Jiménez, 2001).

4.11.5. Tamaño de las gotas de agua

El diámetro de las gotas del agua es el factor más evidente bajo cierta velocidad del aire ya que si son muy pequeñas las arrastra el aire y si son muy grandes no existe una buena transferencia (Qi, 2007).

4.11.6. Leyes de los ventiladores

Todos los ventiladores de propela operan en acuerdo con leyes en común, para un ventilador dado en un sistema de enfriamiento se considera lo siguiente:



- a. La capacidad (cfm) varía con la relación de velocidad (rpm) y directamente con el ángulo de lanzamiento de las hojas relativa al plano de rotación.
- b. La presión estática (hs) varía al cuadrado de la relación de velocidad.
- c. El flujo del ventilador varía al cubo de la relación de capacidad.
- d. A un constante (cfm), la potencia del ventilador y la presión estática varía directamente con la densidad del aire (CONAE, 2005).

4.11.7. Problemas más comunes

Los problemas más comunes que afectan la capacidad de enfriamiento son:

Caudal de aire insuficiente.

Caudal de agua muy grande.

Carga térmica superior a la de diseño.

Distribución de agua desigual en el relleno

Se pueden reducir realizando las siguientes actividades:

Quitar objetos extraños de las persianas, del relleno y eliminadores de niebla.

Comprobar el paso de las aspas del ventilares y aumentar si fuera preciso.

Regular el caudal de agua al valor de diseño de operación

Compara la disipación de calor real con el de diseño de operación. Consultar si se precisa aumentar la capacidad de la torre.

Limpiar y/o ajustar el sistema de distribución de agua (Cruz, 1999).

Sin quitarle importancia a lo anterior de recomendar absolutamente el mantenimiento preventivo y un buen tratamiento de agua (Moran, 1975).



5. PROPUESTA

El resultado de todo lo evaluado, tanto el estado actual de la torre TE-00, como las tecnologías que existen en el mercado para concretar la propuesta de modernizar para la mejora de la torre de enfriamiento, cual consiste en:

5.1. *Relleno*

Cambio de relleno tipo salpique de la marca Opti-bar el cual garantiza el proveedor aumentar 30% más la disipación de calor que equivale a disipar 117, 234,000 BTU/h adicionales.

El costo del retiro del relleno existente e instalación aproximada de 1440 piezas por celda es aproximadamente de \$1, 116,000 y la inversión total del relleno se encuentra alrededor de \$ 6, 696,000.

5.2. *Eliminador de niebla*

Cambio del eliminador de niebla de la marca XCEL plus eliminador, el cual garantiza el proveedor ahorrar 45 GPM (10.22 m³/h) de agua.

Su costo del retiro del eliminador existente e instalación aproximada de 180 piezas por celda es aproximadamente de \$ 240,000 y la inversión total del eliminador se encuentra alrededor de \$ 1, 440,000.

5.3. *La calidad de agua*

La instalación de dos filtros marca Lenntech, en la salida del agua fría (suministro), tiene un costo aproximado de \$1, 000,000. El costo de operación al año, de los dos filtros es igual a \$ 2, 000,000 la inversión total para la calidad de agua es igual a \$ 3, 000,000.



5.4. *Ámbito Económico*

Esta propuesta garantiza el proveedor un aumento del 30% en disipación de calor el cual significa que la capacidad de enfriamiento aumenta esta el 91% tomando en cuenta las condiciones de diseño. Cabe mencionar que las condiciones de diseño se modifican al modificar la torre.

En la Tabla 13, se muestra los ahorros de agua y la inversión por cada cambio realizado (OMNI, 2007).

Tabla 13. Inversión

Instalación	Inversión (\$)	Agua (GPM)	Monto (\$/año)
Relleno	6,696,000	-234	-4,060,700
Eliminador	1,440,000	45	780,500
Filtros	1,000,000	634.75	11,009,600
PROPUESTA	9,136,000	444.75	7,714,099

El costo del agua de pozo en Salamanca Guanajuab es de \$/galón 0.033 (CONAGUA, 2007).

El costo de operación de los filtros es de 2, 000,000. \$/año.

La TIR que presenta esta propuesta es de 34 %.



6. CONCLUSIONES

El presente trabajo estuvo enfocado a presentar metodologías para la evaluación térmica de torres de enfriamiento y a la revisión de opciones tecnológicas, lo cual en conjunto permitiera elaborar una propuesta de modernización para la mejora de la torre con un consecuente ahorro de agua.

Existen diversas metodologías para la evaluación de la capacidad térmica de una torre de enfriamiento. Para cada caso en particular se debe de seleccionar la más adecuada respecto a las condiciones de información con las cuales se cuenta la torre de enfriamiento en estudio. En este trabajo, se utilizaron metodologías técnicas de uso internacional que son el resultado de la experiencia de tecnólogos fabricantes de torres de enfriamiento y que son aceptadas en México por la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE).

En el presente trabajo se evaluó un caso de estudio de una torre de enfriamiento de una refinería de petróleo que por motivos de confidencialidad de la información fue designada como TE-00. Para la torre de enfriamiento TE-00 no se contaba con sus curvas de operación debido a esto la metodología más adecuada para la evaluación térmica fue el método de Merkel.

Como resultado de un estudio de los productos que se encuentran en el mercado de torres de enfriamiento, se pudo constatar que existe un amplio abanico de opciones para diferentes necesidades de agua de enfriamiento. Dichas opciones van desde instalaciones modulares para pequeñas demandas de agua, hasta la construcción de la torre de enfriamiento que superan hasta por un 300% la capacidad de la torre de enfriamiento TE-00. Las tecnologías actualmente disponibles cuentan con ventajas y desventajas, la decisión para su selección en el presente caso fue enfocada el ahorro de agua y aumento de la capacidad de enfriamiento.



Las tecnologías enfocadas al ahorro de agua se refieren sobre todo al cambio de elementos internos de las torres de enfriamiento, ya sea para maximizar el área de transferencia agua – aire, para disminuir las purgas de las torres, o bien para evitar la pérdida de agua por arrastre. Con respecto a este último punto, se encontró que un cambio de eliminadores de niebla de alta eficiencia puede evitar grandes pérdidas por arrastre. En lo que se refiere a la minimización de pérdidas de agua por purgas de las torres, los filtros de arena permiten aumentar la calidad del agua para aumentar los ciclos de concentración con lo que se disminuyen las pérdidas por purga. Por otra parte, un cambio de los rellenos o empaques de las torres de enfriamiento, puede incrementar la capacidad térmica garantizando un aumento del 30% de la disipación de calor.

Para el caso de estudio de la torre TE-00, la inversión de la desinstalación del relleno y eliminadores existentes así como el cambio por otros de reciente tecnología representa una inversión aproximada de \$ 9,136,000 con un gasto de operación anual de \$ 2, 000,000 con una TIR 34%.

El cambio de tecnología figura en un aumento del 91% de la capacidad térmica de la torre TE-00 con respecto al diseño original, con un ahorro de agua 444.75 GPM (101 m³/h) que representa aproximadamente 7, 714,099 \$/año.

Se puede concluir, en términos generales, que llevando a cabo la propuesta de modernización para la mejora de la capacidad térmica contenida en el presente trabajo cuenta con un ahorro de agua en la torre de enfriamiento TE-00.



7. BIBLIOGRAFÍA

1. Burger, R. 1975 "Cooling Tower Drift Elimination" American Institute of Chemical Engineers USA pag 87, 88.
2. Cruz Mañanto, J 1999 "Revisión de criterios de selección dimensionamiento y especificaciones de torres de enfriamiento", Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Tesis de licenciatura en Ingeniería en Alimentos.
3. Cruz Mendiola, J. 2007 "Guía para la evaluación técnica de torres de enfriamiento en operación", Facultad de Química. Tesis de licenciatura en Ingeniería Química.
4. Facão J., Oliveira A., 2004 "Heat and mass transfer correlations for the design of small indirect contact cooling towers", Applied Thermal Engineering; Portugal; Department of Mechanical Engineering and Industrial Management, Faculty of Engineering, University of Porto, Vol 24 pp 1969-1978.
5. Hensley, J. 2006 "Cooling Tower fundamentals" segunda edición; Editorial SPX Cooling Technologies, Inc; USA pp 8-13, 29, 50, 65, 76, 99
6. Instituto para la diversificación y ahorro de energía (IDAE).2006 "Guía Térmica de torres de refrigeración" España publicado por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio pp 71, 72.
7. Jiménez B. 2001 "La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnologías apropiada" México; Editorial Limusa Noriega Editores pp 177-180, 183, 200, 201.
8. Khan J., Yaqub M, Zubair S. 2003 "Performance characteristics of counter flow wet cooling towers", Energy Conversion and Management; Arabia Saudita; Department of Mechanical Engineering, King Fahd University of Petroleum and Minerals Vol. 44 pp 2073-2091.
9. López Olalde, S. 2001 "Diseño de torre de enfriamiento con un estudio de caso"; Facultad de Química UNAM. Tesis de licenciatura en Ingeniería Química.
10. Martínez Urincho, M. 1999 "Procedimiento para la eficientización en torres de enfriamiento para plantas de proceso", Facultad de Química UNAM. Tesis de licenciatura en Ingeniería Química.



11. Milosavljevic N., Heikkilä P. (2001) "A comprehensive approach to cooling tower design", Applied Thermal Engineering; Finlandia; Valmet Corporation, Air systems Pansion Turku Vol 21 pp 899-915.
12. Moran. D. 1975 "Reducing Energy Loss in Cooling Tower" American Institute of chemical Engineers USA pag 19.
13. Occupational Safety and Health Administration (OSHA), 1996. *OSHA Instruction TED 1.15 CH-1*. Washington, DC: OSHA, US Department of Labor.
14. Perry, R. 1995 "Manual del Ingeniero Químico" México Sexta edición, Tercera en español. Editorial McGraw-Hill pp. 12-4, 12-5, 12-13 – 12-18, 12-20, 12-21.
15. Qi X., Liu Z., Li D. 2007 "Performance characteristics of a shower cooling tower", Energy Conversion and Management; China; Center for Combustion and Environmental Technology, Shanghai Jiao Tong University, Huashan Vol 48 pp 143-203.
16. Qureshi B., Zubair S. 2006 "A complete model of wet cooling towers with fouling in fills" Applied Thermal Engineering; Arabia Saudita Mechanical Engineering Department, King Fahd University of Petroleum and Minerals (KFUPM) Vol 26 pp 1982-1989.
17. Smrekar J., Sirok B. 2006 "Improving the efficiency of natural draft cooling towers", Energy Conversion and Management; Eslovenia ; Faculty of Mechanical Engineering Vol 44 pp 1086-1100.
18. SPX Cooling Technologies, Inc. 2007 "*Marley XCELplus Eliminator*" USA.
19. Vázquez Rivera, S. 2000 "Implementación de una hoja de cálculo en una operación de torre de enfriamiento", Facultad de Química UNAM. Trabajo escrito vía curso de educación continua para obtener título de Ingeniería Química.

Códigos y normas

1. Cooling Technology Institute Acceptance Test Codes, 1982. (*Antes Cooling Tower Institute*) Instituto que certifica a los fabricantes de torres de enfriamiento y se encuentra en <http://www.cti.org>
2. Environmental Protection Agency (EPA), *Determination of stack gas velocity and volumetric flow rate* que se encuentra en <http://www.epa.gov/ttnemc01/promgate/m-02.pdf>



3. Norma Mexicana NMX-AA-009-1993-SCFI “*Determinación de flujo de gases en un conducto por medio de Tubo de Pitot*” aprobada el 13 de Diciembre de 1993.
4. Norma Mexicana NMX-AA-054-1978 “*Determinación del contenido de humedad en los gases que fluyen por un conducto.- Método gravimétrico*” aprobada el 2 Agosto de 1978.

Paginas web

1. Baltimore Aircoil Company (B.A.C.) 2007 Empresa Americana especialista en sistema de enfriamiento (en línea) y se encuentra en <http://www.baltimoreaircoil.com> (consultada el día 18 de Mayo de 2007)
2. C. E. Shepherd Company 2007 empresa americana dedicada a la fabricación de torres de enfriamiento (en línea) se encuentra en http://www.ceshepherd.com/ctc_cooling_tower_components.html (consultada el día 24 de julio de 2007)
3. Comisión Nacional de Ahorro de Energía en México (CONAE), (en línea) ultima actualización el día 24 de octubre de 2005 disponible en <http://www.conae.gob.mx> (consultada el 31 de mayo de 2007)
4. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (en línea) ultima actualización el día 12 de julio de 2007 disponible en <http://www.cna.gob.mx> (consultada el día 23 de agosto de 2007)
5. Ecodyne 2007 empresa canadiense especialista en temas de agua, (en línea) y se encuentra en <http://www.ecodynecoolingtowers.com/#> (consultada el día 12 de junio de 2007)
6. EVAPCO, Inc. 2007 Empresa Americana especialista en sistema de enfriamiento(en línea) y se encuentra en <http://www.evapco.com> (consultada el día 4 de septiembre de 2007)
7. Grupo OMNI 2007 grupo de empresas mexicanas que representan firmas europeas con experiencia en diversas áreas de la industria (en línea) y se encuentra en <http://www.grupo-omni.com.mx> (consultada el día 6 de junio de 2007)
8. HD Hidrotermica. 2007 empresa brasileña dedicada a fabricación de torres de enfriamiento (en línea) y se encuentra en <http://www.hd.ind.br/PDF/retentor1.pdf> (consultada el día 20 de junio de 2007)



9. Ingeniería y tecnología para la industria FIBER. 2005 empresa chilena fabricante de módulos de enfriamiento (en línea) y se encuentra en <http://www.fibertower.cl/torres.htm> (consultada el día 15 de mayo de 2007)
10. McQuary internacional 2007 Empresa americana especialista en sistema de refrigeración (en línea) y se encuentra en <http://www.mcquary.com> (consultada el día 29 de mayo de 2007)
11. Tecno Fiber empresa especialista en torre de enfriamiento en Chile.(en línea) Última actualización 25 de junio de 2007 disponible en <http://www.tecnofiber.cl/Cooling%20tower.htm> (consultada el día 22 de agosto de 2007)
12. Termich S.A de C.V (Marley Coding Towers) 2007 empresa mexicana dedicada a la fabricación de torres de enfriamiento (en línea) se encuentra en [http://www.exportadormexicano.com.mx/Nuevo_Leon/TERMICH_S.A. DE C.V. MARLEY COOLING TOWERS 22638.htm](http://www.exportadormexicano.com.mx/Nuevo_Leon/TERMICH_S.A._DE_C.V._MARLEY_COOLING_TOWERS_22638.htm) (consultada el 5 de junio de 2007)
13. Tower Components Inc. 2007 empresa americana dedicada en la fabricación de internos de torres de enfriamiento (en línea) y se encuentra en <http://www.towercomponentsinc.com/optigrd/default.htm> (consultada el día 25 de julio de 2007)
14. Tower Tech Inc. 2007 empresa americana que fabrica modulares de enfriamiento (en línea) y se encuentra en <http://www.towertechinc.com> (consultada el día 7 de agosto de 2007)



8. ANEXOS

8.1. Anexo 1 “Balance”

Método de Curvas Características “El criterio de Merkel”

Este Método de Curvas, es uno de los dos métodos aprobados por el Código CTI TAC- 105 (Cooling Tower Institute Acceptance Test Codes, 1982.).

La descripción detallada del método se presenta a continuación.

El por ciento de capacidad para la torre de enfriamiento por el método del criterio de Merkel), esta dado por la ecuación (a).

$$\% \text{ de Capacidad} = \frac{\left(\frac{L}{G}\right)_0}{\left(\frac{L}{G}\right)_{\text{DISEÑO}}} \times 100 \quad \text{Ecuación a.}$$

$\left(\frac{L}{G}\right)_{\text{DISEÑO}}$ = Proporcionado por el fabricante.

$\left(\frac{L}{G}\right)_0$ = función $\left(\frac{L}{G}\right)_{\text{PRUEBA}}$ y $\left(\frac{KaV}{L}\right)_{\text{PRUEBA}}$

(evaluada posteriormente en la gráfica correspondiente) =
[lb _ agua / lb _ aire _ sec o]

En donde:

$\left(\frac{L}{G}\right)_{\text{DISEÑO}}$ = Relación de diseño del flujo de agua con respecto al flujo de aire seco,
en [lb _ agua / lb _ aire _ sec o]

$\left(\frac{L}{G}\right)_0$ = Relación corregida del flujo de agua con respecto al flujo de aire seco, este valor se determina en una gráfica que posteriormente se determina con los valores de $\left(\frac{L}{G}\right)$ y $\left(\frac{KaV}{L}\right)$ de diseño y prueba [lb _ agua / lb _ aire _ sec o]

% de capacidad = % de capacidad de una celda de la torre



A continuación se desarrolla completamente la memoria de cálculo para determinar el % de capacidad de la torre de enfriamiento de agua, por el método del criterio de Merkel.

Obtención del $(L/G)_0$

Para calcular el $(L/G)_0$, se necesita primero obtener el $(L/G)_{PRUEBA}$ y $(KaV/L)_{PRUEBA}$

Cálculo del $(L/G)_{PRUEBA}$

El cálculo del $(L/G)_{PRUEBA}$ se determina mediante la ecuación (b):

$$(L/G)_{PRUEBA} = \left(\frac{L_{PRUEBA}}{L_{DISEÑO}} \right) \times \left(\frac{BHP_{DISEÑO}}{BHP_{PRUEBA}} \right)^{1/3} \times (L/G)_{DISEÑO} \quad \text{Ecuación b}$$

$$(L/G)_{PRUEBA} = [lb_agua/lb_aire_sec\ o]$$

En donde:

L_{PRUEBA} = Flujo de agua de prueba, este valor se toma, (GPM).

$L_{DISEÑO}$ = Flujo de agua de diseño, este valor se toma, (GPM).

BHP_{PRUEBA} = Es la potencia al freno del ventilador de prueba, determinada a partir del voltaje y amperaje y factor de potencia del motor del ventilador en (HP).

$BHP_{DISEÑO}$ = Es la potencia al freno del ventilador de diseño, proporcionada por el fabricante, o calculada a partir de datos de diseño o nominal, en (HP).

$(L/G)_{PRUEBA}$ = Relación de diseño de flujo de agua con respecto al flujo de aire seco

Calculo de “BHP prueba”

Cálculo de la potencia al fren del ventilador “BHP de prueba”

La potencia al freno del ventilador “BHP de prueba” se calcula mediante las ecuaciones (c) y (d)



$$BHP_{PRUEBA} = \frac{\sqrt{3} \times V \times A \times F.P.}{0.7457 \times 1000} \quad \text{para un motor trifásico} \quad \text{Ecuación c.}$$

$$BHP_{PRUEBA} = \frac{V \times A \times F.P.}{0.7457 \times 1000} \quad \text{para un motor monofásico} \quad \text{Ecuación d.}$$

En donde:

$\sqrt{3}$ = valor para el motor trifásico del ventilador (adimensional).

V = Voltaje del motor del ventilador, este valor se toma, (Volts).

A = Amperaje del motor del ventilador, este valor se toma, (Ampere).

F.P. = Factor de potencia del motor del ventilador, este valor es adimensional.

0.7457 = Factor de conversión de Watts a HP (1 HP = 0.7457 kW).

1000 = Valor para convertir watts a kilowatts (1 kW = 1000 W).

BHP de prueba = Potencia al freno del ventilador de prueba BHP, (HP).

Cálculo del “BHP de diseño”

El “BHP de diseño”, se obtiene de la hoja de datos de la torre, en caballos de potencia (HP). En caso de que no se cuente con este valor se deberá calcular mediante la ecuación (e):

$$BHP_{DISEÑO} = \frac{ACFM * \Delta P_{TOTAL}}{6356 * \eta^{RED} * \eta^{VENT}} \quad \text{Ecuación e.}$$

En donde:

ACFM = Cantidad de aire real incluyendo agua evaporada, en pies por minuto (ft/min).

ΔP_{TOTAL} = Caída de presión total que tiene que vencer el ventilador. Es decir, incluye la presión estática total (pérdidas a través de la torre, más la presión de velocidad), (pulg H₂O).

η^{RED} = Eficiencia del reductor de velocidad, (%).

η^{VENT} = Eficiencia del ventilador, (%).



6356 = Factor de conversión, para obtener potencia.

BHP diseño = Potencia al freno de diseño a la entrada del motor, (HP).

Datos que deben de ser proporcionados por el fabricante

η^{REC} = Eficiencia de recuperación en la chimenea, (%).

η^{RED} = Eficiencia del reductor de velocidad, (%).

η^{VENT} = Eficiencia del ventilador, (%).

ACFM = Cantidad de aire real incluyendo agua, (ft/min).

$P_{est.tot}$ = Caída de presión total que tiene que vencer el ventilador. Incluye la presión estática total (pérdidas a través de la torre, más la presión de velocidad), (pulg de H₂O).

Vg = Velocidad del aire, (ft/min).

ρ = Densidad del aire saliente, (lb/ft³).

Ds = Diámetro de la chimenea en la parte superior, (ft).

Cálculo de velocidad del aire en el ventilador

Esta velocidad será calculada en la salida de la chimenea con ayuda de las ecuaciones (f) y (g).

$$A_s = \pi * D_s / 4 = (ft^2) \quad \text{Ecuación f.}$$

$$V_s = ACFM / A_s = [ft/min] \quad \text{Ecuación g.}$$

En donde:

π = Constante 3.1415

A_s = Área de flujo de aire a la salida de la chimenea, en pies cuadrados (ft²)

V_s = Área de flujo de aire a la salida de la chimenea, en pies cuadrados (ft²).

Cálculo de presión de velocidad

Cálculo de presión de velocidad en la salida del ventilador (PVS) (PVG) se realiza con ayuda de la ecuación (h) e (i)



$$PVS = \left| \frac{Vs^2}{1096.5 / (\rho)^{1/2}} \right| = (\text{pulg H}_2\text{O}) \quad \text{Ecuación h.}$$

$$PVG = \left| \frac{Vg^2}{1096.5 / (\rho)^{1/2}} \right| = (\text{pulg H}_2\text{O}) \quad \text{Ecuación i.}$$

En donde:

ρ = Densidad del aire saliente de la torre, (lb/ft³)

PVS = Presión de velocidad a la salida, (pulg de H₂O).

PVG = Presión de velocidad en la garganta, (pulg de H₂O).

Cálculo de la presión total se obtiene con ayuda de las ecuaciones (j), (k) y (l)

$$REC = \eta^{REC} (PVG - PVS) = [\text{pulg H}_2\text{O}] \quad \text{Ecuación j.}$$

$$PVREC = PVG - REC = [\text{pulg H}_2\text{O}] \quad \text{Ecuación k.}$$

$$\Delta P_{TOTAL} = P_{est.tot} + PVREC = [\text{pulg H}_2\text{O}] \quad \text{Ecuación l.}$$

El valor obtenido de ΔP_{TOTAL} y los valores del por el fabricante (ACFM, η^{RED} , η^{VENT}), se sustituye en la ecuación (e) para obtener el BHP de diseño.

En donde:

REC = Recuperación de velocidad, (pulg H₂O).

PVREC = Presión de velocidad recuperada, (pulg H₂O)

ΔP_{TOTAL} = Caída de presión total en la torre de enfriamiento, (pulg H₂O).

En caso de no contar con el BHP del fabricante de la torre de enfriamiento, se puede obtener un valor preliminar del BHP de diseño, utilizando la potencia nominal del motor del ventilador.



Cálculo del $(L/G)_0$

Para el cálculo del $(L/G)_0$, se proporciona ya los datos de diseño y los resultados de la prueba de comportamiento de la torre en estudio, utilizando la curva característica de las torres de enfriamiento.

Tabla A Recopilación de información de prueba y diseño

Variable	Símbolo	Unidad	Diseño	Prueba celda
Flujo de agua	A_T	GPM	60,000	45,000
Temperatura de agua caliente	TAC	° F	107.6	100.6
Temperatura de agua fría	TAF	° F	89.6	93.7
Temperatura de bulbo húmedo	TBH	° F	82.4	81.2
Intervalo de enfriamiento (TAC-TAF)	-	° F	18	16.9
Aproximación (TAF-TBH)	-	° F	7.2	12.5
Potencia al freno del ventilador	BHP	HP	100	60.12
Relación característica de la torre	(KaV/L)	adimensional	2.47	-
Relación de flujo	(L/G)	lb agua / lb aire seco	1.8	-

Tabla B Variaciones permitidas por el Código Cooling Technology Institute (CTI).

Variable	Desviación permitida por código CTI	Desviación entre prueba y diseño
TBH	± 15 °F	- 0.46 °F
Intervalo	± 20 %	-16.24 %
Flujo	± 10 %	+6.95 %

Como se observa en la Tabla B, la desviación en los valores de la TBH, intervalo y flujo de agua, están en los límites de aceptación marcados por CTI, por lo que la prueba de comportamiento se da cómo valida y puede seguirse con los cálculos para determinar el % de capacidad de la celda.

**Cálculo del (L / G) prueba**

El (L / G) prueba se determina con la ecuación (e), sustituyendo los valores de la Tabla A.

$$\left(\frac{L}{G}\right)_{PRUEBA} = \left(\frac{L_{PRUEBA}}{L_{DISEÑO}}\right) x \left(\frac{BHP_{DISEÑO}}{BHP_{PRUEBA}}\right)^{1/3} x \left(\frac{L}{G}\right)_{DISEÑO} \quad \text{Ecuación e}$$

$$\left(\frac{L}{G}\right)_{PRUEBA} = \left(\frac{45000}{60000}\right) x \left(\frac{100}{60.21}\right)^{1/3} x (1.8)$$

$$= 1.60 \text{ lb agua /lb aire seco}$$

Cálculo del $\left(\frac{KaV}{L}\right)_{PRUEBA}$

Este se calcula de acuerdo a la ecuación (m) y la resolución de la integral es la ecuación (n):

$$\left(\frac{KaV}{L}\right)_{PRUEBA} = \int_{TAF}^{TAC} \frac{dT}{h_w - h_a} \quad \text{Ecuación m.}$$

$$\left(\frac{KaV}{L}\right)_{PRUEBA} = \left(\frac{TAC - TAF}{4}\right) x \left(\left(\frac{1}{\Delta h1}\right) + \left(\frac{1}{\Delta h2}\right) + \left(\frac{1}{\Delta h3}\right) + \left(\frac{1}{\Delta h4}\right)\right) \quad \text{Ecuación n.}$$

En donde:

$$\left(\frac{KaV}{L}\right)_{PRUEBA} = \text{Valor característico de la torre, (adimensional)}$$

$\int \frac{dT}{h_w - h_a}$ Representa el perfil de temperaturas, en la torre para TAF_{h_w - h_a} calcular

la transferencia de calor, la integral se resuelve por el criterio de Merkel, evaluando por incrementos, y se estiman cuatro temperaturas en la torre; a éstas temperaturas se calcula la entalpía de la mezcla de aire agua y posteriormente se calcula la entalpía de la corriente de aire, evaluando así a la integral, el procedimiento es el siguiente:



Determinación del perfil de las cuatro temperaturas.

El perfil de temperatura se determina con las ecuaciones (o), (p), (q) y (r)

$T1^* = TAF + 0.1 (TAC-TAF)$	Ecuación	o.
$T2^* = TAF + 0.4 (TAC-TAF)$	Ecuación	p.
$T3^* = TAC - 0.4 (TAC-TAF)$	Ecuación	q.
$T4^* = TAC - 0.1 (TAC-TAF)$	Ecuación	r.

En donde:

$T1^*$ = Temperatura estimada en el punto 1, del perfil de temperatura (°F).

$T2^*$ = Temperatura estimada en el punto 2, del perfil de temperatura (°F).

$T3^*$ = Temperatura estimada en el punto 3, del perfil de temperaturas (°F)

$T4^*$ = Temperatura estimada en el punto 4, del perfil de temperaturas (°F)

Sustituyendo los valores de la Tabla A, tenemos:

$$T1^* = 93.7 + 0.1 (100.6 - 93.7) = 94.39 \text{ } ^\circ \text{F}$$

$$T2^* = 93.7 + 0.4 (100.6 - 93.7) = 96.46 \text{ } ^\circ \text{F}$$

$$T3^* = 100.6 - 0.4 (100.6 - 93.7) = 97.84 \text{ } ^\circ \text{F}$$

$$T4^* = 100.6 - 0.1 (100.6 - 93.7) = 99.91 \text{ } ^\circ \text{F}$$

A estas 4 temperaturas se obtiene la entalpía de la mezcla de aire - agua

También se determina la entalpía de la mezcla aire – agua con la grafica del Anexo 2, para la temperatura de bulbo húmedo de prueba (TBH), en grados (°F).

$$hw1 (@ 94.39 \text{ } ^\circ \text{F}) = 62.5 \text{ BTU / lb}$$

$$hw2 (@ 96.46 \text{ } ^\circ \text{F}) = 66 \text{ BTU / lb}$$

$$hw3 (@ 97.84 \text{ } ^\circ \text{F}) = 68 \text{ BTU / lb}$$

$$hw4 (@ 99.91 \text{ } ^\circ \text{F}) = 72 \text{ BTU / lb}$$

$$hgi (@ 81.2 \text{ } ^\circ \text{F}) = 45 \text{ BTU / lb}$$

En donde:



hw1 = Entalpía de la mezcla aire - agua a T1*, en (BTU / lb aire seco).

hw2 = Entalpía de la mezcla aire - agua a T2*, en (BTU / lb aire seco).

hw3 = Entalpía de la mezcla aire - agua a T3*, en (BTU / lb aire seco).

hw4 = Entalpía de la mezcla aire - agua a T4*, en (BTU / lb aire seco).

hgi = Entalpía del TBH de prueba, en (BTU / lb aire seco).

Cálculo de la entalpía del aire:

La entalpía del aire se determina mediante la ecuación (s)

$$hg2 = (L / G)_{\text{prueba}} \times (TAC - TAF) + hgi \text{ [BTU / lb aire húmedo]} \quad \text{Ecuación s.}$$

También se calcula el perfil de entalpías del aire en los cuatro puntos de la torre (Criterio de Merkel), mediante las ecuaciones (t), (u), (v) y (w)

$$ha1 = hgi + 0.1 (TAC - TAF) * (L/G)_{\text{PRUEBA}} \quad \text{Ecuación t.}$$

$$ha2 = hgi + 0.4 (TAC - TAF) * (L/G)_{\text{PRUEBA}} \quad \text{Ecuación u.}$$

$$ha3 = hg2 - 0.4 (TAC - TAF) * (L/G)_{\text{PRUEBA}} \quad \text{Ecuación v.}$$

$$ha4 = hg2 - 0.1 (TAC - TAF) * (L/G)_{\text{PRUEBA}} \quad \text{Ecuación w.}$$

En donde:

$(L / G)_{\text{prueba}}$ = Relación de prueba del flujo de agua con respecto al flujo de aire seco (lb agua / lb aire seco).

TAC = Temperatura de agua caliente, en (°F).

TAF = Temperatura de agua fría, en (°F).

hgi = Entalpía del aire a la temperatura de bulbo húmedo, en unidad térmica inglesa por libra de aire húmedo (BTU / lb aire seco).

hg2 = Entalpía del aire, en (BTU / lb aire seco).

ha1 = Entalpía del aire en el punto 1, en (BTU / lb aire seco).

ha2 = Entalpía del aire en el punto 2, en (BTU / lb aire seco).



ha3 = Entalpía del aire en el punto 3, en (BTU / lb aire seco).

ha4 = Entalpía del aire en el punto 4, en (BTU / lb aire seco).

Sustituyendo los valores de las ecuaciones (t) a la (w)

$$hg2 = 1.60 * (100.6 - 93.7) + 45 = 56.03 \text{ BTU / lb}$$

$$ha1 = 45.00 + 0.1 * (100.6 - 93.7) * 1.60 = 46.10 \text{ BTU /lb}$$

$$ha2 = 45.00 + 0.4 * (100.6 - 93.7) * 1.60 = 49.41 \text{ BTU /lb}$$

$$ha3 = 56.03 - 0.4 * (100.6 - 93.7) * 1.60 = 51.62 \text{ BTU /lb}$$

$$ha4 = 56.03 - 0.1 * (100.6 - 93.7) * 1.60 = 54.93 \text{ BTU /lb}$$

Calculamos la diferencia de entalpía de la mezcla aire - agua y la entalpía del aire, mediante las ecuaciones (x), (y), (z) y (aa):

$\Delta h1 = hw1 - ha1$	Ecuación	x.
$\Delta h2 = hw2 - ha2$	Ecuación	y.
$\Delta h3 = hw3 - ha3$	Ecuación	z.
$\Delta h4 = hw4 - ha4$	Ecuación	aa.

En donde:

$\Delta h1$ = Diferencia de entalpías para el punto 1 (criterio de Merkel), entre la entalpía de la mezcla de agua - aire y la entalpía del aire, en (BTU / lb aire)

$\Delta h2$ = Diferencia de entalpías para el punto 2 (criterio de Merkel), entre la entalpía de la mezcla de agua - aire y la entalpía del aire, en (BTU / lb aire)

$\Delta h3$ = Diferencia de entalpías para el punto 3 (criterio de Merkel), entre la entalpía de la mezcla de agua - aire y la entalpía del aire, en (BTU / lb aire)

$\Delta h4$ = Diferencia de entalpías para el punto 4 (criterio de Merkel), entre la entalpía de la mezcla de agua - aire y la entalpía del aire, en (BTU / lb aire)

Sustituyendo los valores obtenidos tenemos:



$$\Delta h_1 = 62.5 - 46.10 = 16.40 \text{ BTU / lb}$$

$$\Delta h_2 = 66 - 49.41 = 16.59 \text{ BTU / lb}$$

$$\Delta h_3 = 68 - 51.62 = 16.38 \text{ BTU / lb}$$

$$h_4 = 72 - 54.93 = 17.07 \text{ BTU / lb}$$

Δ

Calculo de $\left(\frac{KaV}{L}\right)_{PRUEBA}$, sustituimos los valores obtenidos en la ecuación (n).

$$\left(\frac{KaV}{L}\right)_{PRUEBA} = \int_{TAF}^{TAC} \frac{dt}{h_w - h_a}$$

$$\left(\frac{KaV}{L}\right)_{PRUEBA} = \left(\frac{TAC - TAF}{4}\right) \times \left(\left(\frac{1}{\Delta h_1}\right) + \left(\frac{1}{\Delta h_2}\right) + \left(\frac{1}{\Delta h_3}\right) + \left(\frac{1}{\Delta h_4}\right)\right)$$

$$\left(\frac{KaV}{L}\right)_{PRUEBA} = \left(\frac{100.6 - 93.7}{4}\right) \times \left(\left(\frac{1}{16.40}\right) + \left(\frac{1}{16.59}\right) + \left(\frac{1}{16.38}\right) + \left(\frac{1}{17.07}\right)\right)$$

$$\left(\frac{KaV}{L}\right)_{PRUEBA} = 0.42$$

En la Tabla c se resumen los datos obtenidos.

Tabla c Resumen de datos de diseño y prueba para la utilización del Método de Merkel.

Variable :	Datos de diseño	Datos de prueba
(L / G)	1.8	1.6
(KaV / L)	2.47	0.42
Aproximación (TAF-TBH) °F	7.2	12.5

Obtención gráfica del $\left(\frac{L}{G}\right)_0$

En caso de no tener él $\left(\frac{L}{G}\right)_{DISEÑO}$ ó él $\left(\frac{KaV}{L}\right)_{DISEÑO}$ se puede utilizar lo siguiente:



En lugar de usar $\left(\frac{KaV}{L}\right)_{DISEÑO}$ él se puede usar la aproximación de diseño para la lectura de la curva característica.

El $\left(\frac{L}{G}\right)_{DISEÑO}$ se puede obtener de dividir el flujo de agua de diseño por celda, el flujo de aire de diseño para una celda.

La obtención del $\left(\frac{L}{G}\right)_0$ (relación de flujo de agua y líquido corregido), se hace gráficamente, mediante el uso de la curva característica de la torre de enfriamiento, la cual se presentan dos curvas, una para obtener los datos en general y otra para cálculos posteriores.

Con los valores obtenidos de $\left(\frac{L}{G}\right)_{DISEÑO} = 1.8$ y con cualquiera de los dos siguientes datos $\left(\frac{KaV}{L}\right)_{DISEÑO} = 2.47$ o la aproximación de diseño = 7.2 y con $\left(\frac{L}{G}\right)_{PRUEBA} = 1.6$ y $\left(\frac{KaV}{L}\right)_{PRUEBA} = 0.42$ se sigue el procedimiento, en la curva característica.

Localizar en la curva característica $\left(\frac{L}{G}\right)_{DISEÑO}$ (**punto A**) y con $\left(\frac{KaV}{L}\right)_{DISEÑO}$ ó la curva característica con la aproximación de diseño (**punto B** ó curva A), con esto se localiza el punto de diseño (**punto E**), se traza una tangente al **punto E** con pendiente - 0.6.

Se localizan ahora los valores de $\left(\frac{L}{G}\right)_{PRUEBA}$ (**punto C**) y con $\left(\frac{KaV}{L}\right)_{PRUEBA}$ (**punto D**) localiza el punto de prueba (**punto F**), se traza una tangente al **punto F** y paralela a la curva característica con pendiente -0.6 del **punto E**.



Moverse sobre esta a tangente al **punto F**, hasta interceptar a la curva característica con la aproximación de diseño = 7.2 ° F, localizando el punto corregido de la torre (**punto G**)

Moverse del **punto G** perpendicularmente al eje (L/G) localizando el **punto H**, este punto corresponde al valor corregido $(L/G)_0$.

El valor de $(L/G)_0$ que se obtiene es 0.55

Cálculo de la capacidad actual de la torre.

Sustituimos los valores obtenidos en la ecuación a:

$$\% \text{ de Capacidad} = \frac{(L/G)_0}{(L/G)_{\text{DISEÑO}}} \times 100 \quad \text{Ecuación a}$$

diseño

$$\% \text{ de Capacidad} = \frac{0.55}{1.8} \times 100 = 30.56\%$$

Este valor indica que a los valores de diseño; la temperatura de agua caliente (TAC = 100.6 °F); temperatura de agua fría (TAF = 93.7 °F); temperatura de bulbo húmedo (TBH = 81.2 °F) y con una potencia de ventilador de 100 BHP, la celda es capaz de enfriar:

$$45000 \times 0.3056 = 13,750 \text{ GPM.}$$



Curva característica de una Torre de Enfriamiento Kav/L & L/G @ DIFERENTES APROXIMACIONES

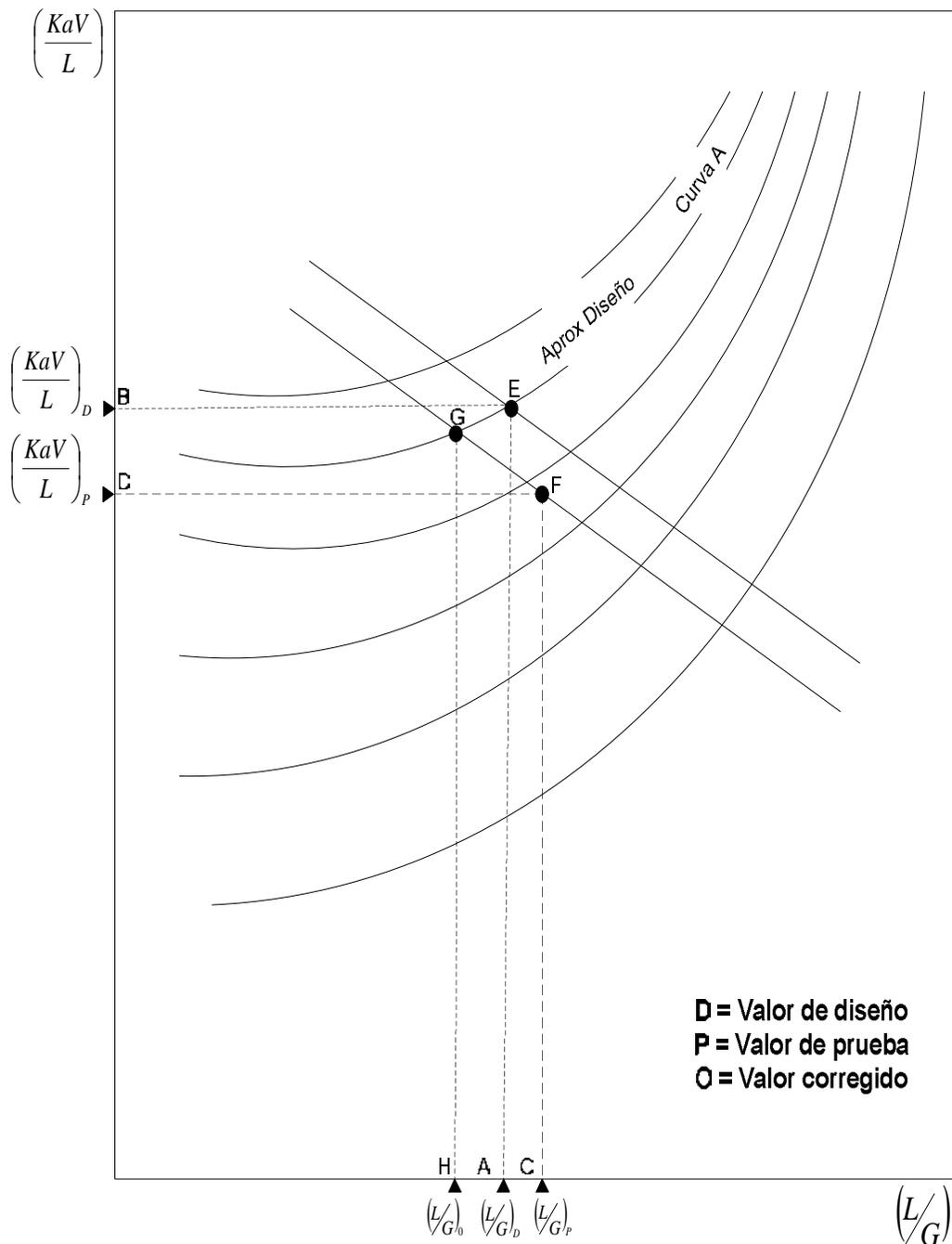


Figura A procedimiento gráfico la lectura del $\left(\frac{L}{G}\right)_0$

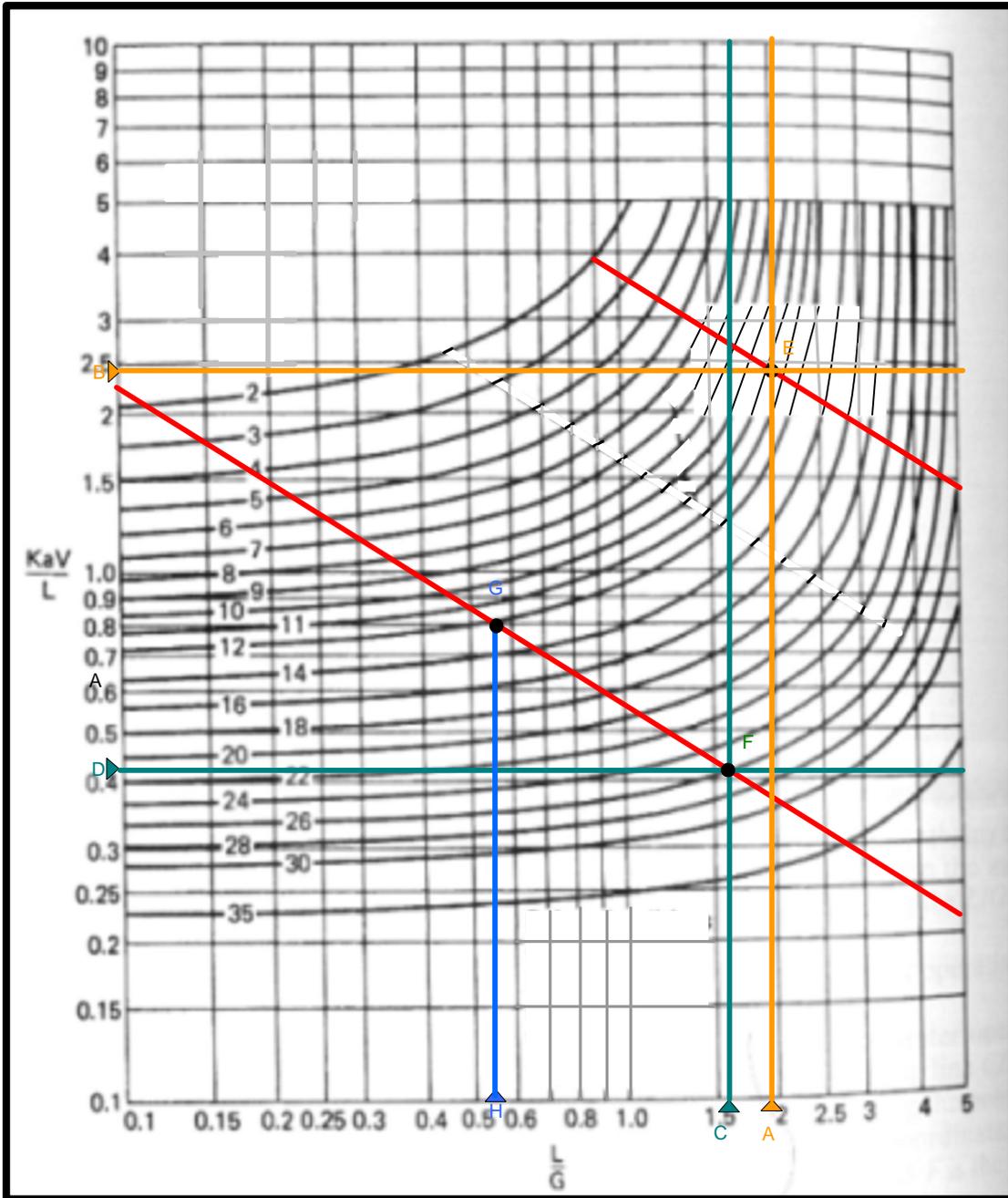


Figura B. Curva Característica



Hoja de resultado del simulador del CTI (Cooling Tower Institute) que se utilizó para la evaluación de la torre de enfriamiento TE-00.



Tower Performance Report

TE-00

Owner: Frantz Blanco
Project: Tesis
Location: Refinería Mexicana
Manufacturer: UNAM
Tower Type: Forced Draft

Cooling Tower Design and Test Data

Parameters	Design	Test
Water Flow Rate	60000.0 gpm	45000.0 gpm
Hot Water Temp.	107.60 °F	100.58 °F
Cold Water Temp.	89.60 °F	93.74 °F
Wet Bulb Temp.	82.40 °F	81.14 °F
Dry Bulb Temp.	86.00 °F	86.00 °F
Fan Driver Power	100.00 bhp	60.12 bhp
Barometric Pressure	29.928 in. Hg.	29.928 in. Hg.
Liquid to Gas Ratio	1.800	0.000

Cold Water Temperatures vs. Range

At 81.14 °F Test Wet Bulb

Range	54002.0 gpm	59993.5 gpm	66000.7 gpm
16.20 °F	87.03 °F	88.26 °F	89.54 °F
18.00 °F	87.30 °F	88.59 °F	89.92 °F
19.80 °F	87.70 °F	88.93 °F	90.31 °F

Cold Water Temperature vs. Water Flow

At 81.14 °F Test Wet Bulb and 6.84 °F Test Range

54002.0 gpm	59993.5 gpm	66000.7 gpm
85.65 °F	86.52 °F	87.54 °F

Cold Water Temperature vs. Water Flow

At 81.14 °F Test Wet Bulb and 6.84 °F Test Range

54002.0 gpm	59993.5 gpm	66000.7 gpm
85.65 °F	86.52 °F	87.54 °F

Inlet Air Properties

	Wet Bulb Temp	Density	Sp. Vol.	Enthalpy
Design	82.40	0.07171	14.2700	46.3139
Test	81.14	0.07177	14.2411	44.8794

Test Results

* Indicates predicted flow is extrapolated.

Adjusted Flow	Predicted Flow	CWT Deviation	Tower Capability
53331.8 gpm	102573.0 gpm *	11.66 °F	30.53 %

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.



Cálculo de disipación de calor

La disipación de calor es la cantidad de energía requerida para llevar a cabo el fenómeno de enfriamiento de agua.

Cálculo de la disipación de calor se determina por la ecuación (bb)

$$Q_D = A_T x (TAC - TAF) x C_p x 510 \quad \text{Ecuación bb}$$

Donde: 510 = Factor de conversión a BTU/h.

Se sustituye la ecuación 17 para los valores de diseño y de prueba.

$$Q_{D_DISEÑO} = 60000 * (107.6 - 89.6) * 1 * 510 = 550,800,000 \text{ BTU/h.}$$

$$Q_{D_PRUEBA} = 45000 * (100.6 - 93.7) * 1 * 510 = 158,355,000 \text{ BTU/h.}$$

Determinación de la eficiencia Térmica

Esta eficiencia es determinada mediante la relación entre la disipación de calor experimental y disipación de calor de diseño, el cual es calculado a partir de la ecuación (cc) (CONAE, 2005).

$$E_T = \frac{Q_{D_PRUEBA}}{Q_{D_DISEÑO}} \quad \text{Ecuación cc}$$

Donde:

Q_{D_PRUEBA} = Disipación de Calor de Prueba.

$Q_{D_DISEÑO}$ = Disipación de Calor de Diseño.

$$E_T = \frac{158,355,000}{550,800,000} = 0.29$$

Cálculo de balance de materia

Para el cálculo de pérdidas por Evaporación, se utiliza la ecuación (dd).

$$P_E = 0.001 x A_T x (TAC - TAF) \quad \text{Ecuación dd.}$$

$$P_E = 0.001 x 45000 x (100.6 - 93.7) = 310.5 \text{ GPM}$$



Para el cálculo de pérdidas por Arrastre, se utiliza la ecuación (ee).

$$P_A = 0.002 \times A_T \quad \text{Ecuación ee.}$$

$$P_A = 0.002 \times 45000 = 90 \text{ GPM}$$

En el cálculo de la Purga, se utiliza la ecuación (ff).

$$P_P = \frac{P_E}{c.c. - 1} - P_A \quad \text{Ecuación ff.}$$

$$P_P = \frac{310.5}{3 - 1} - 90 = 12.5 \text{ GPM}$$

Volumen de repuesto a la torre es calculado con la ecuación (gg).

$$A_R = P_E + P_A + P_P \quad \text{Ecuación gg.}$$

$$A_R = 310.5 + 90 + 12.5 = 412.5 \text{ GPM}$$

Para el cálculo de los ciclos de concentración se utiliza la ecuación (hh).

$$c.c. = \frac{A_R}{P_P + P_A} \quad \text{Ecuación hh.}$$

$$c.c. = \frac{412.3}{12.5 + 90} = 3$$

El calculo de la velocidad del aire fue basada en el Método 2 de la Environmental Protection Agency (EPA), *Determination of stack gas velocity and volumetric flow rate* donde recomiendan el uso de la ecuación (ii).

$$V = KP * FC * \sqrt{\frac{Tch}{PM * Pch} * \bar{\Delta P}^{1/2}} * 3.28 \quad \text{Ecuación ii.}$$

Donde

Tch = temperatura de la chimenea (°C) =29.

PM = peso molecular del aire (g/gmol) = 46.67.

Pch = presión en la chimenea (mmHg) = 774.85.

FC = factor de corrección 0.85 para el motor del ventilador (adimensional).



ΔP = al promedio de la diferencial de presiones de prueba (mmHg) = 14.85

KP = factor reportado en los métodos 34.97 en $\frac{m}{s} \left[\frac{(g / g * mol)(mmHg)}{(^{\circ}K)(mmH_2O)} \right]^{\frac{1}{2}}$

3.28 = factor para transformar a ft/s.

Sustituyendo los valores en la ecuación (ii).

$$V = 34.97 * 0.85 * \sqrt{\frac{29}{46.67 * 774.85}} * 14.85^{\frac{1}{2}} * 3.28 = 34.30 \text{ ft/s}$$

El calculo del flujo por medio de la ecuación (ii) porque solo se multiplica la velocidad por el área de la chimenea que es igual a 50.21 m² para crear la ecuación (jj).

$$\text{Flujo} = V * A * 35.31 \quad \text{Ecuación jj.}$$

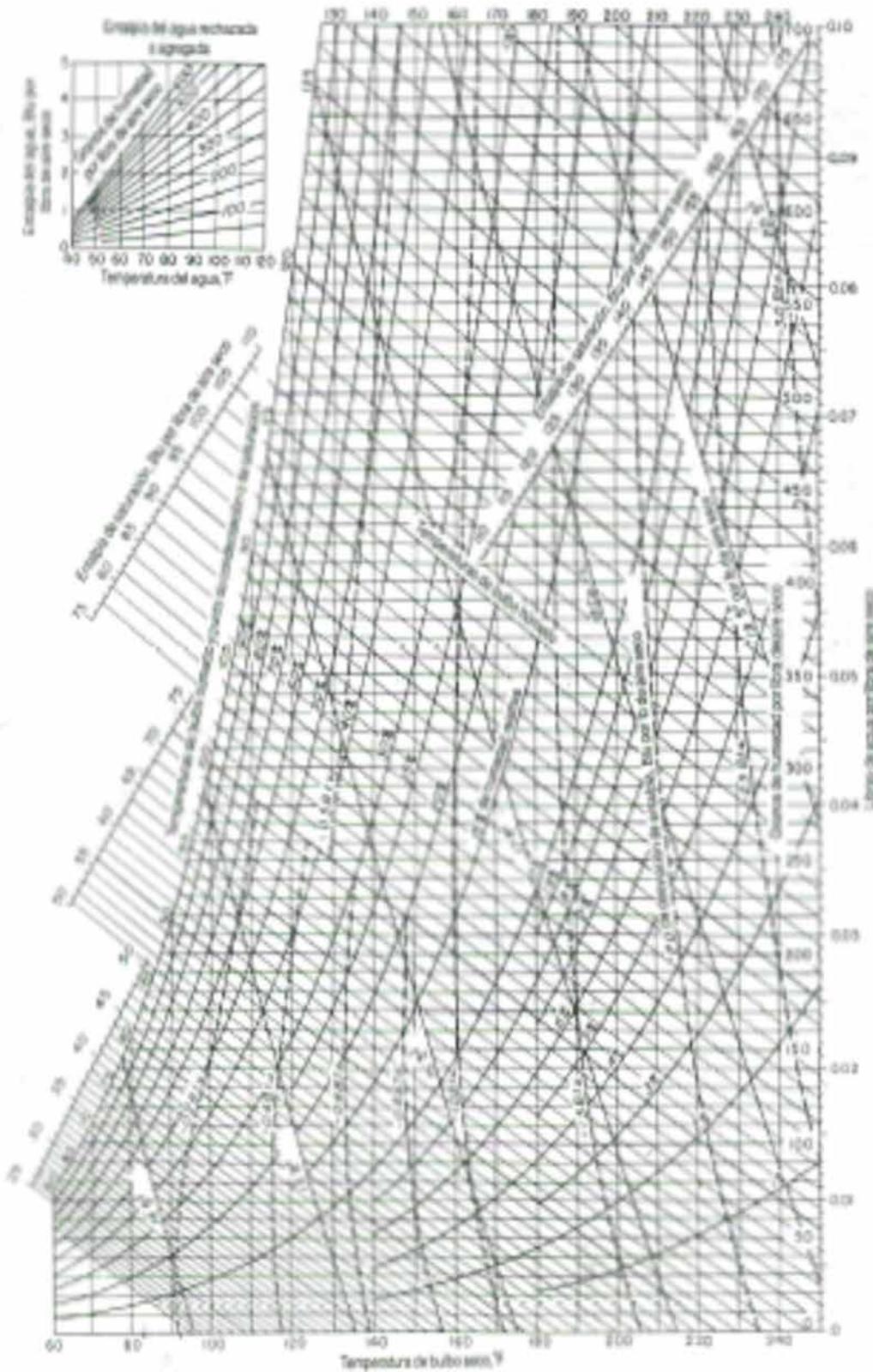
Donde

35.31 es igual factor para convertir a ft³/s.

$$\text{Flujo} = 10.46 * 50.21 = 525.05 \text{ m}^3/\text{s}.$$



8.2. Anexo 2 “Gráfica”





8.3. Anexo 3 “Mediciones en tubería cerrada”

Obtención del valor del diámetro nominal; es necesario determinar el diámetro de la tubería en la cual se hará la medición de flujo y reportar este dato durante la operación y configuración del medidor de flujo. Esto se logra obteniendo el diámetro exterior de la tubería, midiendo con la ayuda de un flexómetro el perímetro (P) de la tubería; dicho valor se divide entre el valor de π (3.1416). Con este valor se consulta una tabla de diámetros nominales de tubería, de donde se obtiene el valor del diámetro interior de la misma (el dato obtenido es alimentado al equipo de medición).

Selección del sitio de instalación; tomando en cuenta que para garantizar respuestas en el equipo es imprescindible que la tubería debe estar llena de fluido (evitar canaleo del fluido en la tubería, que en consecuencia arrojaría valores erróneos o nulos), por lo que de preferencia se escogen tuberías verticales y con flujo ascendente. Además es importante, en la medida de lo posible, seleccionar puntos accesibles y libres de perturbaciones (reducciones, codos, etc.), para evitar que se generen valores erróneos o nulos.

Acondicionamiento de la tubería; es esencial debido a que, en general, la tubería en la cual se medirá el flujo contiene capas de pintura, o simplemente debido a que ésta se encuentra en malas condiciones, lo cual hace necesario acondicionarla quitando estas capas de pintura con herramienta adicional (espátula, limas o lijas) en un área en que los sensores puedan estar colocados y orientados, para una mejor cantidad y calidad de señal.

La alineación de los sensores en la tubería; es imperativo que las caras de ambos sensores estén en la misma dirección, se acondicionan ambas caras de los sensores con lubricante a base de silicón y se ajustan a ambos lados de la tubería, con ayuda de abrazaderas alrededor de la tubería para una fijación correcta.



Operación y configuración del equipo; una vez terminadas las actividades anteriores, se procede a conectar los cables de los sensores al equipo de medición de flujo para iniciar su operación, no sin antes configurar el equipo de medición de flujo, alimentando las parámetros necesarios y condiciones de monitoreo.