

25



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

---

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN

"REVISION DE CRITERIOS DE SELECCION,  
DIMENSIONAMIENTO Y ESPECIFICACIONES DE  
TORRES DE ENFRIAMIENTO"

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**INGENIERO EN ALIMENTOS**  
P R E S E N T A :  
**JAVIER CRUZ MARANTO**

ASESOR: I.O. ELIUD MORGADO LOPEZ

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

1999

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

278278



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
PRESENTE

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

Revisión de Criterios de Selección, Dimensionamiento y  
Especificaciones de Torres de Enfriamiento.

que presenta el pasante: Javier Cruz Maranto  
con número de cuenta: 9450250-9 para obtener el TITULO de:  
Ingeniero en Alimentos

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO

ATENTAMENTE.

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcallí, Edo. de Méx., a 24 de febrero de 199 9

PRESIDENTE I.O. Fernando Maya Servín *[Firma]*

VOCAL I.O. Alvaro Leo Ramirez *[Firma]*

SECRETARIO I.O. Eliud Morgado López *[Firma]*

PRIMER SUPLENTE I.A. Natividad Veneqas Herrera *[Firma]*

SEGUNDO SUPLENTE I.A. Ma. Eugenia Ramirez Ortiz *[Firma]*

*Dedico este trabajo a la memoria de mis abuelos y de mi  
hermana Mónica Lizeth que tanta falta me hizo en mi niñez*

---

## AGRADECIMIENTOS

### A MI MAMA:

Porque desde niño siempre has tratado de darme lo mejor de ti, y te has esforzado por educarme y estar siempre a mi lado, apoyándome en lo que puedes. Por darme tantos momentos felices durante toda mi vida, quiero agradecerte todo lo que has hecho por mi, además de que tenerte conmigo me hace muy feliz, y estoy seguro de que todo lo que soy te lo debo en gran parte a ti. Te quiero muchísimo mami !!

### A MI PAPA:

Aunque a veces nos haya costado trabajo entendernos 100%, puedes estar seguro de que te quiero mucho. Gracias por todo, papi !!

### A TODA MI FAMILIA:

Gracias por todo a mis abuelitos, tíos y tías, que desde niño me han cuidado y se han preocupado por mí. A mis primos: René, Adriana, Renata, Camilo, Carola, Liz, Toño, Nancy, Claudia, Lore, Luis, Karina, Tencha, Fernandito, Héctor, Erick, Memo, Nelson, Edgar, Rosy, Isnarda, Adriana, Julio, que han convivido conmigo.

### A BELEM:

Por todo este tiempo que me has dejado compartir contigo, que hemos vivido tantas cosas, y que has sido una parte muy importante para mí, quiero decirte que eres muy especial, y sobre todo que:

*te quiero mucho negrita !!*

### A MIS AMIGOS DE LA PRIMARIA:

Erika, Juan Marcos, Zulema, Fifi, Miriam, Citalli, Asgard, Haylim, Diana, Jose Enrique, Juanita, Karen, Pili, Rodrigo, César, Edith, a quienes considero mis hermanos y que juntos hemos compartido algunos de nuestros mejores años, y que a pesar de todo nos seguimos frecuentando como siempre. Espero que sigamos así, aunque estemos casados y con hijos.  
¡ Tal vez podría ser muy divertido que ellos mismos fueran amigos, no creen !

A Karla, Jorge y Adriana mis grandes amigos de la Prepa.

**A MIS AMIGOS DE LA UNIVERSIDAD:**

Juan y Rodrigo (mis mejores amigos), Lilia, Betty, Perla (me vah a esperah?), Nancy (hermanita), Elizabeth (flaquita), Angie (asiatica de la mar), Lupita (en invierno o ...?), Erika (la Güera), Adolfo, Claudia, Evelia, Chabela, Karl, Malena, Areli, Carola, Noemi, Malinali, Abril, Ana, Gerardo (Johnson), Beto, Carlos y Gerardo (te pasas de ...!), Ednofilus, Laura (galletita), Claudia A., Karla, Alison, Maribel, Sandra (matadal).

Mis amigos de otras carreras: Chelita, Isa, Fabi, Gabby, Añehé, Pili, Yuriko.

**A MIS MAESTROS:**

Eliud Morgado y Luz Zambrano, a quienes admiro muchísimo profesionalmente, y agradezco el que me hayan apoyado y permitido dar clase junto con ellos. A Lety Zufiga a quien quiero mucho. Rosalía que sin haber sido mi maestra me apoyó en lo que pudo, y a todos mis demás maestros muchísimas gracias !!

Un especial agradecimiento a Susy, que por ella estuve en FES-Cuautitán, además de que siempre me brindó su apoyo en lo que pudo incondicionalmente, por todo esto, muchas gracias Susy !!

A toda la gente que tuvo y tiene contacto conmigo, bueno o malo, les agradezco porque ayudaron a mi formación como persona y como Ingeniero.

A la UNAM, porque aquí conocí a mucha gente querida, y también porque estoy orgulloso de pertenecer a esta institución.

# ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS .....	iv
OBJETIVOS .....	v
INTRODUCCIÓN .....	vi
<b>I. GENERALIDADES DE TRANSFERENCIA DE MASA</b>	
1.1 Semejanza entre los procesos de transferencia .....	1
1.2 Transferencia de masa .....	2
1.3 Operaciones de transferencia de masa .....	4
1.4 Fundamentos de diseño .....	5
<b>II. PSICROMETRÍA</b>	
2.1 Introducción .....	8
2.2 Propiedades del aire .....	8
<b>III. TORRES DE ENFRIAMIENTO</b>	
3.1 Principio de enfriamiento por evaporación .....	16
3.2 Sistemas de enfriamiento de agua industrial .....	17
3.3 Tipos de torres de enfriamiento .....	26
3.4 Factores para el dimensionamiento .....	32
3.4.1 Mecanismo de interacción entre el agua y el aire .....	32
3.4.2 Diseño termodinámico .....	33
3.4.3 Influencia de las condiciones de operación en el dimensionamiento .....	38
3.4.4 Especificaciones para el diseño .....	40
3.4.5 Aumento de capacidad en torres antiguas .....	41
3.4.6 Consideraciones para el sitio de instalación .....	45
3.4.7 Materiales de construcción .....	47
3.5 Programa de operación e inspección .....	48
<b>IV. TRATAMIENTO Y ACONDICIONAMIENTO DEL AGUA DE ENFRIAMIENTO</b>	
4.1 El agua como recurso .....	59
4.2 Obtención del agua industrial y su problemática ecológica .....	60
4.3 Generalidades del agua .....	61
4.4 Tratamiento .....	66
4.5 Acondicionamiento de agua para torres de enfriamiento .....	68
4.5.1 Problemas Operativos .....	69
4.5.2 Control de incrustación y depósitos .....	71
4.5.3 Control de la corrosión .....	76
4.5.4 Control de lodos y algas .....	79
4.5.5 Síntesis de tratamiento de agua para torres de enfriamiento .....	82
4.5.6 Condiciones recomendadas de agua para torres de enfriamiento .....	84
<b>V. CONCLUSIONES</b> .....	86
<b>VI. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	90
<b>VII. GLOSARIO</b> .....	92

# ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

## ÍNDICE DE FIGURAS

1	Curva de presión de vapor del agua .....	9
2	Transformación del agua líquida a presión constante .....	10
3	Transformación del agua líquida a temperatura constante .....	11
4 <sup>a</sup>	Definición esquemática de rango y aproximación .....	23
4 <sup>b</sup>	Intercambio entre agua y aire en las torres de enfriamiento .....	23
5	Descripción de las partes internas de las torres de enfriamiento .....	23
6	Caída libre e interrumpida del agua .....	25
7	Clasificación de las Torres de Enfriamiento .....	26
8	Esquemas de Torres de Enfriamiento .....	30
9	Condiciones en la parte superior de una torre de enfriamiento .....	32
10	Condiciones en la parte inferior de una torre de enfriamiento .....	33
11	Nomenclatura para el proceso general en enfriamiento de agua .....	34
12	Representación gráfica de una operación de contacto adiabático .....	37
13 <sup>a</sup>	Efecto de la sequedad .....	38
13 <sup>b</sup>	Efecto de la aproximación límite .....	38
14 <sup>a</sup>	Efecto del cambio de cociente .....	39
14 <sup>b</sup>	Efecto de la localización del rango .....	39
15 <sup>a</sup>	Efecto del empalme .....	40
15 <sup>b</sup>	Efecto del cambio de presión .....	40
16	Escala de pH con los componentes que existen en las aguas naturales y tratadas .....	64
17	Solubilidad del CaCO <sub>3</sub> a diferente pH, Temperatura = 23 °C .....	72
18	Efecto de la concentración de oxígeno sobre la corrosión a diferentes temperaturas .....	77

## ÍNDICE DE TABLAS

1	Comparación entre los tipos de torres .....	31
2	VARIABLES a considerar para el aumento de capacidad de las torres .....	41
3	Cambio en la capacidad a partir del caballaje .....	44
4	Niveles de presión sonora en torres a flujo cruzado .....	46
5	Procedimientos de inspección .....	55
6	Medidas correctivas para problemas más comunes .....	56
7	Ejemplos de análisis mineralógico de diferentes aguas de suministro .....	63
8	Clasificación de la dureza .....	65
9	Pérdidas por flujo de aire en diferentes equipos .....	66
10	Tendencia del agua a partir del índice de Langelier .....	74
11	Predicción de las características del agua mediante el índice de Ryznar .....	75
12	Datos de los gases contenidos en diferentes atmósferas .....	78
13	Principales creadores de lodos .....	79
14	Sustancias químicas usadas para eliminar lodos .....	80
15	Procedimientos de pretratamiento .....	83
16	Resumen de controles para el tratamiento de aguas .....	84

# OBJETIVOS

## TÍTULO

Revisión de Criterios de Selección, Dimensionamiento y Especificaciones de Torres de Enfriamiento.

### OBJETIVO GENERAL

Describir los factores que afectan la Operación y que intervienen en los criterios de Selección de Torres de Enfriamiento, por medio del estudio de las condiciones atmosféricas, características de los equipos y especificaciones del agua, para poder adecuar su dimensionamiento a ciertas necesidades de enfriamiento industriales.

### OBJETIVO PARTICULAR 1

Señalar los criterios para la selección del tipo de Torre más efectiva, en base a las ventajas y desventajas de sus características, que permita evaluar a futuro el sistema más conveniente.

### OBJETIVO PARTICULAR 2

Asociar el efecto que tiene la calidad del agua con el rendimiento y eficiencia del equipo, por medio del estudio de los fenómenos que intervienen entre ésta y el sistema de enfriamiento, y así obtener un empleo óptimo de la instalación.

## INTRODUCCIÓN

En la mayoría de las industrias se desarrollan operaciones unitarias las cuales requieren de un enfriamiento posterior, tal es el caso de equipos como intercambiadores de calor, condensadores, motores, bombas, etc. Hoy en día no es posible utilizar agua como refrigerante y después eliminarla como desecho al drenaje, por tanto, se diseñaron sistemas de enfriamiento donde el agua se puede volver a aprovechar, de los cuales destacan las torres de enfriamiento. Estas permiten mantener un flujo continuo de agua fría recirculada.

Las torres de enfriamiento tienen más de 35 años utilizándose ampliamente en industrias de diferentes rubros y conforme han pasado los años han evolucionado tanto su diseño, como sus materiales de construcción, y los tipos que existen actualmente suelen tener una eficiencia muy buena, si son proyectadas adecuadamente, dependiendo de las necesidades que requiera el sistema de enfriamiento.

Este trabajo tiene por objeto proporcionar información para explicar la interrelación de los factores que afectan la operación, selección y dimensionamiento de las torres de enfriamiento. Se hablará del uso de las torres de enfriamiento como sistema para disminuir la temperatura del agua utilizada en el enfriamiento de los equipos de intercambio calórico, dentro de cualquier planta de fuerza o procesamiento, ya sea químico o alimentario. Se revisarán las distintas alternativas existentes para el enfriamiento de agua, las ventajas de la depuración del agua y manejo de niveles aceptables de compuestos contenidos en ella para la operación de las torres de enfriamiento, se mostrarán los principios termodinámicos para llevar a cabo un enfriamiento atmosférico con torre, los datos necesarios para poder instalarlas, operación de éstas, las posibles mejoras que se pueden implementar en las torres viejas para incrementar su capacidad, entre otras cosas.

CAPÍTULO **1**

**GENERALIDADES DE  
TRANSFERENCIA DE MASA**

# I. GENERALIDADES DE TRANSFERENCIA DE MASA

## 1.1 SEMEJANZA ENTRE LOS PROCESOS DE TRANSFERENCIA

Las diversas operaciones unitarias pueden clasificarse en tres procesos fundamentales de transferencia (o transporte):

1. transferencia de calor
2. transferencia de momento, ímpetu o movimiento y,
3. transferencia de masa.

El proceso fundamental de transferencia de momento existe en las operaciones unitarias de flujo de fluidos, mezclado, sedimentación y filtración. La transferencia de calor se presenta en la transferencia conductiva y convectiva de calor.

El tercer proceso fundamental de transferencia, esto es, la transferencia de masa, interviene en la destilación, evaporación, absorción, secado y extracción. Cuando se está transfiriendo masa de una fase a otra o a través de una sola fase, el mecanismo básico es el mismo ya sea que se trate de gases, líquidos o sólidos.

Estos tres procesos de transferencia están caracterizados por el mismo tipo general de ecuación:

velocidad de un proceso de transferencia = fuerza impulsora / resistencia

La ley de la viscosidad de Newton, es un ejemplo de la transferencia de momento. La ec. a densidad constante se convierte en:

$$\tau_{zx} = - \mu \, d(v_x \rho) / (\rho \, dz)$$

donde  $\tau_{zx}$  es el ímpetu transferido/seg·m<sup>2</sup>;  $\mu / \rho$  es la viscosidad cinemática en m<sup>2</sup>/seg; z es la distancia en m; y  $v_x \rho$  es el ímpetu/m<sup>3</sup>, siendo las unidades de ímpetu kg/seg.

La ley de Fourier para conducción de calor puede escribirse como sigue para  $\rho$  y  $C_p$  constante:

$$q_z / A = - \alpha \, d(\rho \, C_p \, T) / dz$$

donde  $q_z / A$  es el flux específico de calor en W/m<sup>2</sup>,  $\alpha$  es la difusividad térmica en m<sup>2</sup>/seg y  $\rho C_p T$  es J/m<sup>3</sup>.

La ecuación para la difusión molecular de masa es la ley de Fick, y se escribe como sigue para una concentración total constante en un fluido:

$$J_{Az} = - D_{AB} dC_A/dz$$

donde  $J_{Az}$  es el flujo molar del componente A en la dirección z causado por la difusión molecular, expresado en mol kg de A/seg·m<sup>2</sup>;  $D_{AB}$  es difusividad molecular de la molécula A en B en m<sup>2</sup>/seg;  $C_A$  es la concentración de A en mol kg/m<sup>3</sup>; y z es la distancia de difusión en m.

La semejanza de las ecuaciones para transferencia de masa, calor y momento es obvia. Todos los flujos específicos del lado izquierdo de las tres ecuaciones tienen unidades de transferencia de calor, ímpetu o masa por unidad de tiempo y por unidad de área. Las propiedades de transporte  $\mu/\rho$ ,  $\alpha$  y  $D_{AB}$  tienen todas ellas unidades de m<sup>2</sup>/seg y las concentraciones se representan como ímpetu/m<sup>3</sup>, J/m<sup>3</sup> o mol kg/m<sup>3</sup>. (11)

## 1.2 TRANSFERENCIA DE MASA

Una parte importante de las operaciones unitarias en Ingeniería está relacionada con el problema de modificar la composición de soluciones y mezclas mediante métodos que no impliquen, necesariamente, reacciones químicas. Por lo común estas operaciones se encaminan a separar las partes componentes de una sustancia.

En el caso de mezclas, las separaciones pueden ser totalmente mecánicas, como la filtración de un sólido a partir de una suspensión en un líquido, la clasificación de un sólido por tamaño de partícula mediante cribado o la separación de partículas en un sólido basándose en la densidad. Por otra parte, si las operaciones cambian la composición de soluciones, entonces se conocen como operaciones de transferencia de masa.

Es mucha la importancia de estas operaciones. Raro es el proceso químico que no requiere de la purificación inicial de las materias primas o de la separación final de los productos y subproductos; para esto, en general se utilizan las operaciones de transferencia de masa. Quizá se podría apreciar rápidamente la importancia de este tipo de separaciones en una planta procesadora, si se observa la gran cantidad de torres que llenan una moderna refinería de petróleo: en cada una de las torres se realiza una operación de transferencia de masa. Con frecuencia el costo principal de un proceso deriva de sus separaciones. Los costos de separación o purificación dependen directamente de la relación entre la concentración inicial y final de las sustancias separadas; si esta relación es elevada, también lo serán los costos de producción. Así, el ácido sulfúrico es un producto relativamente barato, debido en parte a que el azufre se encuentra bastante puro al estado natural, mientras que el uranio es caro a causa de su baja concentración en la naturaleza.

Las operaciones de transferencia de masa se caracterizan por transferir una sustancia a través de otras a escala molecular. Por ejemplo, cuando el agua, por evaporación, pasa de una alberca a una corriente de aire que fluye sobre la superficie del agua, las moléculas de vapor de agua se difunden, a través de las moléculas del aire en la superficie, dentro de la masa de corriente de aire. El fenómeno que interesa, principalmente, no es el movimiento como resultado de una diferencia de presión, como sucede cuando se bombea un líquido a través de una tubería. En los problemas a tratar la transferencia de masa es un resultado de la diferencia de concentraciones, o gradiente, en donde la sustancia que se difunde abandona un lugar en que está muy concentrada y pasa a un lugar de baja concentración. (30)

### *Transferencia simultánea de calor y de masa*

En todos los casos en que exista transferencia de masa, debe transferirse también calor. Cuando se transfiere un componente de una fase gaseosa a una fase líquida, se desprende el calor latente asociado con la condensación. Cuando un componente se transfiere de la solución en un solvente, a una solución en un segundo solvente, como en el caso de la extracción liq-liq, la diferencia de los calores de solución del soluto en los dos solventes es la que se desprende. Efectos similares de calor son los que se encuentran presentes en la destilación, en la adsorción, en el lixiviado, en el secado, etc. De cualquier manera, la temperatura interfacial se ajustará hasta que, para el estado estable, la proporción de transferencia de calor balancee la proporción equivalente de transferencia de calor asociada a la transferencia de masa. En las operaciones donde la transferencia de masa tiene lugar mediante la difusión contraria equimolar, como acontece en la destilación; o bien, en las operaciones donde los efectos debidos al calor latente son pequeños, como sucede en la extracción liq-liq, en la absorción gaseosa en soluciones diluidas y en el lixiviado, la transferencia de calor es de menor importancia como mecanismo controlador de velocidad. En otras, particularmente en donde hay una transferencia neta de masa de la fase gaseosa a una fase condensada o viceversa, la velocidad de transferencia de calor es importante. En estos casos limitará en forma significativa la proporción a la cual puede transferirse la masa. Existen aún otras operaciones, tales como ebullición, condensación, evaporación, cristalización, en donde tienen lugar las transferencia de calor y de masa en forma simultánea y en grandes cantidades; pero las proporciones a las cuáles se encuentran estas transferencias simultáneas de masa y de calor pueden determinarse considerando simplemente la proporción de transferencia de calor procedente de una fuente externa.

Entre esas operaciones, en las cuáles la transferencia de masa y calor influyen en la velocidad, la humidificación y la deshumidificación constituyen los casos más sencillos, siendo también las aplicaciones más directas de la teoría. En ellas, solamente están involucradas dos componentes y dos fases. La fase líquida, que casi siempre es agua, es un componente sencillo; y la fase gaseosa, puede consistir de gases no condensables, generalmente aire, en los cuáles parte de la fase líquida se encuentra presente en el estado de vapor. (10)

### 1.3 OPERACIONES DE TRANSFERENCIA DE MASA

Las operaciones que dependen en particular del contacto entre dos fases inmiscibles pueden subclasificarse en dos tipos. Por medio de la adición o eliminación de calor, las operaciones *directas* producen las dos fases a partir de una solución con una única fase. Son de este tipo la destilación fraccionada, la cristalización fraccionada y una forma de extracción fraccionada. Las operaciones *indirectas* implican la adición de una sustancia extraña e incluye la absorción y desorción de gases, adsorción, secado, lixiviación, extracción líquida y ciertos tipos de cristalización fraccionada.

La característica de las operaciones directas es que los productos se obtienen directamente libres de sustancias adicionadas; por esta razón, algunas veces son preferibles, si es que pueden utilizarse, en lugar de los métodos indirectos. Cuando se requiere que los productos separados estén relativamente puros, las operaciones indirectas tienen varias desventajas provocadas por la adición de sustancias extrañas. La sustancia eliminada se obtiene como una solución, que en este caso debe separarse de nuevo, ya que para obtener la sustancia pura o para la reutilización de la sustancia adicionada; esto representa ciertos gastos.

Estas desventajas pueden desaparecer cuando no se necesita obtener la sustancia separada en forma pura. Por ejemplo, en el secado ordinario, la mezcla aire-vapor de agua se descarta, puesto que no es necesario recobrar los componentes de esta mezcla. En la producción de ácido clorhídrico por lavado de un gas que contienen cloruro de hidrógeno con agua, la solución ácido-agua se vende directamente, sin separar. (30)

La transferencia de masa se verifica cuando el componente de una mezcla emigra de una misma fase o de una fase a otra, a causa de la diferencia de concentración entre dos puntos. Muchos fenómenos comunes implican una transferencia de masa. El líquido de un recipiente abierto lleno de agua se evapora en el aire estacionario debido a la diferencia de concentración del vapor de agua en la superficie del líquido y el aire que lo rodea. Existe una "fuerza impulsora" de la superficie del aire. Un trozo de azúcar sumergido en una taza de café se disuelve y se difunde, sin agitación, a la solución que lo rodea. Cuando la madera verde recién cortada se expone a la acción atmosférica, se secará parcialmente a medida que el agua de la madera se difunda hasta la superficie cortada y después, a la atmósfera circundante. En un proceso de fermentación, los nutrientes y el oxígeno disueltos en la solución se difunden hacia los microorganismos. En una reacción catalítica, los reactantes se difunden del medio circundante a la superficie catalítica donde se verifica la reacción.

La transferencia de masa puede considerarse de forma similar a la aplicación de la ley de conducción de Fourier, a la transferencia de calor. Sin embargo, una de las diferencias importantes es que en la transferencia molecular de masa, uno o más de los componentes se está moviendo. En la transferencia de calor por conducción, el medio suele ser estacionario y sólo se transporta energía en forma de calor. (11)

**Humidificación y enfriamiento de agua con Torres de enfriamiento.** Los procesos de humidificación pueden llevarse a cabo para controlar la humedad presente dentro del espacio; o más frecuentemente, para enfriar y recuperar el agua poniéndola en contacto con aire casi seco. Cuando el gas es aire puro y el líquido es agua pura, al proceso se le llama *humidificación*. La *deshumidificación* significa extracción de vapor de agua del aire.

En una torre típica para enfriamiento de agua, el agua caliente fluye a contracorriente del aire. Por lo general, el agua caliente entra por la parte superior de una torre empacada y cae en cascada a través del material de empaque, saliendo por el fondo. El aire entra por la parte inferior de la torre y fluye hacia arriba, a través del agua que desciende. El empaque de la torre casi siempre consiste en tabillas de madera y el agua se distribuye por medio de acanaladuras y rebosaderos para que caiga en cascada, por el enrejado de tabillas, lo cual suministra un área extensa interfacial de contacto entre el aire y el agua en forma de gotas y película de agua. El flujo de aire hacia arriba a través de la torre puede inducirse por medio de la tendencia natural del aire caliente a flotar (tiro natural) o bien por la acción de un ventilador.

La deshumidificación se practica más frecuentemente como uno de los pasos necesarios en los sistemas de acondicionamiento de aire. Puede utilizarse también como parte de un sistema de recuperación de solvente, pero en estas aplicaciones los vapores condensables no son agua, sino más frecuentemente un solvente caro, como por ejemplo el tricloroetileno, el benceno, el metanol, etc. La dirección de la transferencia de masa y de calor se determinan por la relación entre la humedad y la temperatura del gas de la fase gaseosa a la entrada, y la temperatura del líquido de contacto. Sin embargo, el tamaño de la unidad, así como la conveniencia de recuperar el gas o el líquido, y finalmente los materiales de construcción que se vayan a usar, limitan las posibilidades de aplicación para un solo aparato o instrumento.(10)

En la humidificación y deshumidificación se necesita un contacto íntimo entre la fase gaseosa y la fase líquida para velocidades grandes de transferencia de masa y calor. La resistencia de la fase gaseosa controla la velocidad de transferencia. Se usan torres empacadas o torres con rociadores para obtener áreas interfaciales extensas y promover la turbulencia de la fase gaseosa. (11)

## 1.4 FUNDAMENTOS DE DISEÑO

Hay cuatro factores principales que se deben establecer en el diseño de cualquier planta que trabaje con operaciones de difusión: el número de etapas en el equilibrio o su equivalente, el tiempo de contacto requerido entre las fases, la velocidad de flujo permisible y la energía requerida para llevar a cabo la operación.

**Número de etapas en el equilibrio.** Con el fin de determinar el número de etapas en el equilibrio que se requieren en una cascada para obtener el grado deseado de separación, o para determinar la cantidad equivalente en un aparato de contacto continuo, se

necesitan las características de equilibrio para el sistema y los cálculos de balance de materia.

**Tiempo requerido para llevar a cabo la operación.** En las operaciones por etapas, el tiempo de contacto está íntimamente relacionado con la eficiencia de la etapa, mientras que en el equipo para contacto continuo el tiempo determina el volumen o longitud del aparato necesario. Son varios los factores que ayudan a establecer el tiempo. El balance de materia permite calcular las cantidades relativas que se necesitan de las diferentes fases. Las características de equilibrio del sistema establecen las concentraciones posibles, y la velocidad de transferencia del material entre las fases depende de la desviación del equilibrio que se mantenga. Además, la rapidez de la transferencia depende tanto de las propiedades físicas de las fases como del régimen de flujo dentro del equipo. Es importante reconocer que, para cierto grado de contacto íntimo entre las fases, el tiempo de contacto requerido es independiente de la cantidad total de las fases que van a procesarse.

**Rapidez de flujo permisible.** Debe tomarse en cuenta este factor en las operaciones semicontinuas y en estado estacionario, porque permite determinar en ellas el área transversal del equipo. La consideración de la dinámica del fluido establece la rapidez de flujo permisible, y el balance de materia determina la cantidad absoluta requerida de cada uno de los flujos.

**Energía requerida para llevar a cabo la operación.** Generalmente se necesita energía calorífica y mecánica para llevar a cabo las operaciones de difusión. El calor es necesario para producir cualquier cambio de temperatura, para la formación de nuevas fases (como la evaporación de un fluido) y para evitar el efecto del calor de solución. La energía mecánica se necesita para el transporte de fluidos y sólidos, para dispersar líquidos y gases y para mover ciertas partes de la maquinaria. En consecuencia, en el diseño se habrán de considerar las características de equilibrio del sistema, balance de materia, velocidad de difusión, dinámica de fluidos y la energía requerida para realizar la operación. (30)

**HTU (altura equivalente de una unidad de transferencia).** Con frecuencia los valores de los coeficientes individuales de transferencia de masa dependen considerablemente de las velocidades de flujo y la cantidad obtenida al dividir cada coeficiente entre la velocidad de flujo de la fase a la que se aplica es casi tan constante como el coeficiente en sí. La cantidad obtenida por este procedimiento se conoce como HTU, porque expresa en términos de la unidad de longitud, la altura del equipo requerido para realizar una separación de dificultad normal. (25)

La altura de una unidad de transferencia tiene la ventaja de que posee una sola dimensión (en oposición a las numerosas combinaciones de unidades que pueden utilizarse para los coeficientes de transferencia de masa) y puesto que supone la relación entre el coeficiente, y la velocidad del flujo será más constante que el coeficiente solo. (1)

**NTU (número de unidades de transferencia).** El NTU requerido para la separación determinada está íntimamente relacionado con el número de etapas o platos teóricos requeridos para realizar la misma separación en un equipo del tipo platos o de transferencia por etapas. (25)

Examinando las formas integradas de las ecuaciones de velocidad de transferencia de masa en torres de pared mojada, torres de enfriamiento y torres rellenas, se ve que el valor numérico de las integrales de la forma  $\int \frac{dH}{H_1 - H}$  es una medida de la dificultad de la operación. Para cualquier caso específico, cuanto mayor sea el valor de la integral, mayor altura necesitará la torre. Una unidad de transferencia se define de forma que cuanto mayor sea la dificultad de la separación, mayor número de unidades necesarias, es decir: (número de unidades de transferencia necesarias) (altura de una unidad de transferencia) = altura total de relleno que es necesaria

El uso del concepto de unidad de transferencia, es especialmente conveniente cuando se estudia el efecto de las variaciones en las condiciones de operación. (1)

CAPÍTULO 2

# PSICROMETRÍA

## II. PSICROMETRÍA

### 2.1 INTRODUCCIÓN

La psicrometría se ocupa de la determinación de las propiedades de las mezclas de un gas y un vapor. El sistema aire-agua es, por mucho, el que se encuentra con mayor frecuencia.

Los principios comprendidos en la determinación de las propiedades de otros sistemas son los mismos que rigen el de aire-vapor de agua, con una excepción primordial. Mientras que la razón psicrométrica (la razón del coeficiente de transferencia de calor al producto del coeficiente de transferencia de masa y calor húmedo) en el caso del sistema aire-vapor de agua, tiene un valor asignado de 1, la razón de otros sistemas generalmente no es equivalente a 1. Esto tiene el efecto de hacer que la temperatura de saturación adiabática sea distinta de la temperatura de bulbo húmedo. Por lo tanto, para sistemas que no sean el de aire-vapor de agua, el cálculo de problemas psicrométricos y de secado se ve complicado por la necesidad de hacer un cálculo detallado de la temperatura de superficie de evaporación. Por ejemplo, en el sistema aire-vapor de agua, la temperatura de la superficie de evaporación será constante durante el período de secado a velocidad constante, aunque la temperatura y la humedad de la corriente del gas varíe. En el caso de otros sistemas, la temperatura de la superficie de evaporación tendrá alteraciones. (25)

### 2.2 PROPIEDADES DEL AIRE

**Atmósfera.** El aire alrededor de nosotros, se compone de una mezcla de gases secos y vapor de agua. Los gases contienen aproximadamente 79% de nitrógeno y 21% de oxígeno, con otros gases que totalizan menos del 1%. El vapor de agua existe en muy poca cantidad, así que es medido en granos o en libras (una libra contiene 7000 granos). (18)

**Presión.** Existen muchas formas de expresar la presión ejercida por un fluido o un sistema. Una presión absoluta de 1 atm es equivalente a 760 mm de Hg a 0 °C, 29.921 plg de Hg, 0.760 m de Hg, 14.696 lb fuerza por pulgada cuadrada (lb/plg<sup>2</sup>), o 33.9 pies de agua a 4 °C. La *presión manométrica* es la presión de trabajo de los equipos. De esta manera, con una presión manométrica de 21.5 psi obtenemos una presión absoluta de 36.2 psias (es igual a 21.5 + 14.7). En algunos casos, en especial cuando se trata de evaporación, puede expresarse la presión como pulgadas de vacío de mercurio. Esto significa la presión en pulgadas de mercurio medidas "por debajo" de la presión barométrica absoluta. (11)

**Presión de vapor.** Los términos *vapor* y *gas* se utilizan indefinidamente. A un gas que se encuentre a una temperatura menor que la crítica generalmente se le llama vapor debido a que puede llegar a condensarse. Cuando un gas puro se comprime continuamente a temperatura constante, siempre y cuando esta temperatura sea menor que la crítica, se llega a una presión a la cual el gas comienza a condensarse formando

un líquido. Una compresión adicional no provoca un aumento de la presión sino que únicamente incrementa la fracción de gas que se condensa. La inversión de este procedimiento causará que el líquido quede sujeto a un proceso de transformación al estado gaseoso nuevamente. Desde ahora al decir "vapor", se estará describiendo a un gas que se encuentra por debajo de su punto crítico en un proceso donde el cambio de fase es de gran interés, mientras que el término "gas" o "gas incondensable" se utilizará para describir un gas que se encuentra arriba de su punto crítico o un gas en un proceso tal que no puede condensarse. (13)

Cuando un líquido se introduce en un recipiente cerrado, las moléculas de dicho líquido se evaporan en el espacio que está por encima y lo llenan por completo. Después de un tiempo se establece un equilibrio. Este vapor ejerce una presión al igual que un gas y a esta presión se le puede llamar presión de vapor de un líquido. El valor de la presión de vapor es independiente de la cantidad de líquido en el recipiente siempre y cuando haya algo de líquido presente. (11)

La vaporización y la condensación a temperatura y presión constantes son procesos en equilibrio, y la presión de equilibrio se denomina *presión de vapor*. A una determinada temperatura solamente existe una presión a la cual las fases líquida y vapor de una sustancia pura puede existir en equilibrio. Es evidente que cualquiera de las fases puede existir sola dentro de un amplio intervalo de condiciones. Por equilibrio se debe entender un estado en el cual no hay tendencia a que se verifique algún cambio espontáneo. Dicho en otras palabras, el equilibrio es un estado en el cual todas las velocidades tendientes a alcanzar o de alejarse del estado se encuentran balanceadas.

La presión de vapor y los procesos de vaporización y de condensación pueden comprenderse mejor con la ayuda de la fig. 1.

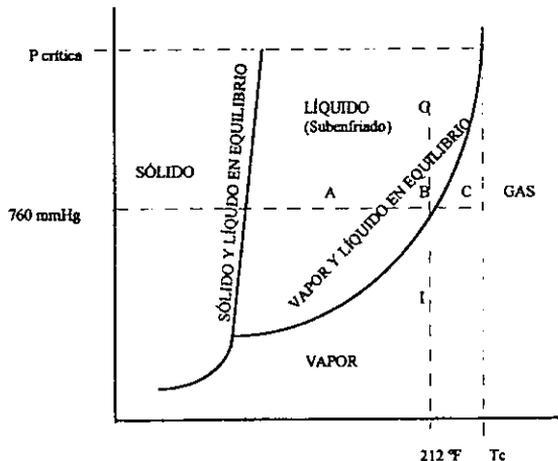


Fig. 1 Curva de presión de vapor del agua

Esta figura es un diagrama amplificado de la relación p-T para el agua pura. Para cada temperatura es posible leer la presión correspondiente a la cual el vapor de agua y

el agua líquida existen en equilibrio. Esta condición de equilibrio ocurre muchas veces (por ejemplo, en el proceso de ebullición). Cualquier sustancia tiene un número infinito de temperaturas de ebullición aunque, por costumbre, se dice que el punto de ebullición "normal" es la temperatura a la que se verifica la ebullición cuando la presión es de 1 atm (760 mm de Hg). (13)

La presión de vapor de un líquido aumenta notablemente con la elevación de la temperatura. Por ejemplo, a 50 °C la presión de vapor del agua es 12.333 kPa. A 100 °C la presión de vapor aumenta en alto grado a un valor de 101.325 kPa (760 mmHg). El punto de ebullición de un líquido se define como la temperatura a la cual la presión de vapor de un líquido es igual a la presión total. Por lo tanto, si la presión total atmosférica mide 760 mm de Hg, el agua hierve a 100 °C. En la cumbre de una montaña alta, donde la presión es considerablemente más baja, el agua hierve a temperatura inferiores de 100 °C. (11)

El punto de ebullición normal para el agua se presenta cuando la presión de vapor del agua iguala a la presión de la atmósfera que se encuentra encima del agua. Un pistón con una fuerza de 14.7 psias podría también representar la atmósfera tal como se muestra en la fig. 2.

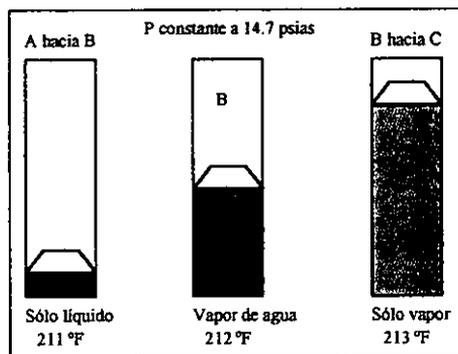


Fig. 2 Transformación del agua líquida en vapor de agua a presión constante

Por ejemplo, se sabe que a 212 °F el agua hierve (se vaporiza), y que la presión será de 760 mm de Hg o de una atmósfera (punto B). Supóngase que se calienta el agua, comenzando en 170 °F (punto A), en un recipiente abierto ¿qué pasará? Se supondrá que el vapor de agua en el recipiente se encuentra en todo momento en equilibrio con el agua líquida. Este es un proceso a presión constante, puesto que el aire que se encuentra alrededor del agua actúa en forma similar como un pistón en un cilindro para mantener una presión equivalente a la atmosférica. A medida que aumenta la temperatura, permaneciendo constante la presión de confinación, no ocurre nada notable en particular hasta que se alcanzan los 212 °F, momento en el cual comienza a hervir el agua, es decir, a evaporarse. El agua empujará la atmósfera y cambiará totalmente de estado líquido a vapor. Si se hubiera calentado el agua en un recipiente cerrado, y una vez que se lograra la evaporación total en el punto B, se continuará calentando el vapor

de agua formado a presión constante, sería posible aplicar las leyes de los gases en la región B-C (y a mayores temperaturas). La inversión de este proceso causaría que el vapor se condensara en el punto B para formar el líquido. La Temperatura en el punto B representaría en dichas circunstancias el *punto de rocío*.

Supóngase que se asciende a la cima del monte Pikes y se repite el experimento, ¿que sucedería? Todo volvería a acontecer en la misma forma, con excepción de la temperatura a la cual el agua empezaría a hervir o a condensarse. Puesto que la presión atmosférica del monte Pikes sería probablemente menor de 760 mm de Hg, el agua empezaría a desplazarse al aire, o a hervir, a una temperatura más baja. No obstante, el agua todavía ejerce una presión de vapor equivalente a 760 mm de Hg cuando la temperatura es de 212 °F. Se puede observar que:

1. a cualquier temperatura el agua desarrolla una presión de vapor (en equilibrio),
2. a medida que aumenta la temperatura de equilibrio, también se incrementa la presión de vapor, y
3. no existe diferencia entre el hecho de que el agua se vaporice en el aire, en un cilindro cerrado con un pistón, o en un cilindro al vacío (a cualquier temperatura seguirá ejerciendo la misma presión de vapor equivalente, siempre y cuando el agua este en equilibrio con su vapor).

El proceso de vaporización o de condensación a temperatura constante se ilustra mediante las líneas G-B-I o I-B-G, respectivamente, en la fig. 1. El agua podría vaporizarse o condensarse a temperatura constante a medida que la presión llegara al punto H en la curva de presión de vapor, ver fig. 3.

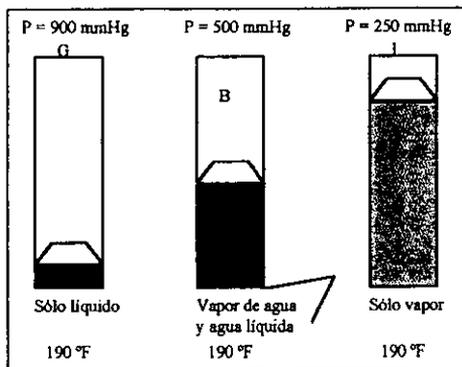


Fig. 3 Transformación del agua líquida en vapor de agua a Temperatura constante

Las condiciones p-T a las que el hielo (en su forma usual) y el vapor de agua se encuentran en equilibrio, también se pueden observar en la fig. 1. Cuando el sólido pasa directamente a la fase vapor sin efectuarse la transformación intermedia en líquido se dice que ha sublimado.

Arriba de la temperatura crítica, el agua solo puede existir como gas. Un término que se aplica a la porción vapor-líquido en la curva de presión de vapor es la palabra *saturado*. Significa lo mismo que vapor y líquido en equilibrio entre sí. Si un gas se encuentra en condiciones de empezar a condensarse formando la primera gota, entonces el gas estará saturado; si el líquido está listo para vaporizarse constituye un líquido saturado. Estas dos condiciones también se conocen con el nombre de punto de rocío y punto de *burbuja* respectivamente. (13)

Si un gas inerte como el aire también está presente en el espacio del vapor, su efecto sobre la presión de vapor es muy bajo. En general, el efecto de la presión total sobre la presión de vapor puede considerarse como despreciable para presiones de unas cuantas atmósferas o menos. (11)

**Número de Lewis.** La relación entre el coeficiente de transferencia de calor y el de transferencia de masa ( $h/K$ ) entra en casi cualquier problema de contacto directo.

$$h_G / K_G C_s = 1$$

Este número conduce a la información extremadamente importante de que, el coeficiente de transferencia de calor es al coeficiente de transferencia de masa lo que el valor de calores específicos del medio que sirve tanto para la transferencia de calor como la transferencia de masa. (15)

**Temperatura de bulbo seco.** Es la temperatura medida con un termómetro ordinario.

**Temperatura de bulbo húmedo.** Es la temperatura que resulta de la evaporación del agua, en una gasa húmeda, colocada sobre un termómetro común. (18)

Es la temperatura de equilibrio dinámico obtenida por una superficie de agua cuando la velocidad de transferencia de calor por convección, a la misma, es igual que la velocidad de transferencia de masa que se aleja de tal superficie. Estando en equilibrio y suponiendo un cambio despreciable en la temperatura de bulbo seco, el balance de calor en la superficie es

$$K \lambda (p^v - p) = h_G (t - t_w)$$

en donde  $K$  = coeficiente de transferencia de masa;  $\lambda$  = calor latente de evaporación;  $p^v$  = presión de vapor del agua a la temperatura de bulbo húmedo;  $p$  = presión parcial del vapor de agua en el ambiente;  $h_G$  = coeficiente de transferencia de calor;  $t$  = temperatura de la mezcla aire-vapor de agua (temperatura de bulbo seco);  $t_w$  = temperatura de bulbo húmedo. En condiciones ordinarias, la presión parcial y la de vapor son pequeñas en relación con la presión total, y la ecuación de bulbo húmedo se escribe expresándola como las diferencias de humedad como sigue

$$H_s - H = (C_s / \lambda K') (t - t_w)$$

$K' = \text{lb} / \text{h ft}^2$  (unidad de diferencia de humedad). (25)

**Temperatura de saturación adiabática o líneas de entalpía constante.** Si una corriente de aire se mezcla perfectamente con una cantidad de agua a la temperatura  $t_s$  en un sistema adiabático, la temperatura del aire descenderá y su humedad aumentará. Si  $t_s$  es tal que el aire que sale del sistema está en equilibrio con el agua,  $t_s$  es la temperatura de saturación adiabática y la línea que relaciona la temperatura con la humedad del aire es la llamada línea de saturación adiabática. La ecuación de dicha línea es la siguiente: (25)

$$H_s - H = (C_s / \lambda) (t - t_s)$$

**Relación entre las temperaturas de bulbo húmedo y de saturación adiabática.** Se ha demostrado experimentalmente que, para sistemas de aire-agua, el valor de  $h_G/KC_s$ , la razón psicrométrica es aproximadamente igual a 1. En estas condiciones, las temperaturas de bulbo húmedo y las de saturación adiabáticas son más o menos iguales y se utilizan de manera intercambiable. La diferencia entre una y otra aumenta al incrementarse la humedad; pero este efecto no es muy importante en la mayor parte de los cálculos de ingeniería.

Para sistemas que no sean de aire-agua, el valor de  $h_G/KC_s$  difiere apreciablemente de la unidad y las temperaturas de bulbo húmedo y saturación adiabática dejan de ser iguales. Para estos sistemas, la razón psicrométrica se obtiene determinando  $h_G/K$  partiendo de analogías de transferencia de calor y masa, como la de Chilton-Colburn. Para humedades reducidas, esta analogía da

$$h_G / K = C_s (\mu / \rho D_v / C_s \mu / k)^{2/3}$$

donde  $C_s$  = calor húmedo BTU/lb °F,  $\mu$  = viscosidad en lb/ft h,  $\rho$  = densidad en lb/ft<sup>3</sup>,  $D_v$  = difusividad en ft<sup>2</sup>/h; y  $k$  = conductividad térmica en BTU/hft<sup>2</sup>(°F/ft). Es preciso evaluar todas las propiedades de la mezcla gaseosa. (25)

**Humedad.** La humedad de una mezcla aire-vapor se define como los kg de vapor que hay en un kg de aire seco. Esta definición sólo depende de la presión parcial del agua en el aire ( $p_a$ ) y de la presión total  $P$ .

$$H = 18 (p_a) / 29 (P - p_a)$$

donde:

18 es el peso molecular del agua y

29 es el peso molecular del aire. (11)

Es el peso real de vapor de agua en el aire, se expresa en granos o libras de agua por libra de aire seco, dependiendo de los datos usados. (18)

**Aire Saturado.** Es aire en que el vapor de agua está en equilibrio con el agua líquida en condiciones de T° y presión dadas. En una mezcla de este tipo, la presión parcial del vapor de agua en la mezcla de agua-aire es igual a la presión de vapor (pa<sup>v</sup>) del agua pura a dicha temperatura. Por tanto, la humedad de saturación es: (11)

$$H_s = 18 (pa^v) / 29 (P - pa^v)$$

**Porcentaje de Humedad.** Se define como 100 multiplicado por la humedad real del aire (H), entre la Humedad (H<sub>s</sub>) que tendría el aire si estuviera saturado a esas mismas Temperatura y presión.

$$\%Hum = 100 H/H_s$$

**Humedad Relativa.** La cantidad de saturación de una mezcla aire-vapor puede expresarse por H<sub>R</sub> usando presiones parciales. (11)

$$H_R = 100 pa / pa^v$$

Es la relación del vapor de agua real en el aire, comparado con la máxima cantidad que estaría presente a la misma temperatura, expresada como %. (18)

**Punto de Rocío.** La temperatura a la cual cierta mezcla de aire y vapor de agua debe estar saturado se llama punto de rocío o temperatura de rocío. (11)

Es la temperatura de saturación, a la cual tiene lugar la condensación del vapor de agua. Un ejemplo es la humedad sobre un vaso de agua con hielo. El vidrio frío reduce la temperatura del aire por debajo de su punto de rocío y la humedad que se condensa forma gotas sobre la superficie del vidrio. (18)

**Calor sensible.** Es la cantidad de calor seco, expresado en BTU por libra de aire, se refleja por la temperatura de bulbo seco. (18)

**Calor latente.** Es el calor requerido para evaporar la humedad que contiene una cantidad específica de aire. Esta evaporación ocurre a la temperatura de bulbo húmedo. También se expresa en BTU por libra de aire. (18)

**Calor Húmedo.** Las capacidades caloríficas del aire y del vapor de agua se pueden suponer constantes en el intervalo de T° iguales y normal. (11)

$$\begin{aligned} C_s &= 1.005 + 1.88H && \text{kJ/kg } ^\circ\text{K} \\ C_s &= 0.24 + 0.46H && \text{BTU/lb } ^\circ\text{F o kCal/}^\circ\text{C kg} \end{aligned}$$

**Volumen Húmedo.** Es el volumen total en m<sup>3</sup> de 1 kg de aire seco más el vapor que contiene a 101.325 kPa de presión y a la T° del gas considerada.

$$\begin{aligned} V_h &= 22.41(^{\circ}\text{K})/273 (1/29 + H/18) && \text{m}^3/\text{kg} && \text{(a presión estándar)} \\ V_h &= 359 (^{\circ}\text{R})/492 (1/29 + H/18) && \text{pie}^3/\text{lb} \end{aligned}$$

**Entalpía total de aire-vapor de agua.** Si la T<sub>o</sub> es la T° base seleccionada para ambos componentes, la entalpía total es el calor sensible de la mezcla aire-vapor más el calor latente λ<sub>o</sub> en kJ/kg de vapor de agua, del vapor de agua a T<sub>o</sub>: (11)

$$H_G = C_s (T - T_o) + \lambda_o H$$

$$H_G = (1.005 + 1.88H) (T - 0^{\circ}\text{C}) + 2501xH \quad (\text{kJ/kg})$$

$$H_G = (1.005 + 1.88H) (T - 273.15^{\circ}\text{K}) + 2501xH \quad (\text{kJ/kg})$$

$$H_G = C_s (T - 32) + 1075xH \quad (\text{BTU/lb})$$

$$H_G = (0.24 + 0.46H) (T - 32^{\circ}\text{F}) + 1075xH \quad (\text{BTU/lb})$$

$$H_G = (0.24 + 0.46H) (T - 0^{\circ}\text{C}) + 597.2 H \quad (\text{kCal/kg})$$

**Calor total.** El contenido de calor total de la mezcla de aire y vapor de agua, también se conoce como entalpía. Es la suma de los valores del calor sensible y latente, expresado en BTU por libra de aire. (18)

CAPÍTULO 3

TORRES DE  
ENFRIAMIENTO

### III. TORRES DE ENFRIAMIENTO

#### 3.1 PRINCIPIO DE ENFRIAMIENTO POR EVAPORACIÓN

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

El proceso de transferencia de calor comprende:

1. la transferencia de calor latente debido a la evaporación de una porción pequeña de agua, y
2. la transferencia de calor sensible debido a la diferencia de temperatura entre el agua y el aire.

Aproximadamente el 80 % de dicha transferencia de calor se debe al latente y el 20% al sensible.

La posible eliminación teórica de calor por libra de aire circulado en una torre de enfriamiento depende de la temperatura y el contenido de humedad del aire. La temperatura de bulbo húmedo es un indicador del contenido de humedad del aire. Por tanto, desde el punto de vista ideal, ésta es la temperatura teórica más baja a la que se puede enfriar el agua. Prácticamente, la temperatura del agua se acerca, pero no llega a ser equivalente, a la de bulbo húmedo del aire en una torre de enfriamiento, y esto se debe a que es imposible establecer un contacto de toda el agua con el aire fresco conforme ésta desciende por la superficie mojada de llenado hasta el estanque. La magnitud del acercamiento a la temperatura de bulbo húmedo depende del diseño de la torre. Entre otros factores importantes están el tiempo de contacto entre aire y agua, la cantidad de superficie de llenado y la separación de agua en gotitas. En la práctica, las torres de enfriamiento rara vez se diseñan para acercamientos menores de 2.8 °C (5 °F). (25).

*Nota: el acercamiento o aproximación es la diferencia de temperaturas entre la temperatura de salida del agua de la torre y la temperatura de bulbo húmedo.*

#### Enfriamiento atmosférico del agua

Cuando la carga de calor de desecho del agua se puede transferir a la atmósfera, se puede aprovechar el agua en un ciclo continuo y conservarse mejor. El calor se puede transferir al poner el agua y el aire en contacto indirecto, como en el radiador de un automóvil. Otra forma es con equipo de enfriamiento evaporativo, tal como estanques de aspersion atmosférica, torres de enfriamiento, etc. El agua cuando se enfría por el método evaporativo, pierde alrededor de 1000 BTU por cada libra de agua evaporada. Este calor arrastrado en el vapor de agua producido se llama calor latente de vaporización. Cuando el aire extrae el calor del vapor de agua en esa forma, puede enfriar el agua a menos de la temperatura atmosférica. Este hecho es importante en la

transferencia de calor del agua al aire. Permite que el agua enfriada por evaporación sirva en plantas con gran variedad de necesidades de temperatura. También permite que una cantidad pequeña de agua disipe una carga de calor mucho mayor, que si no estuviera a menos de la temperatura atmosférica.

### **Enfriamiento por evaporación**

La evaporación de la transpiración ayuda al cuerpo humano a mantener su temperatura normal de 36.9 °C en lugares en donde la temperatura ambiente es mucho mayor. Ese calor latente de evaporación es el efecto del enfriamiento primario producido al soplar aire sobre superficies húmedas o a través de láminas del agua que cae en una torre de enfriamiento.

Los técnicos de enfriamiento usan también el término "calor sensible" (el calor que se puede sentir) para indicar la temperatura. Cuánto más alta sea la temperatura de una sustancia, mayor será su calor sensible. Cuando el aire está más frío que el agua, hay cierta tendencia (sin contar la evaporación) a que el aire enfríe el agua, es decir, que el aire se caliente más (absorba calor sensible) mientras que el agua se enfría (disipa calor sensible).

Cuando la humedad es de 100%, la temperatura de bulbo húmedo será la misma que la de bulbo seco. Para cualquier humedad más baja, parte del agua se evaporará y enfriará el bulbo, por lo cuál la lectura del bulbo húmedo será menor que la de bulbo seco. Cuando más seco esté el aire, mayor será esta diferencia. Con otros factores iguales, el aire fresco es mejor que el aire un tanto caliente para la torres de enfriamiento. Lo más importante es una baja temperatura de bulbo húmedo que indique, ya sea, aire muy frío, humedad muy baja o una combinación de los dos.

Las salpicaduras de las gotitas que caen de un nivel a otro en una torre de enfriamiento enfrían el relleno y dan mayor exposición de la superficie del agua al aire descendente.

El efecto de enfriamiento se puede acelerar con:

1. Aumento de la velocidad del aire sobre las superficies húmedas
2. Aumento de la superficie mojada expuesta
3. Menor presión barométrica
4. Aumento de la temperatura del agua para la torre
5. Reducción de la humedad del aire

## **3.2 SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO DE AGUA INDUSTRIAL**

Debido a que existen una amplia gama de industrias con diferentes necesidades y recursos para producir un sistema para el enfriamiento de agua, se debe hacer una proyección del mejor sistema de enfriamiento que cumpla con todos los requerimientos de la planta para que así haya una optimización en el ahorro de dinero, en cuanto a la construcción o costos operativos.

Hay muchos casos en la práctica en los que se descarga agua caliente de condensadores y de otros aparatos y donde el valor de esta agua es tal, que es más económico enfriarla y volver a utilizarla antes que descargarla como inútil. Este enfriamiento se efectúa poniendo en contacto el agua con aire sin saturar en condiciones tales que el aire se humidifica y el agua se pone aproximadamente a la temperatura de bulbo húmedo. Este método se utiliza únicamente en el caso en que la temperatura de bulbo húmedo para el aire es más baja que la temperatura que se quiere que alcance el agua que sale.

Todos los métodos para enfriar el agua por el procedimiento de ponerla en contacto con aire, entrañan la subdivisión del agua en forma tal que presente la mayor superficie posible. Cuando el agua es costosa o escasa, no se debe desperdiciar después de una sola pasada por un aparato de intercambio calórico. En vez de ello, se usa en forma repetida el suministro limitado y se enfría después de cada uso. El aire atmosférico enfría tres tipos de sistemas de enfriamiento: estanques de enfriamiento, estanques de aspersión y torres de enfriamiento. (1)

### 3.2.1 ESTANQUES DE ENFRIAMIENTO

El agua se enfría en forma económica por circulación en un estanque de enfriamiento, si hay una superficie amplia expuesta a la atmósfera. Los estanques son mejores si sólo se va a enfriar un poco de agua, el terreno es barato o si hay un estanque natural. La superficie del estanque debe recibir el agua caliente en un extremo y entregar agua enfriada cerca del fondo en el otro extremo.

El régimen o rapidez de enfriamiento depende de la superficie del estanque, la diferencia en temperatura entre el agua y el aire, la velocidad y humedad del aire, y la longitud de la trayectoria para el aire por unidad de área de la superficie del estanque. La profundidad usual del estanque es de 2 a 4 pies, pero el volumen debe ser suficiente para tener capacidad de almacenamiento para satisfacer las variaciones en la carga.

Cuando se tienen superficies terrestres grandes, los estanques de enfriamiento ofrecen un método satisfactorio para eliminar el calor del agua. El estanque se puede construir con una inversión relativamente pequeña levantando un dique de tierra de 1.8 a 3.1 m de altura. Para lograr una buena instalación de estanque, el suelo debe ser razonablemente impermeable y conviene que la ubicación se haga en una zona plana. En el enfriamiento en un estanque abierto se comprenden cuatro procesos principales de transferencia de calor: éste se pierde por evaporación, convección y radiación, o se recupera por radiación solar. El área de estanque necesaria dependerá de la cantidad de grados de enfriamiento necesaria y la pérdida neta de calor de cada  $\text{ft}^2$  de superficie de estanque.

Langhaar (Perry, 1992) indica que en condiciones atmosféricas específicas, un cuerpo de agua alcanza finalmente una temperatura a la que la pérdida del calor es igual a la ganancia del mismo. Esta temperatura se conoce como de equilibrio. La temperatura de equilibrio se ve afectada profundamente por la cantidad de radiación solar, que por lo común no se conoce con mucha precisión y que varía a lo largo del día. Si un estanque tiene por lo menos una retención de 24 hrs, entonces se deben utilizar

condiciones climatológicas cotidianas promedio. Para fines prácticos se recomienda que la temperatura de equilibrio se tome como la cantidad igual a la temperatura normal del agua de río o lago para las condiciones meteorológicas especificadas.

Para enfriar a la temperatura de equilibrio, se requeriría un estanque de tamaño infinito para el agua tibia. El acercamiento más bajo posible que se puede obtener en un estanque de tamaño razonable es de 1.7 a 2.2 °C (3 a 4 °F). Para un estanque con una retención mayor de 24 hrs, la temperatura del agua saliente variará del promedio en más o menos 1.1 °C (2 °F) con una profundidad de 1.5 m (5 ft) y tendrá una variación de 1.7 °C (3 °F) para una profundidad de 0.9 m (3 ft).

El área de estanque necesaria para una carga de enfriamiento dada es casi independiente de la profundidad del mismo. En general, es conveniente tener una profundidad de 0.9 m por lo menos, con el fin de evitar una canalización excesiva de flujo en estanques que cuentan con fondos irregulares, y para evitar cambios notables en la temperatura de salida entre el día y la noche.

Entre los factores que se considera afectan el rendimiento del estanque están la temperatura y humedad relativa del aire, la velocidad del viento y la radiación solar. Entre los aspectos que tienen sólo un efecto menor se incluyen la transferencia de calor entre la tierra y el estanque, las variaciones de temperatura y humedad del aire cuando éste atraviesa el agua, y la lluvia. (25)

### 3.2.2 ESTANQUES DE ASPERSIÓN

Los estanques de aspersión reducen el área de superficie de los estanques de enfriamiento. Se hace pasar agua a presión por boquillas que la asperjan a través del aire en forma atomizada. La aspersión pone las partículas de agua en contacto íntimo con el aire. Esto aumenta mucho la superficie expuesta por peso unitario de agua enfriada.

La evaporación y el resultante enfriamiento son rápidos. Para un servicio dado, el estanque de aspersión solo necesita entre 1 y 10 % de la superficie importante cuando el terreno para el estanque es costoso o el espacio está restringido.

Las boquillas o cabezas aspersoras son de un tipo especial que no se obstruye, funcionan entre 3 y 15 psi, y por lo general, a 6 psi. Están espaciadas a intervalos de 8 a 15 pies sobre hileras de tubos separadas entre 15 y 20 pies. Como el agua debe tener un contacto íntimo con el aire, la disposición de las boquillas debe permitir caminos adecuados para el aire a través de las aspersión.

Una boquilla de rocío bien diseñada debe suministrar gotas finas de agua, pero sin producir un rocío que el viento arrastre con facilidad, ya que esto equivale a una pérdida excesiva de flujo. El tanque se debe situar de tal modo que su eje más largo forme un ángulo recto con el viento dominante de verano. El tanque rectangular es más eficaz que el cuadrado, de modo que si se reduce la anchura del mismo y se incrementa su longitud, se obtendrá un mejor rendimiento. El rendimiento se perfecciona más aún reduciendo la cantidad de agua rociada por unidad de área del tanque, aumentando la altura y la finura

de las gotas de rocío, e incrementando la altura de la boquilla sobre los lados del tanque. Se debe dejar la suficiente distancia en relación con las boquillas exteriores, para evitar que el rocío se derrame sobre los lados del tanque. (25)

Además se debe tener amplia superficie del estanque más allá de la aspersión para atrapar el brisado con vientos fuertes. Asimismo, durante los periodos fríos, sucede a menudo que se producen nieblas en los tanques de rocío, de manera que esto se debe de tomar en cuenta para no dar margen a peligros posibles en carreteras o edificios que puedan estar en las cercanías inmediatas. Si el espacio está limitado, como en el techo de un edificio, las rejillas evitarán la pérdida excesiva de agua. Hasta un 60 % del agua enfriada se pierde por evaporación y brisado, incluso con las rejillas. La pérdida total depende del calor extraído del agua circulada.

Cuando se utiliza un estanque de aspersión para enfriar el agua de condensación de una planta de vapor, la energía utilizada para bombear el agua es de 1 a 2 % de la potencia total de la planta generadora.

Para tener más enfriamiento, se vuelve a asperjar el agua del estanque. Existen dos formas:

- Usar un sistema de aspersión mixta en el cual el agua del estanque se agrega al agua caliente en proporciones definidas de asperjar.
- Con nueva aspersión independiente (doble aspersión), con un sistema separado de distribución.

Cualquiera de los dos métodos requiere más boquillas, tubos más largos o más grandes, más superficie del estanque y más energía de bombeo.

No hay reglas generales para la selección o proyecto del estanque de aspersión. La razón son las variaciones en condiciones de operación, factores de costo, condiciones locales de clima, etc. Esto hace que cada problema sea individual.

### 3.2.3 TORRES DE ENFRIAMIENTO

El uso de las torres de enfriamiento ha crecido tremendamente en los últimos 35 años, debido a una necesidad cada vez mayor de agua como refrigerante. En muchas plantas industriales el agua fría cruda es muy escasa, de manera que no se permite su uso ilimitado como medio de enfriamiento. El problema de suministrar suficiente agua superficial y de subsuelo con fines de enfriamiento, ha crecido al grado de que las nuevas plantas a menudo se les requiere desarrollar un uso continuo de las cantidades limitadas de agua que pueden obtener de fuentes públicas o privadas. En algunas comunidades aun el agua de río, que puede estar presente en abundancia, requiere preenfriamiento.

La temperatura disponible en el agua de enfriamiento se ha visto que es un importante factor económico en el diseño de las modernas plantas químicas y de fuerza. En la planta química fija la presión de operación en los condensadores de los procesos de destilación y evaporación, y consecuentemente, en el equipo que los precede. Por estas razones vitales el estudio de las torres de enfriamiento y la temperatura del agua que se puede obtener, es de gran importancia al planear el proceso. La torre de enfriamiento es

también el miembro más simple de una clase de aparatos cuyas potencialidades han sido poco exploradas. (15)

Una torre de enfriamiento es una estructura con vanteos que tiene una cubierta o cascon (madera, concreto, ladrillo, metal) que aloja una red de obstrucciones o rellenos. El agua que va a enfriarse se bombea hacia un sistema de distribución en la parte superior de la torre, desde donde cae en láminas delgadas o se asperja hacia el relleno. El relleno está dispuesto de modo que el agua se extienda para exponer nuevas superficies al aire que circula por la torre. El agua enfriada se recoge en un depósito.

El aire que pasa por la torre se satura en forma parcial o completa por la evaporación de una parte del agua. Esta evaporación es la que en su mayoría, enfría el agua. Cuando hay abundantes superficies de enfriamiento y aire, el agua se puede enfriar hasta la temperatura de bulbo húmedo, como límite. Según las condiciones, el agua se suele enfriar dentro de 4 a 40 °F de la temperatura de bulbo húmedo. A menudo se prefiere la torre de enfriamiento a un estanque. La razón es que da mayor efecto de enfriamiento por unidad de superficie ocupada. Además tiene mayor rango de enfriamiento debido al tiempo de contacto más largo del aire con el agua atomizada. Además es más conveniente por inspección y reparación.

El objetivo de una torre de enfriamiento es enfriar agua con el fin de poder reutilizarla muchas veces. El agua caliente, generalmente procedente de un condensador u otro aparato de transmisión de calor, se introduce en la parte superior de la torre y, mediante un sistema de distribución del líquido, cae en forma de cascada sobre el enrejado de madera que proporciona grandes áreas de contacto entre el aire y el agua. El flujo ascendente del aire por la torre está inducido por las fuerzas de flotación del aire caliente. El material de relleno habitualmente utilizado es madera de ciprés, que resulta económica y resiste bien la acción combinada del aire y el agua. En la torre se evapora parte del agua en el aire y se transmite calor sensible desde el agua caliente hacia el aire más frío, dando lugar ambos procesos a un enfriamiento del agua. Para mantener el balance de agua solamente hace falta una pequeña reposición de líquido para compensar las pérdidas por evaporación y arrastre por el aire.

La fuerza impulsora para la evaporación es debida a la diferencia entre la presión de vapor del agua y su presión de vapor si estuviese a la temperatura húmeda del aire. Es evidente que el agua no se puede enfriar por debajo de la temperatura de bulbo húmedo del aire y, en la práctica, la temperatura de salida tiene que ser por lo menos 2 o 3 °C superior a la temperatura húmeda. Esta diferencia se conoce con el nombre de aproximación. La variación de temperatura que experimenta el agua entre la entrada y la salida recibe el nombre de intervalo o rango. Así, si el agua se enfría desde 35 hasta 27 °C, poniéndola en contacto con aire a una temperatura húmeda de 21 °C, el intervalo sería de 8 °C y la aproximación de 6 °C. (20)

La teoría del proceso de transferencia de calor en una torre de enfriamiento que ha merecido una aceptación más generalizada es la que desarrolló Merkel. Este análisis se basa en la diferencia del potencial de entalpía como fuerza impulsora. Se supone que cada partícula de agua está rodeada por una película de aire y que la diferencia de entalpía entre la misma y el aire circundante proporciona la fuerza impulsora para el

proceso de enfriamiento. La ecuación de Merkel se expresa en forma integrada de la manera siguiente:

$$KaV/L = \int_2^1 \frac{dH}{H-H}$$

en donde K es el coeficiente de transferencia de masa en lb agua/(h ft<sup>2</sup>); a es el área de contacto en ft<sup>2</sup>/ft<sup>3</sup> de volumen de la torre; V es el volumen de enfriamiento activo en ft<sup>3</sup>/ft<sup>2</sup> de área plana; L es la velocidad del agua lb agua/(h ft<sup>2</sup>); H<sub>i</sub> es la entalpía del aire saturado a la temperatura del agua en BTU/lb. El lado derecho de la ecuación se expresa por completo en términos de las propiedades del aire y el agua, y es independiente de las dimensiones de la torre. La integral de la ecuación se conoce como característica de torre, que varía con la razón L/G. (25)

La temperatura mínima a la cual se puede enfriar el agua a lo largo de todo el año no depende de la temperatura de bulbo seco del verano, sino de la máxima temperatura de bulbo húmedo. Se han publicado tablas de temperaturas húmedas máximas para distintos lugares del país como para muchas otras partes del mundo.

La pérdida de agua por evaporación durante el enfriamiento es pequeña. Por consiguiente, una variación de 6 °C en la temperatura del agua produce unas pérdidas por evaporación del orden del 1 por ciento. Hay además pérdidas por arrastre mecánico, pero en las torres bien diseñadas se elevan solamente al 0.2 por ciento. En las condiciones indicadas anteriormente, las pérdidas de agua durante el paso a través de la torre serían aproximadamente  $8/6 \times 1 + 0.2 = 1.5\%$ . En el enfriamiento de otros líquidos, las pérdidas por evaporación, aunque pequeñas, son algo mayores que para el agua, debido al menor calor latente de vaporización. (20)

### 3.2.3.1 Términos de operación

Quienes operan o fabrican equipo mecánico especializado, crean en forma gradual su propio "idioma" con palabras y frases que describen funciones, partes o características particulares relacionadas con su equipo. A continuación aparecen algunos de los términos más comunes utilizados con equipo para enfriamiento atmosférico de agua (ver fig. 4a).

- **Rango de enfriamiento:** es el número de grados °F o °C que se enfría el agua en la torre. Es la diferencia de temperatura del agua caliente que entra en la torre y la temperatura del agua fría que sale de la torre.
- **Aproximación:** es la diferencia en grados °F o °C entre la temperatura del agua fría que sale de la torre y la temperatura de bulbo húmedo del ambiente.
- **Carga de calor:** es la cantidad de calor disipado por las torres de enfriamiento en BTU/h. Es igual a las libras de agua circulada, multiplicadas por el rango de enfriamiento.
- **Carga de bombeo:** es la presión requerida para elevar el agua caliente que retorna, desde el nivel de la base de la torre hasta la parte superior de la misma y forzarla a través del sistema de distribución. La carga de bombeo es igual a la carga estática, más la pérdida por fricción en el sistema de distribución y a la carga de velocidad (carga requerida para mantener la velocidad del agua).
- **Brisado o arrastre:** es la pequeña cantidad de agua sin evaporar perdida en la forma de finas gotas retenidas por el aire que circula. El brisado es una pérdida de agua independiente del agua perdida por evaporación. La pérdida por brisado, al contrario de la pérdida por evaporación, se puede minimizar con un buen proyecto.

- **Purga:** es la pérdida continua o intermitente de una pequeña fracción de agua que circula para evitar en el agua la formación y concentración de químicos promotores de incrustación.
- **Reposición o "make-up":** Es el agua requerida para reemplazar el agua que se pierde por evaporación, arrastre y purga.

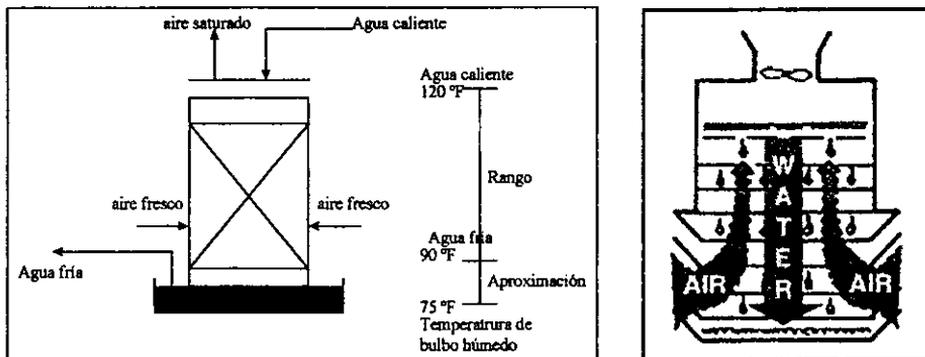


Fig. 4a) Definición esquemática de rango y aproximación y 4b) Intercambio entre el agua y el aire en las torres de enfriamiento (Cheresmisinoff)

### 3.2.3.2 Partes internas de las torres de enfriamiento e importancia del empaque

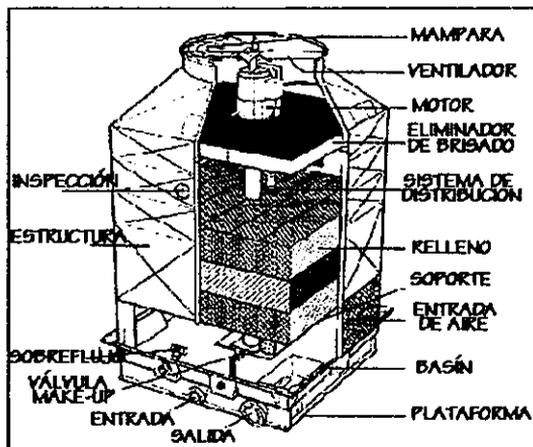


Fig. 5 Descripción de las partes internas de las torres

**Basín o cárcamo:** Es el recipiente en el cual cae el agua directamente del empaque, se fabrica generalmente de concreto reforzado con varilla de acero. Debe tener un desnivel hacia donde se encuentran las bombas de circulación. Generalmente el diseño del cárcamo y el canal de una torre de enfriamiento no son responsabilidad del fabricante, sino del departamento civil, sin embargo es una zona crítica del proceso, ya que si está mal diseñado habrá problemas en la succión de las bombas y la torre no dará

el servicio requerido. El diseño óptimo es el de un canal que vaya directo a las bombas y que no tenga vueltas ni obstrucciones, ya que pueden originar la formación de remolinos, los cuales se convierten en vórtices que introducen aire en las bombas.

**Distribuidores de agua:** Generalmente son de dos tipos:

1. Por gravedad, cuando se tiene una placa o plancha con bordes en forma de caja en cuyo fondo se hacen perforaciones de igual diámetro. Esta placa generalmente se fabrica de madera.
2. Por presión, cuando se tiene una tubería con perforaciones a la cual se instalan espreas para inyección forzada de agua, estas espreas son generalmente de acero inoxidable.

**Ventiladores, motores y ciclones de carga:** Los ventiladores son el elemento mecánico que proporciona el flujo de aire requerido para llevar a cabo el enfriamiento, casi siempre son fabricados de acero forjado con aspas de políester reforzado con fibra de vidrio, en algunos casos, el ventilador y su grupo mecánico se fabrican de fierro galvanizado en caliente con aspas de aluminio. Los motores son el elemento mecánico que proporciona la potencia requerida para el movimiento del ventilador, estos deben de incluir una protección contra humedad. Los ciclones de descarga, o anillos de los ventiladores tienen como finalidad propiciar la salida del aire caliente, generalmente se fabrica del mismo material que constituyen las paredes de la torre.

**Eliminador de niebla:** La función del eliminador de niebla es la de separar el agua del aire que lleva éste por arrastre, consiste generalmente de una sección empacada que provoque cambios bruscos de dirección.

**Perlsanas:** Su función es la de propiciar la entrada de aire a la torre e impedir la salida del agua, en algunos casos son de ángulo de inclinación variable y se construyen generalmente del mismo material que las paredes.

**Relleno:** Es el material con el cual está empacada la torre cuya finalidad es proporcionar el área necesaria para llevar a cabo el enfriamiento. El tipo de empaque determina uno de los factores principales para el diseño de la torre, el cual es el coeficiente de transferencia de masa y es característico de cada tipo de empaque y de los flujos manejados.

Si el agua pasa a través de una boquilla capaz de producir pequeñas gotas, se dispondrá de 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 pie cúbico de aparato de contacto. Este es el principio de la fuente de rocío y la torre de rocío. Considere una torre de rocío hipotética como se muestra en la fig. 6. El líquido que se alimenta desciende a través de ella por gravedad. Si la torre tiene 16 pies de alto y no se le imparte velocidad inicial a la gota, ésta caerá en un tiempo aproximado de acuerdo con la ley de la caída libre,  $z = \frac{1}{2} g \theta^2$ , donde  $z$  es la altura,  $g$  es la gravedad y  $\theta$  es el tiempo. Una gota de agua caerá a través de esta altura en 1 seg. Si el líquido se alimenta a razón de una gota por segundo y no hay 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.

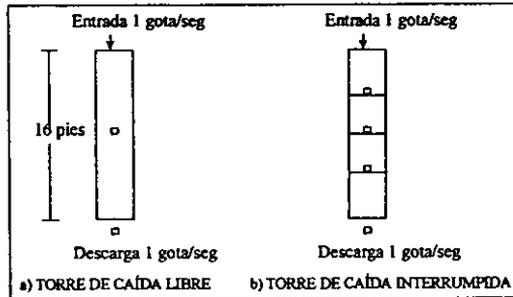


Fig. 6 Caída libre e interrumpida.

Ahora suponga que introduciendo algunas formas geométricas en las que la gota puede tropezar o desviarse, es posible hacer que la gota tarde cuatro segundos en recorrer la altura de la torre. Entonces, como se muestra en la fig. 6, se alimenta una gota por segundo en la parte superior y una gota se elimina en el fondo en el mismo lapso, pero en la torre quedan cuatro gotas. Luego la superficie efectiva en esta última es la de cuatro gotas o cuatro veces la superficie de caída libre. La función del empaque es aumentar la superficie disponible en la torre, ya sea distribuyendo el líquido sobre una gran superficie o retardando la caída de las gotas a través del aparato. En las torres de enfriamiento debido a los requerimientos de grandes volúmenes de aire y pequeñas caídas de presión permitidas, es costumbre usar largueros de madera de sección rectangular o triangular, que dejan la torre sustancialmente sin obstruir. El empaque o relleno, en una torre de enfriamiento, tiene el propósito de interrumpir el descenso del líquido. Aún cuando el espacio libre entre los largueros adyacentes es relativamente grande, la proyección horizontal del relleno no permite que las gotas de líquido caigan a través de la torre sin golpear repetidamente en los largueros inferiores. Algo del líquido que golpea la parte superior del larguero salpica, pero una gran parte fluye por sus contornos y se rompe en flujo turbulento en la parte inferior para formar automáticamente nuevas gotas y crear nueva superficie de gota. Recientemente la tendencia ha sido hacia el uso de largueros rectangulares más pequeños. Estos son considerablemente más económicos en su fabricación e instalación que aquellos de sección transversal mayor, y originan menores caídas de presión. El mecanismo de producir gotas en la parte inferior de cada hilera horizontal se basa en que el líquido drenado se rompe en flujo turbulento. Consecuentemente el método por el que las gotas se formen en la parte superior de la torre es de menor consecuencia en la formación total de superficie, siempre y que haya una distribución uniforme del líquido en toda la sección transversal de la torre.

La ventaja de la caída interrumpida es que, cada vez que la caída se interrumpe (digamos a cada cuarta parte de la torre), es como si una gota con velocidad cero empezara a caer de nuevo, y la equivalencia de la torre interrumpida es igual a la efectividad del primer cuarto, o sea, cuatro torres en serie.

En muchas torres de enfriamiento el líquido se introduce rociando el agua hacia arriba y luego hacia abajo antes de golpear la primera hilera de empaque. Esto provee contacto efectivo a bajo costo, puesto que la velocidad de la gota en su viaje ascendente debe disminuir a cero para invertir su dirección. Otro medio de aumentar la superficie o medio de contacto en torres de rocío y torres de enfriamiento, es atomizando el agua en

lugar de formar gotas. Esto mismo puede lograrse por una boquilla en lugar de un atomizador usando un agente humectante soluble en agua. Sin embargo, esto no es muy práctico, ya que las gotas muy finas no pueden recogerse en los eliminadores sino a expensas de una gran caída de presión. En la construcción de las torres de enfriamiento es costumbre emplear gotas de tal tamaño, de manera que las pérdidas por arrastre puedan garantizarse que no excederán a 0.25% del agua total recirculada a la torre. (15)

El relleno de las torres de enfriamiento se puede hacer con tablas o tabillas, lozetas huecas, láminas metálicas, tela metálica o rejillas especiales. Las maderas más comunes son de pino de California o ciprés y otras que no se deterioran con facilidad. La unidad de superficie expuesta del relleno, por unidad de volumen de aire, depende del tipo de la torre y del tipo y disposición del relleno. Suele ser de 50 a 20 ft<sup>2</sup>/ft<sup>3</sup> de espacio de relleno. El área libre para la circulación del aire es de 65 a 85 % del área transversal total ocupada por el relleno. La velocidad de circulación de aire por la torre depende del tipo de torre y las condiciones de operación: suele ser de 100 a 700 pies por minuto.

### 3.3 TIPOS DE TORRES DE ENFRIAMIENTO

Las torres de enfriamiento modernas se clasifican de acuerdo a los medios por los que se les suministra aire (ver fig. 7). Todas emplean hileras horizontales de empaque para suministrar gran superficie de contacto entre el aire y el agua. En las torres de tiro mecánico el aire se suministra de dos formas. Si el aire se succiona a través de la torre mediante un abanico situado en la parte superior de la torre, a esto se le llama tiro inducido. Si el aire se fuerza por un abanico en el fondo de la torre y se descarga en la parte superior, es un tiro forzado. Las torres de circulación natural son de dos tipos, atmosféricas y de tiro natural. (15)

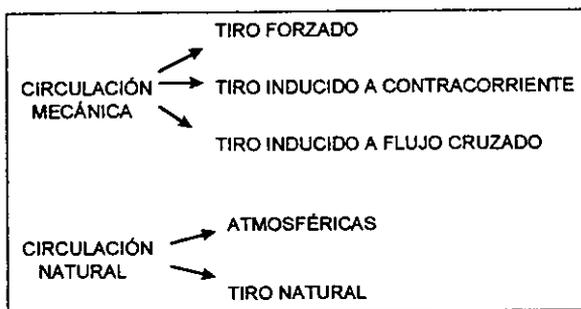


Fig. 7 Clasificación de las Torres de Enfriamiento

### 3.3.1 TORRES ATMOSFÉRICAS

La torre atmosférica aprovecha las corrientes atmosféricas del aire. El aire penetra a través de los rompiewientos en una sola dirección, cambiando con la estación del año y las condiciones atmosféricas. En lugares expuestos que tienen vientos con velocidades promedio de 5 o 6 mph, la torre atmosférica puede ser la más económica, y donde los costos de energía son altos puede aún ser preferible a velocidades de aire tan bajas como 2½ a 3 mph. Puesto que las corrientes atmosféricas penetran a todo lo ancho de la torre, las torres se hacen muy angostas en comparación con otros tipos, y deben ser muy largas para una capacidad igual. Se han construido torres de este tipo que tienen más de 2000 pies de largo. Las pérdidas por arrastre se manifiestan a todo lo largo y son mayores que en otros tipos de torre. Este tipo usa los potenciales disponibles más ineficientemente, ya que opera a flujo cruzado donde el uso más efectivo de los potenciales es en contracorriente. Cuando se desea agua a una temperatura cercana al bulbo húmedo, este tipo es incapaz de producirla. Las torres atmosféricas tienen, consecuentemente, un costo inicial alto debido a su tamaño, y cuando hay calma deben dejar de operarse. Sin embargo, tienen una gran ventaja, eliminan el costo principal de operación de las torres de tiro mecánico, es decir, el costo de la fuerza para el abanico. En áreas con velocidad promedio de viento baja, los cargos fijos y costos de operación contrarrestan la ventaja. Un promedio de velocidad que exceda a las 5 o 6 mph, no es indicación suficiente de que la torre atmosférica sea la mejor. Con un promedio de velocidad en el viento de 5 mph la torre operará a menos de su capacidad de diseño parte del tiempo. La localización de la torre en una localidad con vientos de 5 mph debe ser tal que no debe tener obstrucciones y debe aprovechar completamente las corrientes existentes. (15)

La torre de enfriamiento atmosférico es la más sencilla. El aire entra por los lados con rejillas que impiden que el viento arrastre el agua y circula en sentido transversal. La circulación del aire depende de la velocidad del viento. Estas torres se suelen diseñar para enfriar alrededor de 1.5 gpm por pie<sup>2</sup> de área horizontal activa, con un viento de 5 mph. Para enfriamiento eficaz, tiene limitaciones de anchura, a fin de que no soporten grandes cargas de enfriamiento, salvo que sean muy largas. Las pruebas han indicado que las torres de enfriamiento con una plataforma de más de 12 pies de anchura pierden eficiencia. Muchos fabricantes hacen torres estándar de plataforma de 6, 8, 10 y 12 pies para unidades atmosféricas. Las rejillas aumentan la anchura total de la torre, pero las indicadas son las anchuras estándar de las plataformas. Para evitar la formación de hielo en invierno, un sistema secundario de distribución envía agua solo a la parte inferior del relleno.

Muy relacionadas con las torres de circulación natural están las fuentes de rocío, consistentes en cierto número de boquillas verticales, que proyectan el agua al aire sin inducir corrientes en éste. Estas no operan con un flujo ordenado de aire y, consecuentemente, no son capaces de producir agua que se aproxime a la temperatura de bulbo húmedo tan efectivamente como las torres de enfriamiento. Donde el agua debe enfriarse en un rango corto y sin una aproximación cercana a la temperatura de bulbo húmedo, las fuentes de rocío pueden ser la solución más económica al problema de enfriar agua. Las pérdidas por arrastre son relativamente altas. Las torres de rocío también se usan ampliamente, son similares a las atmosféricas excepto que casi no usan empaque. (15)

### 3.3.2 TORRES DE TIRO NATURAL

Las torres de tiro natural o de tipo hiperbólico comenzaron a utilizarse en Europa a partir de 1916, aproximadamente, y se han convertido en una práctica estándar para los requisitos de enfriamiento de agua de las estaciones generadoras de Gran Bretaña. Estas son esencialmente apropiadas para cantidades muy grandes de enfriamiento y las estructuras de concreto reforzado que se acostumbra utilizar llegan a tener diámetros del orden de 80.7 m (265 ft) y alturas de 103.6 m (340 ft). La conveniencia de diseño obtenida gracias al flujo constante del aire de las torres de tiro mecánico no se logra en un diseño de torre de tiro natural. (25)

Las torres de tiro natural operan de la misma manera que una chimenea de un horno. El aire se calienta en la torre por el agua caliente con la que entra en contacto, de manera que su densidad baja. La diferencia entre la densidad del aire en la torre y en el exterior origina un flujo natural de aire frío en la parte inferior y una expulsión del aire caliente menos denso en la parte superior. Las torres de tiro natural deben ser altas para promover este efecto y deben también tener sección transversal grande debido a la baja velocidad con que el aire circula comparada con las torres de tiro mecánico. Las torres de tiro natural consumen más fuerza por el bombeo. Sin embargo, eliminan el costo del abanico y pueden ser más aconsejables en algunas localidades que las torres atmosféricas. En las torres atmosféricas deben enfatizarse las características del viento. En las torres de tiro natural la consideración primordial debe darse a las características de temperatura del aire. Si es costumbre que el aire alcance temperaturas altas durante el día, cuando menos con relación a la temperatura del agua caliente, la torre de tiro natural cesará de operar durante la porción caliente del día. Los costos iniciales y cargos fijos de esta torre son algo altos, y parece que están pasando de moda. (15)

La velocidad media del aire por encima del relleno de torre es, por lo común, de 1.2 a 1.8 m/s (4 a 6 ft/s). El rendimiento de una torre de tiro natural difiere del de torre de tiro mecánico en que el enfriamiento depende de la humedad relativa tanto como de la temperatura de bulbo húmedo. El tiro aumenta a través de la torre en condiciones de gran humedad, debido al incremento en la diferencia de presión estática disponible para promover el flujo de aire venciendo las resistencias internas. Por lo tanto, cuanto mayor sea la humedad a una temperatura de bulbo húmedo en particular, tanto más fría será el agua de salida para un conjunto de condiciones específicas. Esta relación fundamental se ha utilizado con gran provecho en Gran Bretaña, en donde las humedades relativas son por lo común del 75 a 80 %. Por lo tanto, en las etapas de diseño es de vital importancia determinar correctamente y especificar la densidad del aire que entra y sale, además de las condiciones usuales del diseño de la torre, de la gama, la diferencia útil de temperaturas y la cantidad de agua. La relación del rendimiento con las condiciones de humedad permite un control exacto de la temperatura del agua de salida que es difícil lograr en una torre de tiro natural. (25)

### 3.3.3 TORRES DE TIRO FORZADO

En las torres de tiro forzado, el ventilador se descarga con baja velocidad por la parte superior. Esta disposición tiene la ventaja de ubicar el ventilador y el motor propulsor fuera de la torre, sitio muy conveniente para la inspección, el mantenimiento y la

reparación de los mismos. Puesto que el equipo queda fuera de la parte superior caliente y húmeda de la torre, el ventilador no está sometido a condiciones corrosivas; sin embargo, dada la escasa velocidad del aire de salida, la torre de tiro forzado está sujeta a una recirculación excesiva de los vapores húmedos de salida que retoman a las entradas del aire. Puesto que la temperatura de bulbo húmedo del aire de salida es mucho mayor que la del aire circundante, existe una reducción en el buen desempeño, lo cual se evidencia mediante un incremento en la temperatura del agua fría (saliente). (25)

En el tipo de tiro forzado el aire entra a través de una abertura circular mediante un abanico, y debido a esto se debe suministrar una altura de torre y su volumen correspondiente de relativa ineffectividad, que se usa como entrada de aire. La distribución del aire es relativamente pobre, puesto que el aire debe dar una vuelta de 90° a gran velocidad. En las torres de tiro inducido, por otra parte, el aire puede entrar a lo largo de una o más paredes de la torre y, como resultado, la altura requerida de la torre para entrada de aire es muy pequeña. (15)

### 3.3.4 TORRES DE TIRO INDUCIDO

Actualmente las torres de esta clase son las más comunes en los Estados Unidos de América. La preferencia hacia las torres de tiro inducido ha sido muy pronunciada a partir de los últimos 25 años, pero representa una transición lógica, puesto que en su uso hay ventajas que exceden a todas las otras, excepto en condiciones muy especiales. En las torres de tiro inducido el aire se descarga a través del abanico a alta velocidad, de manera que se proyecta hacia arriba hacia las corrientes naturales del aire que evitan su asentamiento posterior. Sin embargo, las torres de tiro inducido presentan caída de presión en la toma del abanico, lo que aumenta los requerimientos totales de energía. La alta velocidad de descarga de las torres de tiro inducido causa también algo más de arrastre o pérdidas de agua por gotas que son arrastradas por la corriente de aire. (15)

Las torres de tiro inducido a su vez se dividen en diseños a contraflujo o flujo transversal, dependiendo de las direcciones relativas del flujo de agua y aire. Desde el punto de vista termodinámico, la configuración a contraflujo o contracorriente es más eficaz, ya que el agua más fría entra en contacto con el aire más frío, obteniéndose así un potencial máximo de entalpía. Cuanto mayores son los intervalos de enfriamiento y más difícil la diferencia útil de temperaturas, tanto más evidente serán las desventajas del tipo de contraflujo. Por ejemplo, con una razón de L/G de 1, una temperatura ambiente de bulbo húmedo de 25.5 °C y una temperatura del agua a la entrada de 35 °C, la torre de contraflujo requiere una característica de KaV/L de 1.75 para una diferencia de útil de temperaturas de 2.8 °C, mientras que la torre de flujo transversal precisa una característica de 2.25 para lograr la misma diferencia útil de temperaturas. No obstante, si el acercamiento se aumenta a 3.9 °C, los dos tipos de torre tienen más o menos el mismo valor requerido de KaV/L.

El fabricante de torres de flujo transversal puede reducir con eficacia la característica de torre a acercamientos muy bajos incrementando la cantidad de aire para proporcionar una razón de L/G más baja. El aumento en el flujo de aire no se logra necesariamente incrementando la velocidad del mismo, sino sobre todo alargando la torre para aumentar el área de corte transversal para el flujo de aire. Así pues, es obvio que el

llenado para flujos transversales se hace progresivamente más largo en la dirección perpendicular al flujo de aire y más corto en la dirección de éste, hasta que casi pierde su desventaja inherente de la diferencia de potencial. Con todo, al lograr esto se incrementa el consumo de potencial de ventilador.

Por último, la elección económica entre el sistema a contraflujo y el transversal se determina según la eficiencia del relleno, las condiciones de diseño y los costos de construcción de la torre. (25)

A continuación, se muestran los esquemas (fig. 8) de los tipos de torres y en la tabla 1 se hace un análisis comparativo entre los distintos tipos de torres de enfriamiento basado en sus características:

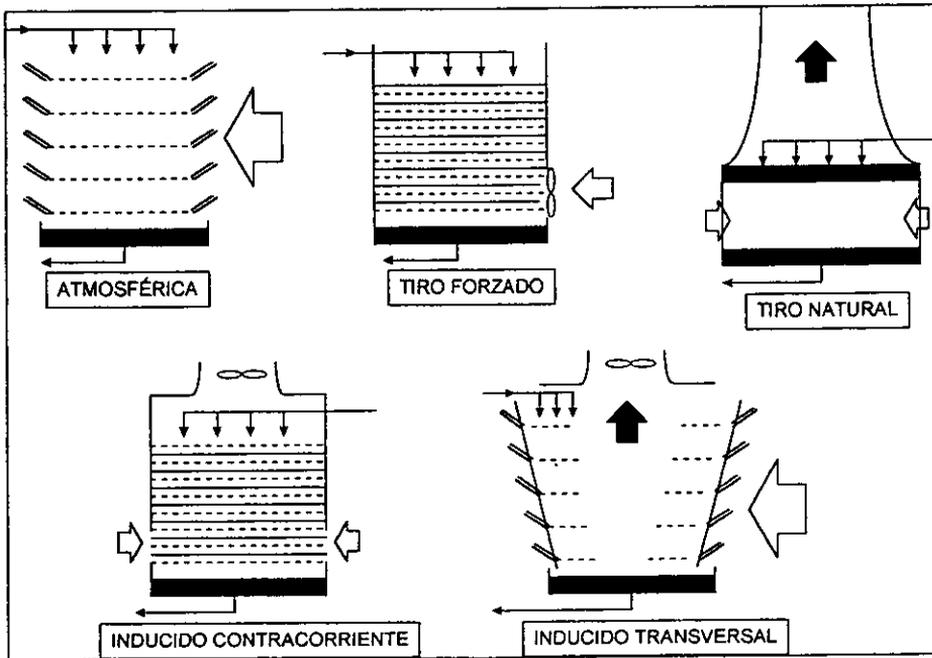


Fig. 8 Esquema de Torres de Enfriamiento

Tabla 1 Comparación entre tipos de torres

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 efecta bastante por las condiciones ambientales del lugar, en comparación con las torres de tiro mecánico.</p> <p>La temperatura del agua fría nunca es cercana a la de bulbo húmedo.</p> <p>No deben existir obstrucciones en su localidad.</p> <p>Para bajas capacidades.</p>
Torre atmosférica con espreas	<p>Pueden cambiar la dirección del viento a base de mamparas en forma de persianas.</p> <p>Requieren de muy poco mantenimiento y revisión preventiva.</p> <p>Se usan cuando se manejan flujos muy pequeños.</p> <p>No consumen energía eléctrica por ventiladores.</p>	<p>Son angostas pero de gran altura.</p> <p>Tienen pérdidas por arrastre de viento.</p> <p>Hay problemas de operación con las espreas.</p> <p>No tienen relleno 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 para agua de recirculación.</p>
Torre hiperbólica o tipo chimenea de tiro natural	<p>Sus pérdidas por arrastre son pequeñas. No tienen equipo mecánico.</p> <p>El cascarón es de concreto, su base es de madera o plástico y se rellena con madera tratada de pino (materia convencional).</p> <p>Apropiadas para grandes cantidades de agua de enfriamiento.</p>	<p>Su inversión inicial es muy alta.</p> <p>No es flexible en su operación, puesto que opera a base de una diferencia de densidades.</p> <p>Sólo tienen máxima eficiencia en invierno o cuando se instalan en lugares fríos o húmedos.</p> <p>Sólo se emplean cuando se tiene un gasto de circulación mayor de 100000 gpm, de lo contrario son antieconómicas.</p> <p>Ocupan una gran extensión de terreno debido al gran diámetro requerido.</p>
Torre de tiro forzado	<p>El ventilador está antes del relleno metiendo aire a la torre, por lo que no se requiere protección en sus partes constituyentes.</p> <p>Usan motores abiertos sin protección contra calor y/o humedad.</p> <p>Requieren de menos área efectiva para enfriamiento, que la torre atmosférica.</p> <p>Presentan menos pérdidas por arrastre de viento, que las de tiro inducido.</p>	<p>Requieren de una altura mayor que las de tiro inducido.</p> <p>Tienen consumo de energía eléctrica en ventiladores y por bombeo de agua.</p> <p>Tienen recirculación de vapores y aire caliente.</p> <p>Presentan canalizaciones del aire en lugar de tener reparto uniforme.</p> <p>Su eficiencia varía irregularmente por las desventajas enunciadas anteriormente.</p>
Torre de tiro inducido con flujo a contracorriente	<p>El ventilador se encuentra después del relleno, sacando el aire caliente hacia arriba, con mínima recirculación.</p> <p>El intercambio calórico es más eficiente que las otras.</p> <p>Área efectiva menor que las de tiro inducido de flujo cruzado.</p>	<p>Su altura es mayor que la de una inducida de tipo cruzado.</p> <p>Sus costos de operación también son mayores que la de una torre de tipo atmosférica.</p> <p>Mayores pérdidas por arrastre que las forzadas.</p> <p>Tienen mayor carga de presión, lo que aumenta el costo en comparación con las forzadas.</p>
Torre de tiro inducido con flujo cruzado	<p>El ventilador está después del relleno, saca el aire caliente de la torre sin recircularlo.</p> <p>Tiene una altura menor que la de contracorriente.</p> <p>Ofrece menor costo por consumo de energía en ventiladores y bombas.</p> <p>Sirven para un gasto mayor de agua de recirculación, con respecto a la torre atmosférica de tiro natural con espreas, hasta 10 000 gpm como máximo.</p> <p>Su acercamiento es mayor.</p>	<p>Requiere de más área de exposición.</p> <p>Tiene más pérdidas por arrastre.</p> <p>Ocupan mayor área que una torre de flujo a contracorriente, aunque sus eficiencias son casi iguales para cualquier capacidad.</p>

### 3.4 FACTORES PARA EL DIMENSIONAMIENTO

El diseño de equipo para llevar a cabo las operaciones de humidificación y deshumidificación dependen de ecuaciones de transferencia de masa y de calor. Los procesos de transferencia y sus proporciones pueden determinarse escribiendo ecuaciones de entalpía y de balance de materiales, así como, combinando éstas ecuaciones en una ecuación de diseño. El desarrollo es exactamente paralelo al empleado para el equipo de transferencia de masa y de transferencia de calor. (10)

#### 3.4.1 MECANISMO DE INTERACCIÓN ENTRE EL AGUA Y EL AIRE

En el caso de una línea de enfriamiento adiabático, donde el agua permanece a temperatura constante de saturación, no existe gradiente de temperatura a través del agua, puesto que no existe flujo de calor sensible en el interior o desde la fase líquida. En la deshumidificación y enfriamiento del agua, sin embargo, donde el agua está cambiando de temperatura, el calor fluye al interior o desde el agua y, por tanto, existe un gradiente de temperatura. Esto introduce una resistencia al flujo del calor en la fase líquida, debido a la película líquida. Por otra parte, es evidente que aquí no existe resistencia a la transferencia de masa en la fase líquida, en ninguno de los casos, puesto que no existe diferencia de concentraciones en el agua pura.

Las condiciones en una torre de enfriamiento en contracorriente dependen de que la temperatura del agua sea más elevada que la temperatura de bulbo seco del aire o que esté entre las temperaturas de bulbo seco y húmedo. Por ejemplo en la parte superior de una torre de enfriamiento, las condiciones están representadas en la fig. 9.

El agua se enfría tanto por evaporación como por la transmisión de calor sensible; los gradientes de humedad y temperatura de la película de aire, disminuyen en dirección de la superficie de separación con el aire, y el gradiente de temperatura  $t' - t_i$  a través del agua dará como resultado una velocidad de transferencia de calor suficientemente alta para transferir estos dos calores.

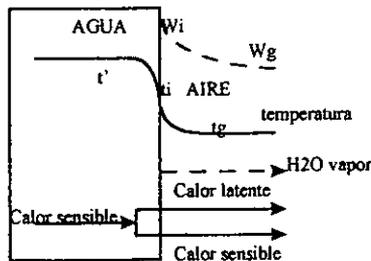


Fig. 9 Condiciones en la parte superior de una torre de enfriamiento.

En la parte inferior de una torre de enfriamiento, donde la temperatura del agua es más elevada que la del termómetro húmedo del aire, pero que puede ser más baja que la del termómetro seco, las condiciones que se indican en la fig. 10 son las que prevalecen.

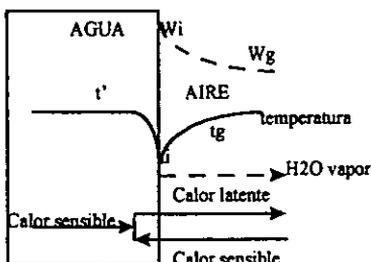


Fig. 10 Condiciones en la parte inferior de una torre de enfriamiento.

En este caso, el agua se enfría; por tanto la interfase debe estar más fría que la masa de agua y el gradiente de temperatura a través del agua es hacia la superficie de separación ( $t_i$  es menor que  $t'$ ). Por otra parte, puesto que el aire se humidifica adiabáticamente, deberá existir un flujo de calor sensible desde la masa de aire a la interfase ( $t_g$  es mayor que  $t_i$ ). La suma del calor que fluye desde la masa de agua a la interfase y desde la masa de aire a la misma superficie, da como resultado una evaporación en la interfase y el vapor resultante se difunde en el aire ( $W_i$  es mayor que  $W_g$ ). Este flujo de vapor de agua transporta desde la interfase como calor latente todo el calor suministrado sobre dicha superficie por ambos lados de ella como calor sensible. El gradiente de temperatura que resulta,  $t' - t_i - t_g$  tiene una forma de V. (1)

### 3.4.2 DISEÑO TERMODINÁMICO

Puesto que en estas operaciones, las razones de cambio y las cantidades tanto de las transferencias de masa como de calor son sustanciales, deben escribirse paralelamente a los balances de entalpía y a las ecuaciones de velocidad para la transferencia de calor, los balances de materiales y las ecuaciones para la velocidad de transferencia de masa. Por tanto, se necesita hacer el análisis de un proceso de transferencia general, pero consideraremos simultáneamente la transferencia tanto de calor como de masa.

La nomenclatura y el dispositivo físico son los mostrados en la fig. 11.

- $L_2$  = proporción de flujo del líquido en el domo de la columna, libras moles/hora.
- $G_1$  = gasto de flujo de la fase gaseosa que entra en la columna, libras moles/hora.
- $G'$  = gasto de flujo de gas seco, libras moles/hora.
- $Y_2$  = relación molar de vapor de agua a gas en el domo de la columna.
- $H_{G1}$  = entalpía de la fase gaseosa que entra en la columna, BTU/libra mol de gas seco.
- $H_{L2}$  = entalpía de la fase líquida que entra en el domo de la columna, BTU/libra mol de líquido.
- $q$  = calor transferido a la columna desde los alrededores, BTU/hora.
- $T_L, T_G$  = temperatura de las fases líquido y gas respectivamente.
- $dz$  = una altura diferencial de la columna empacada.
- $A$  = superficie interfacial.
- $a$  = área interfacial del volumen de la columna.
- $S$  = sección transversal de la torre.

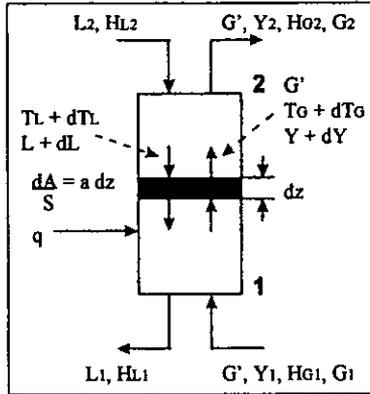


Fig. 11 Nomenclatura para el proceso general de enfriamiento de agua

Sobre esta base, para una torre de sección transversal constante, un balance global de materia proporciona

$$L_1 - L_2 = G_1 - G_2 \dots\dots (1)$$

Un balance de material para el componente condensable, da

$$G' (Y_2 - Y_1) = L_2 - L_1 \dots\dots (2)$$

Y un balance de entalpía proporciona

$$L_2 H_{L2} + G' H_{G1} + q = L_1 H_{L1} + G' H_{G2} \dots\dots (3)$$

Más comúnmente, la columna operará casi adiabáticamente con  $q = 0$ . La aproximación de la operación adiabática será más grande a medida que el diámetro de la columna aumenta. Para esta situación, se escribirán balances similares para la altura diferencial ( $dz$ ). El balance de componente condensable llega a ser

$$G' dY = dL \dots\dots (4)$$

El balance correspondiente para la entalpía es

$$G' dH_G = d(LH_L) \dots\dots (5)$$

Si la proporción de transferencia del vapor de agua entre las fases es pequeña comparada con la corriente del flujo total, entonces, puede utilizarse un valor promedio de  $L$ , y el cambio en entalpía de la fase líquida puede expresarse como si resultara solamente del cambio en temperatura con un calor específico constante. Así que,

$$d(LH_L) = L C_L dT_L \dots\dots (6)$$

en donde

$$L = (L_1 + L_2) / 2$$

Para el cambio de entalpía en la fase gaseosa, la expresión en términos de temperatura es rigurosa si  $C_s$  es constante.

$$\begin{aligned} G' dH_G &= G' d(C_s(T_G - T_0) + \lambda_0 Y) \\ &= G' C_s dT_G + G' \lambda_0 dY \dots\dots (7) \end{aligned}$$

Las ecuaciones de proporción para la transferencia de calor y de masa pueden escribirse también. En ellas, sin embargo, surgen complicaciones debidas al hecho de que el calor se transfiere del total de la fase líquida a la interfase líquido-gas completamente, como resultado del potencial de la temperatura, pero desde la interfase hasta el total de la fase gaseosa, el calor se transfiere mediante dos mecanismos. En el lado de la fase gaseosa de la interfase, el calor se transfiere como resultado de un potencial de temperatura, y el calor latente asociado con la transferencia de masa se transfiere como resultado de una concentración de fuerza directora. Las cantidades de calor transferido mediante estos dos mecanismos se separan en los dos términos del lado derecho de la ecuación 7.

Aplicando estos conceptos, las ecuaciones para los procesos de transferencia de calor indicados en las ec. 6 y 7 pueden escribirse separadamente. Para la transferencia de la fase líquida.

$$L/S C_L dT_L = h_L a (T_L - T_i) dz \dots\dots (8)$$

en donde  $T_i$  = temperatura interfacial

Para la transferencia de calor sensible en la fase gaseosa,

$$G/S C_s dT_G = h_{ya}(T_i - T_G) dz \dots\dots (9)$$

y, para la transferencia de calor latente en la fase gaseosa,

$$G/S \lambda_0 dY = \lambda_0 k_{ya} (Y_i - Y) dz \dots\dots (10)$$

en donde  $Y_i$  = la relación molar de fase gaseosa del vapor de agua al solvente en la interfase.

#### Desarrollo de la ecuación de diseño

Las ecuaciones para el balance de entalpía, y las ecuaciones de proporción mencionadas antes, pueden ser combinadas ahora dando una ecuación de diseño. Estas ecuaciones relacionarán el cambio de temperatura en la fase gaseosa y la humedad molar con las proporciones de calor y de masa transferidas de, o hacia, la fase gaseosa. Así pues, combinando las ec. 7 con las ec. 9 y 10, tenemos:

$$G/S dH_G = h_{ya}(T_i - T_G)dz + \lambda_0 k_{ya}(Y_i - Y)dz \dots\dots (11)$$

para la fase gaseosa. Separando  $k_{ya}$  de la derecha de la ecuación y designando  $h_{ya}/k_{ya}C_s$  como  $r$ , la relación psicrométrica será:

$$G/S dH_G = k_{ya}((C_s r T_i + \lambda_0 Y_i) - (C_s r T_G + \lambda_0 Y)) dz \dots\dots (12)$$

Colocando a  $r$  dentro de esta ecuación para  $h_{ya}/k_{ya} C_s$ , se hace la suposición de que  $a$ , el área por volumen unitario de la torre, es la misma para la transferencia de masa y de calor. Esto será verdad solamente a proporciones altas de líquido, tales que el empaque de la torre esté completamente húmedo. Si  $r$  es igual a 1, como acontece con el sistema aire-agua, bajo condiciones nomales, los términos dentro de los paréntesis en la ecuación 12 son entalpías definidas por la ecuación que determina el calor específico y latente del aire húmedo.

$$G/S dH_G = k_{ya}(H_i - H_G) dz \dots\dots (13)$$

o

$$\int_{H_{G1}}^{H_{G2}} \frac{G' dH_G}{S k_{ya} (H_i - H_G)} = \int_0^Z dz \dots\dots (14)$$

Esta última es una ecuación de diseño, donde la fuerza directora pertinente está expresada como una diferencia de entalpías. La entalpía es una propiedad termodinámica extensiva; y como tal, no puede ser una fuerza directora para ninguna operación de transferencia. Por lo que, el tratamiento matemático que conduce a la ecuación 14 debe examinarse. Primero en los balances de energía, el flujo total por tiempo

unitario es fijo. El término entalpía es entonces entalpía específica, basado en una masa fija de material. Segundo, en la ecuación básica de diseño, la ec. 12 la fuerza directora es una función de T y de Y, las cantidades que podrían suponerse controlan las proporciones de transferencia de masa y calor. Solamente en el caso fortuito de que  $r = 1$ , puede ser sustituida H por estas funciones T y Y. En todos los otros casos, la ecuación 14 puede escribirse como

$$\int SK_y a ((C_{sr} T_i + \lambda o Y_i) - (C_{sr} T_G + \lambda o Y)) = \int dZ \dots\dots (14.a)$$

*Integración de la ec. de diseño*

La integración indicada por la ec. 14 se lleva a cabo generalmente usando valores de G' y de  $k_y a$  promediados para la altura de la columna. Esto introduce un pequeño error, en virtud de la baja concentración del vapor de agua en la corriente gaseosa. Más allá de esto, el conocimiento de la relación entre la entalpía en la fase gaseosa principal y aquella en la interfase gas-líquido, es necesaria. Tal relación puede obtenerse considerando ahora el proceso de transferencia en el lado del líquido de la interfase. Combinando el balance de entalpía (ec. 5), con la proporción de transferencia del líquido (ec. 8), obtenemos

$$G'/S dH_G = h_{L,a} (T_L - T_i) dz \dots\dots (15)$$

y combinando esta ecuación con la 13 tenemos

$$- h_{L,a}/k_y a = (H_G - H_i)/(T_L - T_i) \dots\dots (16) \quad \text{o} \quad - h_L/k_Y = (H_G - H_i)/(T_L - T_i)$$

Esta última se aplica para cualquier punto de un equipo que ponga en contacto aire y agua. A partir de él, la temperatura y la entalpía de la interfase pueden determinarse para cualquier punto en el cual, la temperatura del líquido ( $T_L$ ), la entalpía del gas ( $H_G$ ), y la relación del coeficiente de transferencia de calor para la fase líquida, con el coeficiente para la transferencia de masa en la fase gaseosa, basada en que son conocidas las fuerzas directoras de la relación molar.

Las condiciones de la interfase pueden obtenerse mediante la ec. 16 utilizando el método gráfico. Se hace una gráfica con coordenadas de temperatura para la fase líquida contra la entalpía de la fase gaseosa. En ella, la localización geométrica de los valores  $H_i$  y  $T_i$  para la interfase pueden obtenerse dándose cuenta de que en la interfase, la fase vapor estará saturada en la temperatura de la interfase si suponemos que existe un equilibrio en la frontera de la fase. Partiendo de esta curva de saturación en la carta para la humedad aire-agua, la humedad de saturación molar puede obtenerse para cualquier temperatura deseada. La saturación o la entalpía en la interfase puede calcularse o leerse partiendo de esta carta para la humedad.

Sobre la misma gráfica puede dibujarse una línea de operación de  $H_G$  contra  $T_L$  combinando las ecs. 5 y 6 e integrando. Esta curva representa la trayectoria de las condiciones de la fase completa a medida que el fluido pasa a través de la unidad. Así que,

$$\int_{H_{G1}}^{H_{G2}} G' dH_G = \int_{T_{L1}}^{T_{L2}} L C_L dT_L \dots\dots (17)$$

en donde los límites se refieren nuevamente al fondo y al domo de la columna, integrando,

$$G' (H_{G2} - H_{G1}) = L C_L (T_{L2} - T_{L1}) \dots\dots (18)$$

y reorganizando,

$$(H_{G2} - H_{G1}) / (T_{L2} - T_{L1}) = L C_L / G' \dots\dots (19)$$

Esta ecuación proporciona la pendiente de  $H_G$  contra  $T_L$ , que es la línea de operación, como  $L C_L / G'$ . Para el sistema aire-agua y para la mayor parte de otros sistemas de solución gaseosa diluida, esta relación es constante para una gama moderada de humedad, y la línea recta  $H_G$  contra  $T_L$ , puede determinarse conociendo las proporciones del flujo de la fase líquida y de la fase gas, y las condiciones de ambas

corrientes en un extremo de la corriente; o alternativamente la línea puede localizarse partiendo de las condiciones en ambos extremos de la columna.

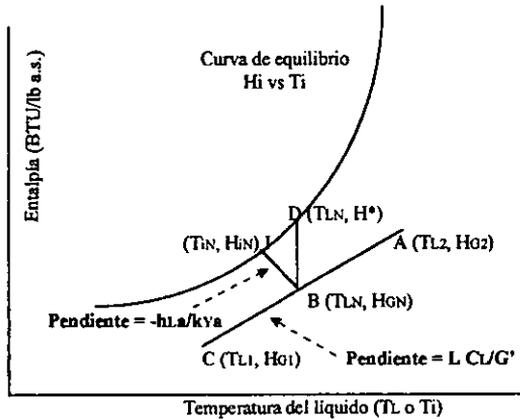


Fig. 12 Representación gráfica de una operación de contacto adiabático gas-líquido

La fig. 12 muestra un diagrama para una operación de humidificación. La curva de equilibrio representada en ella fue obtenida a partir de datos de la carta psicrométrica aire-agua. En esta curva están localizadas todas las condiciones posibles de  $T_i$ ,  $H_i$  a través de la columna. La línea ABC es la línea de operación que contiene todos los valores de  $H_G$  correspondientes a la temperatura del líquido ( $T_L$ ) en toda la columna. Esta línea podría haberse obtenido gracias al conocimiento de las dos condiciones finales, ( $T_{L1}$  y  $H_{G1}$ ), y de ( $T_{L2}$  y  $H_{G2}$ ), o partiendo de cualquiera de estas dos, más la pendiente ( $L C_L/G'$ ). Sobre esta línea, el punto B representa un punto arbitrario dentro de la columna en el cual la temperatura del líquido y la entalpía del gas tienen los valores  $T_{LN}$  y  $H_{GN}$ . Las condiciones de la interfase en este punto pueden encontrarse utilizando la ecuación 16. Por lo que, una línea de unión que empiece en el punto B y que tenga una pendiente igual a  $-h_{1a}/k_{ya}$  interceptará la curva de equilibrio en las condiciones de la interfase que corresponden al punto B. El punto I, representa las condiciones de la interfase designadas por ( $T_{in}$ ,  $H_{in}$ ). En esta forma, las condiciones de la interfase pueden encontrarse correspondiendo cualquier punto entre A y C sobre la línea de operación. Por supuesto, se necesita que sean aplicables los valores de  $k_{ya}$  y  $h_{1a}$  a las condiciones de la columna. Generalmente, estos valores pueden obtenerse experimentalmente.

Gracias a esta construcción, la ec. 14 puede ser ahora integrada gráficamente. La fuerza motriz necesaria en términos de la entalpía, se determina por puntos representativos a través de la columna. Para el punto B de la fig. 12 éste podría ser ( $H_{in} - H_{GN}$ ). Los valores de  $G'/Sk_{ya}(H_i - H_G)$  están graficados contra  $H_G$  y el área bajo la curva determinada entre los límites de  $H_{G1}$  y  $H_{G2}$ , de tal manera que se pueda encontrar la altura de la columna, (Z). (10)

### 3.4.3 INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN EN EL DIMENSIONAMIENTO

Es provechoso el estudio de los efectos del cambio de condiciones de proceso en la altura y sección transversal del aparato o en el costo de su operación. Seis de las consideraciones que afectan el tamaño de la torre se indican en las siguientes figuras. Estas son mejor analizadas mediante el diagrama de entalpía-temperatura, ya que el área entre la línea de saturación y operación es una medida del potencial total. A menor área mayor altura de la torre requerida para cumplir con las condiciones de proceso.

1. *Sequedad del aire a la entrada:* Normalmente solo se hace referencia a la temperatura de bulbo húmedo del aire a la entrada, y no a su temperatura de bulbo seco. En la mayoría de los casos se supone idéntica a la de bulbo húmedo, es decir adiabáticamente saturada. Suponiendo que la temperatura de bulbo húmedo es de 75 °F, su entalpía será 41.7 BTU/lb. Suponga que el aire está a un bulbo seco de 85 °F cuando el bulbo húmedo es de 75 °F. El aire estará no saturado y su entalpía será 39.1 BTU/lb en lugar de 41.7. En la fig. 13.a esto bajará la línea de operación insignificanemente a la región punteada, que es el aumento de potencial. Las fallas en la corrección de la entalpía para el bulbo seco dan resultados que están por el lado seguro y por esta razón es costumbre especificar únicamente el bulbo húmedo.

2. *Aproximación límite:* Las dos líneas de operación en la fig. 13.b tienen el mismo cociente L/G (misma pendiente), e iguales rangos de 35 °F para la eliminación de la misma cantidad de calor del proceso. La línea de operación punteada trata de hacer el mismo enfriamiento que la línea normal y con el mismo aire de entrada, pero entre las temperaturas de 115 y 80 °F en lugar de 120 y 85 °F. El área entre la curva de saturación y la línea de operación se disminuye grandemente en la línea punteada. Similarmente puede desearse obtener agua de 120 a 85 °F con un bulbo húmedo de 80 °F, en lugar de 75 °F. Esto elevará la línea de operación normal verticalmente disminuyendo también el potencial.

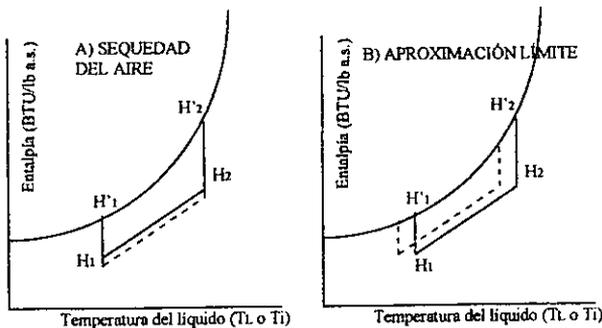


Fig. 13a) Efecto de la sequedad y 13b) Efecto de la aproximación límite

3. *Cambio en el cociente L/G:* Si el área de piso es muy limitada como en el caso de que la torre de enfriamiento se construya en la azotea de un edificio, puede ser

necesario emplear cargas de líquido relativamente grandes sin aumentar la cantidad de aire, ya que 400 pcm es el máximo económico en velocidad del aire. Esto disminuirá la sección transversal de la torre, pero aumenta la pendiente de la línea de operación de la línea normal a la punteada como en la fig. 14a, resultando en una disminución del potencial y una torre más alta. Esta es la observación simple de que si circula menos aire por libra de agua, menor es el enfriamiento.

4. *Localización del rango de operación:* La línea de saturación tiene una curvatura variable. En la fig. 14b se muestra una línea de operación normal con un rango de 105 a 70 °F. Supóngase que se desea diseñar una torre usando el mismo aire de entrada, pero para enfriar agua de 95 a 60 °F. Esto sería imposible con el mismo cociente  $L/G$ , ya que la línea de operación punteada intersectaría la línea de saturación. Obviamente la transferencia de calor se detendría en la intersección  $H^*$ , puesto que el potencial en este punto sería cero. Se requerirá un cociente de  $L/G$  considerablemente menor, lo que a su vez significa que debe circularse más aire para la eliminación del mismo número de BTU.

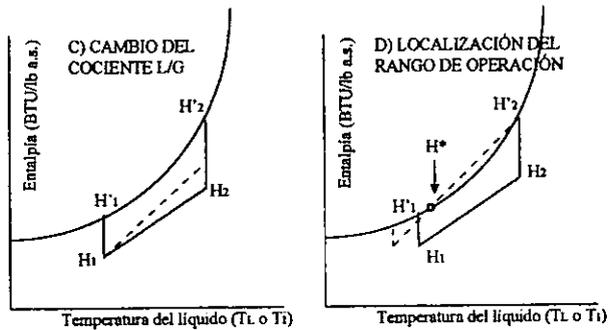


Fig. 14a) Efecto del cambio del cociente y 14b) Efecto de la localización del rango

5. *Empalme:* Uno de los medios de contrarrestar el reducido cociente  $L/G$  del párrafo anterior, puede ser el uso de dos torres. Esto se llama empalme, (staging). El agua en la parte superior de la primera torre está caliente y entra en contacto con aire de entalpía  $H_2$  a lo largo de la línea de operación normal  $H_1$ - $H_2$ , como se muestra en la figura 15a. El agua sale del depósito a la temperatura  $T_3$  y se bombea a la segunda torre, la que también usa aire atmosférico con entalpía  $H_1$ . La segunda torre opera entre  $H_1$  y  $H_3$ . De esta manera ambas líneas de operación pueden tener grandes pendientes sin intersectar la línea de saturación. Los cargos fijos y costos de operación de las torres aumentan el costo del agua considerablemente, pero el agua producida de esta manera deberá considerarse como agua helada, y su costo y rango comparados con el agua refrigerada.

6. *Elevación:* Algunas plantas se localizan a elevaciones considerables. A una presión atmosférica reducida como se ve en la fig. 15b, la línea de saturación es más alta, lo que a su vez aumenta el potencial y reduce el tamaño requerido de la torre si las otras condiciones son constantes. Esto se debe a que la presión parcial del agua es fija, mientras que la presión total ha disminuido. La humedad del aire saturado a elevación considerable es también mayor. (15)

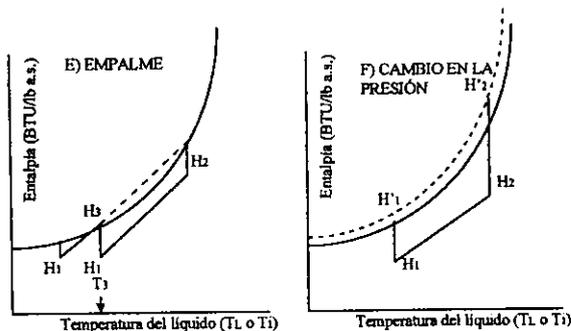


Fig. 15a) Efecto del empalme y 15b) Efecto del cambio de presión

### 3.4.4 ESPECIFICACIONES PARA EL DISEÑO

La mayoría de las torres de enfriamiento son adquiridas dependiendo de los estatutos y las características que se requieren. Los compradores son responsables de brindar las especificaciones con suficiente detalle para definir claramente el desempeño que requieren de su equipo, alguna limitación de espacio, información del agua y aire desde el punto de vista químico, datos de altura del lugar, y consideraciones comerciales.

Los siguientes datos deben ser considerados para las especificaciones necesarias de dar antes de la compra, para llevar a cabo el proyecto:

- Descripción del proceso al que se servirá
- Galones por minuto que serán enfriados
- Temperatura caliente del agua
- Temperatura fría del agua
- Temperatura de bulbo húmedo para el diseño
- Limitantes de bombeo
- Análisis de agua y tratamiento
- Condiciones del aire en el sitio (velocidad y dirección)
- Condiciones del suelo
- Requerimientos de diseño sísmicos
- Código de construcción
- Elevación de la planta
- Materiales y maquinaria predilecta
- Material de ventilador, tipo y número de hélices o aspas
- Características de motores y voltaje
- Datos de evaluación, limitantes de potencia eléctrica
- Plano de vista superior de la planta, situando la locación de la torre, material de contacto y acceso
- Otros equipos o torres que interfieran
- Facilidades que pueda dar el comprador para la instalación del equipo

- Día de instalación
  - Condiciones comerciales
- (21)

### 3.4.5 AUMENTO DE CAPACIDAD EN TORRES ANTIGUAS

Cuando se excede de la carga de la torre de enfriamiento, se puede instalar una segunda unidad, instalar una unidad más grande o aumentar la capacidad de la torre. El tercer método puede dar más capacidad y eficiencia sin requerir equipo nuevo y costoso.

Las variables a considerar antes de aumentar la capacidad de la torre son las siguientes:

Tabla 2 Variables a considerar para el aumento de la capacidad de las torres

Tipo de torre	Tiro natural o mecánico Tiro forzado o inducido Contracorriente o transversal
Relleno	Abierto, grueso, para salpicada o delgado y denso Salpicado o película Plástico o madera Panal o redistribución, espaciado
Sistema de distribución de agua	Cerrado a presión o charola abierta Aspersión o canal o saetín abierto Aspersión ascendente a alta presión Aspersión descendente a baja presión
Celdas para ventiladores	Celda sencilla o múltiples Un ventilador grande por celda o celdas con ventiladores múltiples
Eliminadores de brisado	Una pasada, dos pasadas o tres pasadas Angulo de aspas de 45 o de 60 ° Plástico o madera o metal Panal o tabillas
Rejillas	Descentrados o al ras Pared recta o pared en pendiente Ajustables o fijas Poco espaciadas o muy espaciadas
Chimenea del ventilador	Convencional o tipo venturi
Divisiones (tabiques)	Usarlas o no usarlas

Los ahorros pueden ser grandes, cuando se considera que la capacidad se suele aumentar sin agrandar el tamaño físico de la unidad en uso, ni el espacio, ni la tubería, ni hacer modificaciones eléctricas en el área de la planta. Las capacidades se han podido aumentar en más del 60 %.

Los usuarios de torres se preocupan porque muchas unidades en servicio en plantas generadoras, de proceso o sistemas de acondicionamiento de aire han tenido que atender cargas más grandes de enfriamiento conforme se amplían las plantas. Muchas veces las Torres de enfriamiento no han podido satisfacer las condiciones de operación de la planta ni siquiera desde el arranque inicial. Esto no es sorprendente cuando se tiene en cuenta que el tipo de equipo, a menudo se selecciona e instala sólo sobre la base de un bajo costo inicial. Como es de esperarse, una unidad seleccionada en esa forma es muy fácil que no sea la más eficiente, ni siquiera la más práctica para el trabajo.

**Aumento de la capacidad.** Quizá más de la mitad de las torres ensambladas en el sitio - y algunas de las prefabricadas- se pueden mejorar hasta cierto grado. Esto se debe en gran parte a que se puede incorporar nueva tecnología, componentes más eficientes y nuevos materiales, en un conjunto para trabajo más pesado, más resistente, y por tanto, más confiable. Antes de tratar de mejorar la capacidad, se debe hacer un estudio completo de los requisitos de enfriamiento. Luego, se necesitan inspecciones y análisis cuidadosos de los componentes existentes en la torre. Se pueden combinar con respecto al tamaño de la torre existente, caída de presión, características de flujo de aire, pérdidas por brisado, curva de comportamiento de los ventiladores, selección y factor de servicio del reductor de engranes y los problemas de instalación.

Los estudios y recomendaciones los debe hacer un especialista en torres de enfriamiento. Una vez que los resultados se llevan a concesión práctica, se pueden lograr ahorros muy considerables, y a veces se evita la instalación de una nueva unidad. Ahora se verán los cursos alternos de acción cuando se planea aumentar la capacidad. Si se "barajan" un poco las variables, pueden variar los resultados. La torre de tiro mecánico a contracorriente se presta con mayor facilidad a los aumentos de capacidad que las de circulación transversal. La razón es que, al modificar los componentes de la torre de contracorriente, se tiene mayores rendimientos que si se hacen ajustes en una unidad de flujo transverso. Otro punto a considerar es que, en muchos de los casos, las condiciones de operación de la planta pueden cambiar con los años. Por ejemplo el aumento en las cargas suele requerir la instalación de una nueva torre de enfriamiento. Ahora veamos con detalle cada una de las 7 variables y específicamente lo que se puede hacer:

1. *Configuración del relleno:* Los rellenos o empaques de las torres de enfriamiento han mejorado mucho con los años. Cuando se hizo la instalación inicial de las torres antiguas, sus fabricantes construían unidades para trabajar de acuerdo con condiciones específicas, mediante el uso del tipo de relleno que consideraban más económico para producirlo en sus fábricas. Por supuesto, la construcción era de acuerdo con los datos de comportamiento y pruebas disponibles en ese momento. Desde entonces, han ocurrido grandes mejoras en la construcción y materiales, y hay más datos de pruebas de campo disponibles para diferentes configuraciones de relleno. Por ejemplo, la mayoría de las torres de enfriamiento antiguas de contracorriente tienen instalado relleno del tipo de salpicadura. Las hileras de las plataformas de salpicado suelen estar espaciadas 2 pies por torre. La teoría es romper el agua y formar gotas cuando baja en cascada por la torre. La superficie de cada gota se aumenta con la interrupción continua de su caída mediante las plataformas de salpicado, con lo cual se expone una nueva superficie para evaporación en cada nueva gota.

La evaluación de la disposición del relleno y su cantidad, por un especialista en torres de enfriamiento, establecerá si se puede agregar más relleno para dar capacidad adicional. En este caso, se instalan empaques para superficie de película o empaques especiales que *combinan* superficie de película y superficie adicional de salpicado. Como resultado, la cantidad de exposición puede ser lo bastante alta para permitir la reducción del aire requerido. Por tanto, se puede agregar empaque para películas sin aumentar los requisitos de caballaje en los ventiladores.

El porcentaje de mejora de la capacidad como resultado de la adición de relleno del tipo de superficie para película, depende de la severidad del servicio, el nivel de comportamiento y la altura de la torre. Por ejemplo, al agregar cantidades considerables de empaque para película en una torre muy baja sometida a servicio severo, se puede obtener una mezcla de 40 a 50% aumento en la capacidad. Por otra parte, si se utiliza una torre muy alta para trabajo ligero, puede haber un efecto adverso en el comportamiento cuando se instala empaque del tipo película. En ese caso, los pcm de aire son más críticos para el comportamiento que el propio nivel de comportamiento. Ahora bien, para un nivel razonable de comportamiento, se puede lograr un aumento de 20% en la capacidad de una torre del tipo promedio. El aumento de 20% en la capacidad se puede equiparar con un aumento de 20% en los gpm al mismo nivel de temperatura o, más o menos, con una reducción de 20% en el acercamiento a la temperatura de bulbo húmedo con los mismo volúmenes de flujo y carga de calor.

2. *Sistema de distribución:* Algunas torres de enfriamiento antiguas tienen sistemas de distribución de saetín o canal abierto. Este tipo de sistema, en especial en instalaciones con celdas múltiples, es difícil de equilibrar. El problema se agrava cuando las cargas de agua cambian durante el proceso. La inundación y los puntos secos también menoscaban la eficiencia de la torre. Algunas veces, la alimentación por gravedad tiene obstrucciones en los tubos bajantes. Como saben, cada tubo bajante tiene una cubierta de difusión o placa de salpicadura debajo de él. Si están rotas o desalineadas, se reduce el volumen efectivo de enfriamiento. En este caso, el cambio a un sistema de distribución del tipo de aspersión con presión positiva, reduce los problemas de equilibrio. Un sistema moderno de aspersión lateral con cabezales asegura buena distribución del agua sobre toda el área de relleno y permite el paso de más aire por esta área de la torre.

También en este caso, un análisis de la operación de la torre revela posibles puntos para mejora. La aspersión de agua quizá no cubra por completo las capas superiores de relleno. En ocasiones, el agua baja hasta la mitad del relleno antes de que esté distribuida con uniformidad en todo el interior de la torre. La respuesta obvia a este problema es modificar las boquillas a fin de alterar o corregir el patrón de aspersión. Esta simple mejora, con frecuencia aumenta la capacidad de una torre existente. Algunas torres antiguas, de alta presión, con aspersión hacia arriba, se han convertido a unidades de baja presión con aspersión descendente, con buenos resultados. Este proceso incluye elevar el nivel del sistema de distribución, lo cual permite instalar hileras adicionales de plataformas de relleno. Aunque esta modificación puede aumentar la capacidad hasta en 12 a 15 %, también habrá una pequeña disminución en la carga de bombeo.

3. *Eliminadores de brisado:* Muchas torres de enfriamiento antiguas tienen eliminadores de brisado extragruesos. Otros, tienen aspas eliminadoras muy cercanas entre sí en ángulos de 45°. Se han encontrado que ambos sistemas son muy conservadores para algunos requisitos. Una razón es que estas construcciones producen una restricción al flujo de aire. Al reemplazarlas con aspas eliminadoras de brisado, escalonadas en ángulo de 60° en vez de 45°, se permite pasar más aire por la torre y se logra capacidad adicional. Las modificaciones a los eliminadores de brisado se suelen hacer cuando hay que reemplazarlos. No obstante, una torre de enfriamiento a contracorriente mejorada con este simple cambio, puede aumentar su capacidad en un 4

a 5 %. En una torre con acercamiento de 10 °F, esto equivale a que el agua estará casi 0.5 °F más fría.

En algunos casos, se puede instalar un grupo adicional de eliminadores de brisado a fin de permitir el cambio de ventilador o del reductor para succionar los máximos pcm de aire sin ocasionar problemas de pérdidas por brisado. Las mejoras en la construcción de las rejillas de entrada también pueden, a veces aumentar la capacidad de la torre. Las antiguas rejillas, muy cercanas a 45° producen mucha restricción. Si se utilizan rejillas descentradas con un panel escurridor de retorno, penetra más cantidad de aire y con más facilidad. Se logran ventajas adicionales durante la operación en tiempo muy frío, pues minimizan los problemas de pérdidas por salpicaduras cuando los ventiladores funcionan por ciclos en condiciones de cargas ligeras o de carga parcial.

**4. Equipo mecánico:** Si se espera capacidad adicional con una torre de enfriamiento existente, por lo general se necesita más movimiento de aire. Pero, muchas instalaciones ya funcionan a su máximo caballaje nominal. En tales casos, hay que tomar lecturas en los cables del motor para determinar si el motor ya trabaja cerca de su amperaje de plena carga o del especificado en la placa de datos. Si hay lugar para carga adicional, con frecuencia se puede aumentar el paso de las aspas del ventilador para mover más pcm de aire. Primero, obtenga las curvas del ventilador con el fabricante de la torre para ver qué mejora se puede esperar en los pcm con un cambio de ángulo de paso. Dado que el caballaje varía al cubo de los pcm, no hay mucho que se pueda hacer sin un motor más grande.

A la inversa, en un aumento de volumen de aire varía según la raíz cúbica del aumento de caballaje. Pero, un aumento considerable en el caballaje quizá solo refleje un aumento relativo pequeño en la capacidad, como se resume en la tabla siguiente:

Tabla 3 Cambio en la capacidad a partir del caballaje

Cambio en el motor, HP	Cambio en HP, %	Cambio aproximado en la capacidad, %
25 a 30	20	6
30 a 40	33 1/3	10
40 a 50	25	7.5
50 a 60	20	6
60 a 75	25	7.5
75 a 100	33 1/3	10

Si se instala la unidad con el ángulo de paso del ventilador al máximo nivel de eficiencia, puede ser aconsejable un cambio en la velocidad del motor, con un cambio en la reducción de engranes. Por tanto, usted puede dar una ligera ayuda con el factor de servicio del reductor y es cuestión de cambiar sólo la cremallera y el pistón. Una modificación mayor incluye aumentar el tamaño del ventilador. Pero, rara vez se hace porque el aumento de los pcm con mayor velocidad del ventilador, influye en los límites de la torre desde otro punto de vista: una velocidad muy alta en la torre y eliminadores de brisado puede ocasionar problemas molestos por exceso de arrastre.

Digamos que se puede lograr plena efectividad con el motor más grande y aumento en el ángulo de paso o las r.p.m. del ventilador. En este caso, una mejora hasta del 10% representará buenos ahorros.

5. *Chimeneas para el ventilador:* Es poco lo que se diga de la importancia del diseño de la chimenea del ventilador para máximo rendimiento. No resulta práctico cambiar o aumentar el tamaño del motor en muchas unidades existentes. Una razón es que cualquier cambio en el servicio eléctrico para la torre puede tener un costo irrazonable. Aquí puede estar la respuesta en la instalación de una chimenea parabólica, tipo venturi para el ventilador porque, con esta chimenea del tipo de recuperación de velocidad, el ventilador puede entregar 6 a 7 % más aire a la torre con el mismo motor. Y 7% más aire, significa 7% más capacidad de la torre.

6. *Divisiones:* Algunas torres grandes, de celdas múltiples, se construyeron para trabajar solo con la carga proyectada. Algunas de ellas tienen los ventiladores por celda y no hay división en la cámara distribuidora. Si se para un ventilador por reparaciones o si se hace trabajar la torre con un solo ventilador por celda por alguna razón, la característica de tiro mecánico quedaría prácticamente anulada. Esto se debe a que la celda en operación tomaría la mayor parte de su aire por la abertura para el ventilador adyacente y se derivará del área de relleno, lo cual es un desperdicio.

7. *Eficiencia con operación y mantenimiento correctos:* La torre de enfriamiento será el foco de constante atención por los crecientes esfuerzos en pro del uso eficiente y conservación del agua. El personal de operación debe estudiar el manual de operación y mantenimiento de la torre para tener la certeza de que se logra la máxima eficiencia del equipo. Aunque la torre se fabrica con materiales durables, es probable que esté sometida a las condiciones más extremas de operación de cualquier equipo en uso actual.

Una consulta con el especialista en torres de enfriamiento le permitirá la evaluación correcta de los componentes de la torre. El sistema de distribución (aire-agua) es la clave de la eficiencia de la torre. Este estudio de un especialista puede ser esa pequeña diferencia necesaria para mantener el nivel de capacidad proyectado. Los dividendos obtenidos con este procedimiento, justificarán con creces el poco tiempo relativo invertido.

### 3.4.6 CONSIDERACIONES PARA EL SITIO DE INSTALACIÓN

Las plantas químicas son raramente capaces de crear una locación aislada para la operación de las torres de enfriamiento. Idealmente, las torres de enfriamiento deben no interferir con otro equipo de la planta. Las torres de enfriamiento son un equipo respirador de aire, e idealmente deben tener el menor número de restricciones de aire, incluyendo un aire lo más limpio posible. Los objetos que disminuyen la velocidad del aire y que están cerca de la torre, pueden provocar recirculación. También los objetos que mandan el aire hacia arriba o hacia abajo de la torre pueden provocarla. Existen algunas reglas, que aconsejadas apropiadamente por un ingeniero en aplicaciones de torres pueden dar muy buenos resultados. El equipo que descarga aire caliente o húmedo (incluyendo otras torres de enfriamiento) deben no ser colocadas vientos abajo del equipo en estudio.

Como regla general, la torre debe estar orientada donde prevalezca el aire en forma longitudinal. Con vientos cruzados, la recirculación es abatida por el uso de celdas largas y generando ventilación entre las pilas de los abanicos.

El brisado es aquella porción de agua que se sale de la torre por acción de los ventiladores. En las modernas torres de enfriamiento se tienen muy pequeñas tasas de brisado: 0.015% es estándar, 0.05% es fácilmente obtenible, y 0.005% es posible utilizando un reductor de flujo de aire y eliminadores de brisado especiales. El valor de cero en la perdida por brisado es, por supuesto, imposible.

*Niebla de vapor.* La descarga de calor de las torres de enfriamiento en la forma de vapor hacia la atmósfera, es la formadora de niebla de vapor por la condensación del vapor de agua con aire más frío. Esto se genera en torres de multiventiladores en las épocas de frío. La torre debe ser localizada en un sitio donde no interfiera con los elementos, si es que la niebla de vapor baja con los vientos. (21)

*Sonido (ruido).* El sonido es la energía transmitida a la atmósfera en la forma de ondas de presión sonora. La medida de estas ondas de presión o niveles de presión sonora está expresada en términos de decibeles (dB). Otra característica del sonido es la frecuencia expresada en Hertz (Hz, ciclos por segundo). El carácter del sonido es analizado en función de estos dos términos. Para evaluar el sonido adecuadamente el rango es arbitrario, éste está dividido en 8 bandas que tienen frecuencias medias de 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 y 8000 Hz. Los estándares de presión sonora en estas bandas y los instrumentos para cuantificar los niveles de presión sonora, nos dan las herramientas para identificar y determinar el nivel de sonido individual o colectivo.

El ruido es un sonido, éste es intangible y relativo. Un nivel de presión sonora que puede ser aceptable para alguna persona puede ser irritante para otra. Es necesario para el ingeniero tener conocimiento del problema potencial y analizar el sitio propuesto en la planta para determinar si es aceptable el nivel de presión sonora en esa sección.

La locación y orientación de la torre de enfriamiento debe ser considerada primero. Colocar las torres fuera de posibles zonas de queja es usualmente la solución menos cara. Se deben revisar los catálogos de los distintos proveedores donde se conoce los dB que produce el sistema mecánico a diferentes potencias o tamaños de estos, teniendo estos datos se debe hacer una proyección del lugar donde se localizará el equipo y así estimar si el personal en general deberá utilizar equipo protector de oídos. A continuación se muestra una tabla que indica datos de niveles de presión típicos en torres de enfriamiento mecánicas a flujo cruzado:

Tabla 4 Niveles de presión sonora en torres de flujo cruzado

	Banda Hz									
	dBA	dBC	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
50 ft <sup>2</sup> de superficie de brisado	72	83	77	76	75	68	65	63	62	63
50 ft <sup>2</sup> de superficie de empaque	59	73	66	63	62	57	53	46	35	31

(McKetta)

### 3.4.7 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

**Estructura.** La estructura de las torres de enfriamiento es construida de madera, acero, o concreto dependiendo del diseño de la torre y su aplicación. Para aplicaciones de proceso, química y petroquímica, la madera tratada es la más común. La madera común hoy en día es la proveniente de la región oeste de Douglas, debido a que es económica y fuerte. La madera de California (Redwood) es la más deseada por sus características de durabilidad.

La madera tratada de abeto es también utilizada extensamente en la construcción de las torres de enfriamiento. Las aplicaciones principales son para el estuche del ventilador y para el basín de agua en el piso. La madera tratada para la estructura ofrece muchos años de garantía contra problemas de manera gratuita con condiciones específicas de la química del agua. Si la química del agua es un problema capaz de maximizarse y algunas veces es intolerable, la mayoría de las plantas químicas con torres de enfriamiento comienzan con equipo premium el cual es más resistente como el acero inoxidable o bronce-silicon.

Las torres de enfriamiento modernas utilizan un conector estructural de fibra anticorrosiva de vidrio o plástico como material de estructura. Esto mantiene una mínima cantidad de fierro adyacente a la estructura de madera.

**Relleno.** El relleno de las torres de enfriamiento es muy variado en su selección. La madera tratada continúa dominando con una combinación de propiedades tales como resistencia química, fuerza estructural, y costo. El cloruro de polivinil es utilizado extensivamente y ofrece una excelente resistencia química. Su propiedades retardantes de formación de fuego son superiores que las de la madera, pero las propiedades mecánicas y las limitaciones 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 en los rellenos de las torres de enfriamiento, y es utilizado en climas donde raramente hay heladas.

**Equipo mecánico.** Este es el corazón de la torre de enfriamiento. Debe ser diseñada rudamente para la operación continua bajo condiciones corrosivas. Debe ser diseñada y desarrollada específicamente para uso en torres de enfriamiento. Algunos fabricantes de torres de enfriamiento diseñan, prueban y manufacturan sus propios equipos mecánicos, provocando que haya una excelente responsabilidad en todos los componentes de la torre (excepto los motores).

**Ventiladores o abanicos.** Los tipos de ventiladores adecuados son utilizados en procesos de torres de enfriamiento debido a que pueden entregar altos volúmenes de aire contra bajas presiones estáticas con una alta eficiencia (80% o más en tamaños grandes). Las aleaciones de aluminio y fibra de vidrio dominan ambas los diseños originales y también los materiales para construcción de refacciones. Las consideraciones especiales de trabajo permiten una construcción adecuada de los ventiladores que trabajarán bajo condiciones corrosivas. En tamaños por arriba de

aproximadamente 20 pies, el diseño desde el punto de vista de peso se vuelve crítico, y las construcciones de plástico liviano son esenciales. Las fibras de vidrio o las termoplásticas son un estándar en los abanicos de cubierta. Para soldar la maquinaria es usualmente utilizado el acero inoxidable pero materiales como el níquel, cromo y cobre pueden ser sustituidas.

**Reductores de velocidad.** Los requerimientos son vigor y alta vida. Los reductores de velocidad deben ser construidos rudamente para el servicio continuo en un medio severo, como es el lugar donde se localizan. Muchos materiales de engranaje son utilizados. El tiempo de servicio de la caja de engranes está relacionada directamente con la durabilidad superficial de los engranes.

La lubricación es vital para alargar, los servicios de garantía por problemas. El sistema deberá ser un diseño simple y capaz de proporcionar una operación en reversa (para tiempos fríos). El nivel de aceite deberá cubrir los engranes para la protección contra corrosión en los tiempos de paro de equipo. Deberá tener una mirilla adecuada afuera del cilindro del ventilador para provocar un buen mantenimiento. Por supuesto, los lubricantes y los procedimientos de lubricación deberán ser seguidos cuidadosamente con las recomendaciones del proveedor. (21)

### 3.5 PROGRAMA DE OPERACIÓN E INSPECCIÓN

Las torres de enfriamiento que se construyen en campo están diseñadas para prestar un servicio duradero y libre de complicaciones si se instalan, se utilizan y mantienen correctamente. Sin embargo, las torres de enfriamiento con frecuencia se instalan en lugares alejados de la maquinaria a la que prestan servicio y, como consecuencia, a menudo no reciben la atención diaria del personal de operación y mantenimiento. Por este motivo es importante que el operario de la torre de enfriamiento establezca y mantenga un programa periódico de inspección y mantenimiento.

Las condiciones atmosféricas, la calidad del agua y la clase de instalación pueden variar mucho, por lo que no es posible establecer, paso a paso, un procedimiento de operación y mantenimiento que sea aplicable a todos los sistemas de torres de enfriamiento. Es más bien el usuario de la torre de enfriamiento quién debe desarrollar un programa específico para cada instalación que se adapte a las circunstancias de su emplazamiento. A continuación se describe un manual como guía para el establecimiento de un programa de este tipo. Por lo general los proveedores de torres de enfriamiento no suministran (a no ser que se incluya en el contrato) los componentes nombrados a continuación; por lo tanto, la instalación, la garantía y las instrucciones de funcionamiento y mantenimiento de los mismos son responsabilidad de terceros:

- Todas las tuberías del exterior de la torre.
- Todos los cables eléctricos y dispositivos de arranque del motor, y los correspondientes equipos de control.
- Todas las bombas de recirculación de agua y los correspondientes equipos.

- Todo el material de cimentación, cuando la pileta de recolección es suministrada por otros, incluyendo los equipos correspondientes, tales como el sumidero, los filtros, el rebalse, el desagüe, el sistema de reposición y los pilares de hormigón con pernos de anclaje.

Los servicios necesarios para el mantenimiento de la torre de enfriamiento dependen principalmente de la calidad del aire y del agua en el entorno de la instalación. Las condiciones atmosféricas más perjudiciales son las que suponen cantidades anormales de humo industrial, gases químicos, sal o polvo denso. Estas impurezas transportadas por el aire se introducen en la torre de enfriamiento y son absorbidas por el agua de circulación, formando una solución corrosiva. Además el agua adquiere propiedades perjudiciales al evaporarse el agua, dejando tras sí los materiales sólidos que originalmente se encontraban disueltos en el agua de reposición. Estos materiales sólidos pueden ser alcalinos o ácidos y, por encontrarse concentrados en el agua en circulación, pueden dar lugar a la formación de depósitos o acelerar la corrosión. La cantidad de impurezas en el aire y en el agua determina la frecuencia de la mayoría de los trabajos de mantenimiento y también determina la medida en que se debe tratar el agua, que puede variar desde una simple purga hasta un sofisticado sistema de tratamiento.

**Arranque inicial y funcionamiento.** Antes del arranque inicial o después de un período de inactividad, se realizarán detenidamente las siguientes comprobaciones de los equipos:

1. Rotación libre del ventilador. No debe haber puntos de fricción, agarrotamientos u otros defectos de funcionamiento que pudieran causar la sobrecarga del ventilador. Debe ser fácil hacer girar el sistema del ventilador con la mano.
2. Sentido correcto de rotación. El ventilador debe girar en el sentido de la agujas del reloj, visto desde arriba.
3. Angulo de paso del aspa del ventilador. Todas las aspas del ventilador deberán estar en el mismo ángulo con respecto a la horizontal. El ángulo de paso apropiado varía dependiendo del modelo de la torre; el paso apropiado puede verificarse midiendo con un amperímetro el consumo eléctrico del motor.
4. Pernos de sujeción del ventilador. Todos los pernos que sujetan componentes del conjunto del ventilador deberán estar lo suficientemente apretados como para impedir el resbalamiento.
5. Lubricación. La caja reductora y el motor del ventilador deben estar lubricados según las instrucciones del fabricante.
6. Pernos de sujeción. Los pernos que sujetan la caja reductora y el motor del ventilador al soporte de los equipos mecánicos y los que sujetan el soporte de la torre deberán estar lo suficientemente apretados como para asegurar el posicionamiento correcto de los componentes.
7. Eje conductor. La alineación deberá ser lo suficientemente exacta como para permitir el funcionamiento sin agarrotamientos o vibración excesiva. Asegurarse que los protectores de los acoplamientos estén en su sitio y firmemente sujetos.
8. Sistema de distribución. Eliminar todos los objetos extraños que puedan impedir el flujo de agua. Cambiar las boquillas deterioradas y reponer las que faltan, tomando las medidas necesarias para prevenir pérdidas de agua en el sistema de distribución.
9. Tramo de intercambio térmico y eliminadores de gotas. Quitar todo material extraño que pueda impedir el flujo de aire o agua.

10. Pileta de recolección. Vaciar la pileta de recolección (con los filtros del sumidero en su sitio), lavándolo con agua a presión para eliminar los residuos acumulados. Asegurarse que todos los componentes necesarios, tales como los filtros del sumidero, el dispositivo antitorbellino, etc. estén instalados correctamente.
11. Sistema de reposición. Ajustar el dispositivo de control del nivel de agua para mantener el nivel de agua correcto para el funcionamiento de la pileta de recolección.

**Para operar la torre;**

1. Llenar la pileta de recolección con agua fresca hasta el nivel de rebalse.
- Durante el arranque inicial o antes de volver a arrancar la torre tras haber vaciado la pileta completamente: el tratamiento inicial de biocida deberá aplicarse en este momento.
- Tras un período de inactividad durante el cual la pileta no se ha vaciado completamente: se recomienda administrar un tratamiento de choque inicial de los biocidas apropiados en el momento del re arranque, con el fin de eliminar los agentes contaminantes biológicos acumulados.
2. Poner todas las válvulas de circulación del agua del sistema conectado en posición abierta o cerrada, según proceda.
3. Arrancar las bombas de circulación de agua. Hacer funcionar la torre sin carga térmica, si fuera posible, hasta que se hayan comprobado los demás requisitos de funcionamiento.
4. Comprobar la cantidad de agua que circula en cada celda. Ajustar el caudal según sea necesario para obtener una distribución equilibrada.
5. Comprobar de nuevo el sistema de agua de reposición para asegurarse que se mantiene el nivel correcto de agua durante el funcionamiento.
6. Después de comprobar que todo el personal esté alejado, arrancar el motor del ventilador.
7. Observar el funcionamiento de los equipos mecánicos. Deberá prestarse especial atención al ruido excesivo, las vibraciones, o el recalentamiento del motor del ventilador o la caja reductora (las cajas reductoras a veces hacen ruido cuando se arrancan, disminuyéndose el ruido una vez que los piñones encajen bien).
8. Cuando se utiliza un ciclaje del motor del ventilador para el control de la capacidad, se deberán ajustar los puntos de regulado de tal forma que el motor no arranque más de 3 veces cada hora.
9. Las unidades dotadas de motores de ventilador de dos velocidades deberán tener una demora mínima de 30 segundos para el cambio de velocidades. El cambio brusco de velocidades somete los componentes motores a un esfuerzo excesivo.

**Parada rutinaria y arranque.** Cuando la torre de enfriamiento va a estar parada durante un período prolongado de tiempo (30 días o más), se deberán realizar las siguientes operaciones:

1. Vaciar la pileta de recolección de agua fría y todas las tuberías asociadas que puedan quedar expuestas a temperaturas que llevarían a la congelación. Dejar abierto el sumidero de tal forma que la lluvia y el agua de nieve que se derrite salga de la torre.
2. Para evitar la entrada de suciedad y objetos extraños, tapan la apertura de descarga del ventilador; en las torres de enfriamiento de flujo transversal se tapan también los tanques de distribución.

3. En periodos de inactividad inferiores a 6 meses, hacer funcionar los equipos mecánicos periódicamente para prevenir la condensación y la corrosión en el motor y la caja reductora. Para obtener los mejores resultados, dejar enfriar la caja reductora durante unas 4 horas después de la parada, arrancar el ventilador y dejarlo funcionar durante unos 5 minutos, con lo que los componentes internos se recubrirán de aceite frío. Posteriormente, hacer funcionar el ventilador unos 5 minutos a la semana durante el periodo inactivo, para mantener la película de aceite en los componentes internos.
4. Para un periodo inactivo de 6 meses o más, llenar la caja reductora completamente de aceite con antioxidantes. *No hacer funcionar la caja reductora cuando esté completamente llena de aceite, ya que se dañará.*
5. Cerrar la válvula de cierre de la tubería de agua de reposición e instalar una pequeña resistencia eléctrica en todas las tuberías de agua de reposición que queden al descubierto, o vaciarlas.
6. Fijar el dispositivo de arranque del motor del ventilador en la posición "OFF".

**Funcionamiento a bajas temperaturas.** Las torres de enfriamiento pueden operarse a temperaturas de bulbo húmedo por debajo del punto de congelación, siempre que el usuario de la torre establezca normas de funcionamiento adecuadas. Entre las precauciones a tomar para un funcionamiento satisfactorio se incluyen:

1. Proteger el agua de la pileta de recolección contra la congelación cuando la torre esté detenida.
2. Impedir la formación de hielo durante el funcionamiento de la torre.

Durante los periodos de inactividad se protegerá la pileta de recolección contra la congelación, ya que la formación de hielo en el mismo puede provocar daños graves. Se pueden utilizar calentadores eléctricos de inmersión o serpentines de vapor controlados por un termostato. Además, todas las tuberías de reposición y tuberías de agua que no queden vacías durante el periodo de inactividad se calentarán con vapor o resistencia eléctrica y se aislarán.

Cuando se trabaja a temperaturas inferiores ambiente a las de la congelación, la temperatura del agua de salida de la torre puede favorecer la formación de hielo. Pueden formarse hielo en las zonas húmedas que están en contacto directo con el aire de entrada. Para ayudar a evitar la formación de hielo, se recomienda que la temperatura del agua de salida se mantenga por encima de los 60 °F (15.5 °C) cuando la temperatura ambiente registrada por un termómetro de bulbo húmedo sea inferior al punto de congelación, y a 70 °F (21.1 °C) si la temperatura ambiente de bulbo húmedo es inferior a -10 °F. Si la temperatura nominal del agua de salida es inferior a 60 °F de deberán tomar precauciones específicas.

Para aumentar la temperatura del agua de salida se aumentará la carga térmica por celda y/o se reducirá la capacidad de enfriamiento de la torre. La capacidad de la torre de enfriamiento puede reducirse mediante: 1) el cierre de una o más celdas en torres multicelda, o 2) el ciclaje de los ventiladores. En torres de enfriamiento equipadas con motores de dos velocidades el funcionamiento a baja velocidad puede ser suficiente para prevenir la acumulación de hielo. Sin embargo, también puede ser preciso detener el o los ventiladores periódicamente para prevenir la formación de hielo y/o derretir el hielo

acumulado en las persianas de entrada y (en torres de enfriamiento de flujo transversal) en la cara exterior del relleno.

En condiciones especialmente adversas donde el funcionamiento cíclico del ventilador es insuficiente para impedir la formación de hielo, puede ser necesario invertir el sentido de giro de los ventiladores para eliminar el hielo acumulado, haciendo salir aire caliente por las persianas de la entrada. En estas circunstancias no se hará funcionar los ventiladores en sentido inverso más tiempo de lo necesario, ya que, de hacerlo, podría formarse hielo en las aspas, en el cilindro del ventilador o en los eliminadores de gotas dañándose la torre. En vista de esta posibilidad, las torres de enfriamiento en las que se invierte el funcionamiento de los ventiladores para eliminar el hielo deberán estar provistas de un interruptor activado por la vibración y la duración del funcionamiento invertido se limitará a un máximo de 30 minutos.

Los proveedores hacen notar y reiteran que no se puede exagerar la importancia de realizar inspecciones visuales con frecuencia y efectuar los trabajos rutinarios de mantenimiento durante el funcionamiento a temperaturas por debajo del punto de congelación. Estas áreas de inspección y mantenimiento deberán llevarse a cabo periódicamente, a intervalos determinados en función de las condiciones ambientales locales, con el fin de:

- Asegurarse que todos los controles de capacidad y protección contra la congelación estén regulados correctamente y funcionen normalmente.
- Impedir o detectar niveles de agua excesivamente altos y el posible rebalse de los tanques de distribución (en torres de flujo transversal) o las piletas de recolección debido a un flujo desequilibrado, obturación de las boquillas dosificadoras o de los filtros, o el mal funcionamiento de las válvulas de reposición.
- Detectar la formación de hielo antes de que llegue a dañar la torre de enfriamiento o los soportes o afectar negativamente el rendimiento del sistema. Las persianas de entrada y (en torres de enfriamiento de flujo transversal) la cara exterior del relleno están expuestas especialmente a la formación de hielo por estar en contacto directo con el aire de entrada.

**Operación a bajas temperaturas con temperaturas nominales del agua de salida inferiores a 60 °F (15.5 °C).** Al irse acercando al punto de congelación la temperatura del agua en circulación, aumenta el riesgo de la formación de hielo en los equipos de enfriamiento por evaporación. El funcionamiento a temperaturas del agua de salida inferiores a 60 °F en temperaturas ambiente, registrados por termómetro de bulbo húmedo, inferiores al punto de congelación, el operador de la torre de enfriamiento debe realizar las tareas de inspección y mantenimiento con una frecuencia mayor a la establecida en la sección anterior. En determinadas condiciones estas tareas han de efectuarse tan frecuentemente como una vez cada 30 o 60 minutos.

Además se hace más importante de lo normal ajustar la capacidad de enfriamiento de la torre a la carga térmica a disipar. Cuando se opera con celdas múltiples, todas las celdas deben funcionar al unísono, es decir, con todos los ventiladores a la misma velocidad y paso, con el fin de impedir la "sobrefrigeración" de algunas celdas en un intento de obtener la necesaria temperatura media del agua. Se recordará que la mayor parte de los dispositivos de control detectarán la temperatura de mezcla del agua de

salida de la pileta de recolección. El mero ciclaje escalonado de los ventiladores puede hacer que el agua de las celdas en operación se aproxime al punto de congelación antes de mezclarse con el agua más caliente proveniente de las celdas cuyos ventiladores están detenidos. Algunos protocolos de control que permiten el funcionamiento al unsono son: 1) motores de ventilador de dos velocidades, 2) motores de velocidad variable y 3) ventiladores de paso regulable.

### 3.5.1 PROCEDIMIENTOS DE INSPECCIÓN

Los componentes requieren una atención rutinaria de mantenimiento e inspección, a continuación se indican los procedimientos recomendados para realizar las tareas necesarias. Todos los procedimientos descritos en esta sección deben realizarse al arrancar el sistema. De ahí en adelante se realizarán las tareas de mantenimiento a la frecuencia indicada.

*1. Pileta de recolección o basín.* Inspeccionar diariamente. Quitar los residuos u objetos extraños que pueden haberse acumulado en el sumidero o en los filtros. Asegurarse que estén debidamente instalados todos los componentes necesarios, tales como el filtro, el dispositivo antitorbellino, etc. Si fuera preciso, ajustar la válvula de reposición para mantener el nivel nominal de funcionamiento. La pileta de recolección se vaciará y se limpiará semestralmente y siempre que se pare el sistema. Se lavará con abundante agua fresca para quitar el cieno y el sedimento que se acumulan en el sumidero durante el funcionamiento. Si no se elimina periódicamente, este sedimento puede acelerar el deterioro de los componentes metálicos y de madera.

Una vez al año la pileta de recolección se inspeccionará en busca de pérdidas. Las juntas se cerrarán con masilla y los tornillos flojos se apretarán según se proceda.

*2. Estructura.* Se inspeccionará semestralmente. Apretar los tornillos flojos y reponer ferretería, piezas de fundición y elementos estructurales dañados o defectuosos. Inspeccionar en busca de deterioro de las piezas metálicas o de madera. Si existe corrosión se tomarán las medidas correctivas tales como la aplicación de un revestimiento anticorrosión.

*3. Relleno, eliminadores de gotas y persianas de entrada.* Inspeccionar anualmente y limpiar a fondo para eliminar depósitos tales como algas, incrustaciones, etc. y todo objeto extraño que pudiera impedir el flujo de aire. Reparar o reponer las piezas dañadas o faltantes conforme las necesidades. Tomar nota de los posibles deterioros y tomar las medidas correctivas precisas. La no sustitución de persianas de entrada deterioradas o perdidas en las torres equipadas con las mismas puede resultar en la pérdida de agua por salpicadura.

*4. Sistema de distribución de agua.* Comprobar mensualmente el nivel del agua de los tanques de distribución (torres de flujo transversal) o la caída de agua de los aspersores (torres a contraflujo) y ajustar las válvulas de control del caudal de la torre de enfriamiento o en el sistema asociado con el fin de equilibrar el caudal si fuera preciso.

Volver a comprobar el sistema de agua de reposición para asegurar que durante el funcionamiento se mantenga el nivel correcto de agua en la piletta de recolección.

Con torres de enfriamiento de flujo transversal, los tanques de distribución se limpiarán y se lavarán con una manguera semestralmente o cuando se pare el sistema, y el sistema de válvulas de control del caudal se lubricará con grasa resistente al agua. En torres a contraflujo el o los distribuidores y brazos aspersores se limpiarán y se lavarán semestralmente o cuando se pare el sistema. En ambos tipos de torres, desatascar las boquillas dosificadoras y reponer las que faltan.

Cada año, inspeccionar el sistema de distribución del agua en busca de desperfectos. Reparar o reponer los componentes que den lugar a pérdidas excesivas, apretando los tornillos flojos según se precise. Se tomará nota de la corrosión o los desperfectos excesivos y se tomarán las medidas necesarias.

5. *Equipos mecánicos excepto el ventilador.* Antes de realizar trabajos en cualquier equipo mecánico, o inspeccionar el motor, el eje conductor o el interior del cilindro del ventilador, fijar el dispositivo de arranque del motor del ventilador en la posición "off". Inspeccionar diariamente en busca de ruido y vibración excesivos prestando particular atención al eje conductor, a los acoplamientos flexibles del mismo y a la caja reductora. Si existe algún problema se realizarán los procedimientos recomendados de mantenimiento anual descritos a continuación. Comprobar diariamente el nivel de aceite de la caja reductora. Nota: la lectura del nivel de aceite debe realizarse con el motor apagado, dejando transcurrir unos minutos para que el nivel de aceite se estabilice. El aceite de la caja reductora se cambiará semestralmente. Lubricar el motor y la caja reductora semestralmente y cuando se pare el sistema.

Comprobar anualmente el apriete de los pernos de sujeción del soporte de los equipos mecánicos a la torre así como los que fijan el motor y la caja reductora al soporte; comprobar la alineación del eje conductor y buscar puntos de fricción, agarrotamientos u otros defectos de funcionamiento de los equipos mecánicos que malgastarían energía y podrían sobrecargar el motor. Asegurarse que los protectores del eje conductor estén instalados y firmemente sujetos.

6. *Ventilador.* Inspeccionar diariamente en busca de ruido y vibración excesivos. Si existe algún problema, llevar a cabo los procedimientos anuales de mantenimiento recomendados que se describen a continuación. La separación del extremo de las aspas, el ángulo de paso, el par de apriete de los pernos y las condiciones generales de seguridad se inspeccionarán anualmente (comprobar si se han producido desperfectos en las aspas o en el cubo del ventilador). Antes de desmontar el ventilador asegurarse de marcar la posición relativa de aspa y cubo para asegurar que se obtenga el ángulo de paso del aspa correcto al volver a montarlo. Debido a su tamaño y velocidad, el ventilador puede causar graves daños personales o materiales si se deteriora o se instala incorrectamente, por tanto, seguir las normas de seguridad.

7. *Calendario de mantenimiento.* Para obtener el rendimiento óptimo y la máxima vida útil para lo que han sido diseñadas las torres de enfriamiento, es esencial establecer y mantener un calendario periódico de inspección y mantenimiento. A continuación se describen los procedimientos recomendados para el arranque, funcionamiento y parada,

y la frecuencia aproximada en cada caso. Se hace constar que las recomendaciones referentes a la frecuencia de realización de estos procedimientos son mínimas y que deben efectuarse con mayor frecuencia si las condiciones de funcionamiento son adversas. (19)

Tabla 5 Procedimientos de Inspección

TIPO DE PROCEDIMIENTO	ARRANQUE	DIARIAMENTE	MENSUALMENTE	SEMESTRALMENTE	ANUALMENTE	PARADA
<i>Pileta de recolección</i>						
A. Comprobar sistema de reposición	X	X				
B. Limpiar y lavar	X			X		X
C. Comprobar si existen pérdidas	X				X	
<i>Bastidor Estructural (inspeccionar)</i>						
A. Piezas metálicas	X			X		
B. Piezas de madera	X				X	
<i>Refrío, persianas de entrada y eliminadores de gotas: inspeccionar y limpiar</i>						
	X		X			
<i>Sistema de distr. de agua (T. transversal)</i>						
A. Comprobar nivel de agua	X		X			
B. Limpiar y lavar con manguera	X			X		X
C. Reparar (según necesidades)	X				X	
D. Lubricar vástago de la válvula de control de caudal	X			X	X	
<i>Sistema de distr. de agua (T. contraflujo)</i>						
A. Comprobar nivel de agua	X		X			
B. Limpiar y lavar con manguera	X			X		X
C. Reparar (según necesidades)	X				X	
<i>Equipo mecánico (excepto ventilador)</i>						
A. Inspeccionar ruido y vibración	X	X				
B. Comprobar nivel de aceite	X	X				
C. Cambiar aceite, lubricar	X			X		X
D. Inspeccionar pernos y alineación del eje conductor	X				X	
<i>Ventilador</i>						
A. Inspeccionar ruido y vibración	X	X				
B. Comprobar separación del extremo del aspa, ángulo de paso y par de apriete del perno	X				X	

(Manual BAC-Pritchard)

Si surgen problemas de funcionamiento, a menudo se pueden tomar medidas correctivas o efectuar reparaciones, sin ayuda del exterior, siempre que se conozcan los procedimientos correctos. A continuación se muestran algunos de los problemas más comunes y las medidas correctivas recomendadas.

Tabla 6 Medidas correctivas para problemas más comunes

Síntoma	Causa posible	Medida correctiva
Capacidad de enfriamiento insuficiente (temp. del agua de salida demasiado alta)	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Caudal de aire insuficiente</li> <li>b) Caudal de agua muy grande</li> <li>c) Carga térmica superior a la nominal</li> <li>d) Distribución de agua desigual en el relleno</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Quitar objetos extraños de las persianas de entrada, el relleno y eliminadores de gotas. Comprobar el paso del aspa del ventilador y aumentar si fuera preciso.</li> <li>2. Regular el caudal de agua al valor nominal.</li> <li>3. Comparar el desprendimiento de calor real con el nominal. Consultar si se precisa aumentar la capacidad de la torre.</li> <li>4. Limpiar y/o ajustar el sistema de distribución de agua.</li> </ol>
Ruido y vibración excesivos	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Pernos flojos en los equipos mecánicos.</li> <li>b) Elementos estructurales flojos.</li> <li>c) Obstrucción del ventilador.</li> <li>d) Alineación incorrecta del eje conductor.</li> <li>e) Fallo de cojinete, eje conductor o engranaje.</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Inspeccionar todos los equipos mecánicos y apretar tornillos según sea preciso.</li> <li>2. Inspeccionar la estructura y apretar los tornillos según sea preciso.</li> <li>3. Asegurar la separación correcta del ventilador y quitar todos los objetos sueltos.</li> <li>4. Volver a alinear el eje conductor.</li> <li>5. Lubricar los equipos. Reparar o sustituir componentes deteriorados.</li> </ol>
Sobrecarga del motor del ventilador	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Caudal de aire demasiado grande.</li> <li>b) Obstrucción de piezas móviles.</li> <li>c) Fallo de cojinete o engranaje.</li> <li>d) Aumento de la potencia del ventilador debido a un aumento de la densidad del aire.</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Comprobar el paso del aspa del ventilador, reduciéndolo si fuera preciso.</li> <li>2. Inspeccionar todos los equipos mecánicos y corregir cualquier agarrotamiento u obstrucción.</li> <li>3. Lubricar los equipos mecánicos. Reparar o sustituir los componentes deteriorados.</li> <li>4. Normal durante el funcionamiento con tiempo frío. Solicitar el asesoramiento del fabricante del motor sobre la instalación de dispositivos protectores contra la sobrecarga de mayor capacidad durante el funcionamiento en tiempo de frío.</li> </ol>
El agua desborda continuamente la pileta de recolección.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Rebalse no funciona.</li> <li>b) Sumidero y/o filtros obturados.</li> <li>c) Válvula de reposición atascada en posición abierta.</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Inspeccionar el rebalse y limpiarlo o ajustarlo según se precise.</li> <li>2. Eliminar los objetos o materia extraña que impiden el flujo.</li> <li>3. Reparar o sustituir la válvula de reposición.</li> </ol>
La pileta se desborda al parar el sistema.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Nivel de agua demasiado alto durante el funcionamiento.</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ajustar el flotador de la válvula de reposición para permitir el funcionamiento con el nivel de agua más bajo posible.</li> </ol>
Torbillos en el sumidero.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Nivel de agua demasiado bajo durante el funcionamiento.</li> <li>b) Sistema de agua de reposición no funciona.</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ajustar el flotador de la válvula de relleno para aumentar el nivel durante el funcionamiento.</li> <li>2. Verificar que el agua llega a la válvula de reposición a una presión suficiente. Reparar o sustituir la válvula de reposición y volver a instalarla.</li> </ol>
Desbordamientos de agua en los tanques de distribución (T. transversal)	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Caudal de agua demasiado grande.</li> <li>b) Boquillas dosificadoras obstruidas.</li> <li>c) Caudal desequilibrado.</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ajustar el caudal de agua al valor nominal.</li> <li>2. Limpiar las boquillas dosificadoras y reponer según se precise.</li> <li>3. Comparar visualmente los niveles de agua en los tanques de distribución y ajustar las válvulas de control del caudal hasta que todos los niveles sean iguales.</li> </ol>
Exceso de agua arrastrada.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Caudal de agua demasiado grande</li> <li>b) Caudal de aire demasiado grande.</li> <li>c) Eliminadores de gotas perdidos o deteriorados.</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ajustar el caudal del agua al valor nominal.</li> <li>2. Comprobar el paso del aspa del ventilador, reduciéndolo si fuera preciso.</li> <li>3. Reparar o sustituir las láminas de los eliminadores de gotas deterioradas o perdidas. Comprobar la estanqueidad del aire del conjunto eliminador de gotas para impedir que se desvle el aire.</li> </ol>
Se pierde agua de las persianas por salpicadura.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Caudal de agua demasiado grande.</li> <li>b) Boquillas dosificadoras obstruidas.</li> <li>c) Caudal desequilibrado (T. transversal).</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ajustar el caudal de agua al valor nominal.</li> <li>2. Limpiar las boquillas dosificadoras y reponer según se precise.</li> <li>3. Comparar visualmente los niveles de agua en los tanques de distribución y ajustar las válvulas de control del caudal hasta que todos los niveles sean iguales</li> </ol>
Deterioro rápido en los componentes metálicos o de madera.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Calidad del agua inadecuada.</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Consultar con un experto en tratamiento de agua e iniciar o modificar el programa de tratamiento de agua según necesidades. Aplicar una capa protectora a las partes metálicas según se necesite.</li> </ol>

(Manual BAC-Prichard)

### 3.5.2 OPERACIÓN DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO EN INVIERNO

Las torres de enfriamiento para agua pueden ser un dolor de cabeza en invierno, si no se tiene cuidado. Lo más importante es seguir las instrucciones del fabricante. La duración útil de la torre de enfriamiento depende de su calidad de fabricación, clima, tipo de servicio, severidad de la operación y el cuidado y mantenimiento general que se le da.

Hay que recordar que el equipo bien mantenido y limpio da mejores resultados en la operación en todo el tiempo y también reduce los costos totales de mantenimiento. En la mayoría de los casos, basta con una inspección diaria. Use el programa de inspección y mantenimiento proporcionado anteriormente.

**Niebla.** La niebla ocurre bajo ciertas condiciones atmosféricas. Por definición, el punto de rocío del aire es la temperatura a la cual el aire llega al estado de saturación cuando se enfría. Cuando se enfría el aire hasta su punto de rocío, la humedad empieza a condensarse y se tiene niebla como resultado. Es muy indeseable cerca de los edificios, carreteras o vías de ferrocarril. En algunos casos la niebla se presenta debido a que la torre todavía contiene hielo. Cuando se forma hielo en la torre, los ventiladores mueven menos aire de la torre a "baja velocidad y alta temperatura". Esto ocasiona mucha niebla cuando el aire caliente de la torre se mezcla con el aire exterior frío. Esta niebla se desplaza a través de las carreteras, obstruye el tránsito y forma hielo en el pavimento o en los parabrisas.

La niebla son gotitas de agua en el aire, formadas por la condensación del vapor de agua. Cuando el aire caliente y casi saturado sale de la torre de enfriamiento en tiempo frío, se mezcla con el aire circundante, se enfría, se condensa el vapor y se forma la niebla. Al contrario de la creencia general, la niebla suele ser peor en días invernales benignos a temperaturas de 50 a 60 °F, que con días gélidos. Con el aire frío, la diferencia de temperaturas es mayor y el aire caliente de la torre sube hacia el aire atmosférico con más rapidez (efecto chimenea) que el aire denso de un día invernal de clima moderado. El clima invernal moderado y los vientos fuertes son una combinación productora de niebla espesa.

Para reducir los problemas con la niebla se sugieren los siguientes pasos:

- La torre debe estar en el lado sur y separada de las vías de ferrocarril y carreteras
- Mantener bajas temperaturas de aire en la salida de la torre (70 °F o menos)
- Circule todo el aire que permita las condiciones de operación de la torre
- Mantenga una velocidad alta del aire a la salida de la torre
- Mantenga al mínimo la formación de hielo en las rejillas para mantener máxima entrada continua de aire a la torre.

La niebla suele provenir de las condiciones atmosféricas y no siempre del diseño de la torre.

**Prevención del hielo.** El frío extremo, normalmente, no aumenta mucho el rendimiento, pero si aumenta los riesgos de operación. En las torres de enfriamiento que trabajan en tiempo de heladas, se puede formar hielo en la entrada de aire. Las

pequeñas cantidades de vapor de agua es fácil que se congelen en las rejillas de entrada y el relleno contiguo de madera. El hielo se empieza a formar en la sección inferior de las rejillas y va subiendo. Esto restringe el área de entrada, reduce el flujo del aire y aumenta la temperatura del agua que circula por la torre.

La mayoría del agua que circula por la torre, rara vez se enfría a la temperatura de congelación. En realidad, la temperatura de agua rara vez es menor de 60 °F, excepto en torres utilizadas en condiciones especiales de operación. Por esta razón, el hielo sólo se forma en las partes de la torre que están ligeramente mojadas como las gotitas que salpican hacia la corriente de aire de entrada.

Para evitar el hielo en tiempo muy frío, mantenga lo más alta que sea posible la temperatura del agua de recirculación. Se puede utilizar una válvula de control de temperatura para derivar parte del agua caliente al estanque para agua fría. En general, si se varía el flujo de aire en la torre se puede evitar, controlar y eliminar la formación de hielo. Cuando la torre trabaja en forma intermitente en invierno, saque toda el agua de las tuberías descubiertas y de los estanques. Esto protegerá contra la congelación y la corrosión. Deje abiertos los drenajes del estanque durante el paro en invierno para que escapen la lluvia y la nieve fundida.

CAPÍTULO 4

**TRATAMIENTO Y  
ACONDICIONAMIENTO  
DEL AGUA DE ENFRIAMIENTO**

## IV. TRATAMIENTO Y ACONDICIONAMIENTO DEL AGUA DE ENFRIAMIENTO

### 4.1 EL AGUA COMO RECURSO

Toda el agua utilizada por el hombre proviene de los océanos. Una pequeña parte del agua de mar se usa directamente para refrigeración en plantas de fuerza o industrias en las costas. El agua de mar y las aguas salobres de ciertos lagos se usan también como materia prima para la producción de sal común, magnesio metálico y compuestos de magnesio, compuestos de potasio y boratos. Sin embargo, casi toda el agua utilizada es agua dulce que se ha evaporado de los océanos, acarreada en estado gaseoso por los vientos y depositada como lluvia o nieve sobre la tierra, de donde regresa al mar.

La cantidad de agua dulce disponible para el uso es inmensa. En promedio, diariamente precipitan 16 300 millones de metros cúbicos de agua en los Estados Unidos. De esta cantidad aproximadamente el 70% regresa a la atmósfera por evaporación o por transpiración de los vegetales. El escurrimiento restante, 4 900 millones de metros cúbicos diarios, es la provisión realmente disponible de agua. Sin embargo, esta provisión se distribuye de manera muy dispareja.

Como cualquiera otra materia prima importante, el agua es transportada de los lugares donde se encuentra disponible a los lugares donde se necesita. Al aumentar la población y crecer la industria, será necesario almacenar mayor cantidad de agua en depósitos adecuados y transportarla a las regiones que la necesiten.

No solo la cantidad, sino la calidad del agua es importante. Desde un punto de vista práctico, se podría definir la calidad en términos de la relativa exención de dificultades en cualquier uso específico. Esto depende de las sustancias que lleva el agua y de los efectos que producen cuando el agua se bombea en un sistema de distribución, se calienta en un cambiador de calor, se hierve en un evaporador o en una caldera, se usa en el tratamiento de telas o se convierte en cerveza.

Si la lluvia cae en una montaña rocosa de la que escurre rápidamente como agua superficial hasta un río, tiene poca oportunidad de recoger sustancias en solución. La cantidad de sólidos en suspensión finamente divididos también suele ser baja. En contraste, si la lluvia cae constantemente sobre las llanuras centrales, todas las corrientes arrastran partículas del suelo en proporción acelerada. La carga en sólidos en suspensión se eleva y lo mismo pasa con las sustancias en solución. Sin embargo, parte del agua caída se introduce en el suelo, a través del cual puede percolar por cientos de kilómetros como agua subterránea y recoger sólidos disueltos por contacto con diferentes minerales. Cuando esta agua se bombea por pozos que calan en la corriente subterránea, puede mostrar casi cualquier análisis, desde agua relativamente blanda, agua dura y salina, etc.

Normalmente el agua superficial se satura con oxígeno, gas carbónico y otros gases del aire. En regiones bastante pobladas, las cloacas vierten su caudal de agua

bruta o depurada en plantas de tratamiento, en las corrientes naturales de agua. Además, el agua puede llevar desechos de operaciones industriales muy variadas. En general, el agua subterránea tiene poco oxígeno disuelto y poca contaminación por aguas negras o desechos industriales, pero puede contener bastante CO<sub>2</sub>. Cada una de las sustancias acarreadas como sólidos en suspensión, sólidos disueltos o gases disueltos influye de varios modos en el comportamiento del agua empleada para fines específicos. *En un sentido realmente práctico, el agua no es únicamente agua, sino que está caracterizada por las sustancias disueltas y en suspensión que contiene.* (9)

## 4.2 OBTENCIÓN DEL AGUA INDUSTRIAL Y SU PROBLEMÁTICA ECOLÓGICA

Los suministros de agua industrial deben ser:

1. suficientemente abundantes para cubrir los requerimientos presentes y futuros,
2. disponibles a suficientes niveles de flujo y presiones para satisfacer las máximas demandas y proveer de una protección adecuada contra incendios, y
3. ser de calidad apropiada para los usos finales.

**Abundancia.** Al seleccionar un sitio para una planta nueva, las investigaciones mostrarán cuales son apropiados para proporcionar suficiente agua de una calidad que pueda ser tratada simple y económicamente para llenar los requisitos de sus varios usos. Abastecer agua en cantidad adecuada a una planta cuyos suministros están disminuyendo o son sobrepasados, no es una cosa simple. Si se trata de un pozo profundo, el primer paso que se toma usualmente, es profundizar el pozo, pero esto no se puede hacer indefinidamente. Espaciar los pozos o adquirir un nuevo campo de bombeo, es la mejor medida. En algunos casos el uso de pozos de absorción para aprovechar las aguas superficiales o en todo caso hacer uso de ellas directamente, puede ser posible. Si el suministro de agua superficial disminuye con las estaciones, puede ser posible o necesario un embalse para su desarrollo.

Otros pasos que se deben tomar en muchas plantas industriales son:

1. disminuir pérdidas,
2. estudiar las operaciones de la planta y encontrar la manera de volver a usar el agua y,
3. tratar de recobrar y reusar tanta agua como sea posible.

Los ahorros de agua que se pueden alcanzar por estos medios son sorprendentemente grandes. Cuando un gran número de usuarios tienen el interés común de conservar el agua, se puede concertar una acción común regida por juntas de comités reguladores y por el libre intercambio de información.

**Calidad.** La calidad del agua requerida depende de su uso o usos finales. Ya que la tolerancia para algunas impurezas varía con estos usos, la calidad del agua requerida en cada caso puede diferir grandemente. Por ejemplo, el agua de mar, con clorinación intermitente, puede ser bastante satisfactoria para algunos propósitos de enfriamiento y

completamente inadecuada para calderas, para otros usos en equipo de enfriamiento, para muchos procesos húmedos, y obviamente, como agua de beber.

Si un agua dura es adecuada para ciertos usos, no hay ninguna necesidad de tratar la porción requerida para ellos. Para aquellas porciones requeridas para otros usos, en algunos casos, puede ser necesario, únicamente una forma de tratamiento, tal como el ablandamiento, mientras que en otros casos pueden requerirse tratamientos separados. Si el agua dura no es apropiada para todos los usos de la planta, por ejemplo, si es muy turbia, si tiene alto color o contiene hierro y manganeso, puede emplearse una planta central para eliminar estas impurezas, seguida o acompañada de cualquier otro tratamiento o tratamientos que puedan requerirse para proveer agua de la calidad adecuada para esos varios usos.

Para ciertas aplicaciones, la calidad del agua requerida es tan alta, que demanda prácticamente la remoción completa de todas las impurezas. Para la gran mayoría de los usos, sin embargo, la calidad del agua requerida no es tan alta y sería necesario y antieconómico proceder a remover todas las impurezas en tales casos. En lugar de esto, lo que se refiere es, ya sea una remoción prácticamente completa de sólo las impurezas dañinas, o su reducción a márgenes no perjudiciales (tolerancias). (23)

Una empresa en busca de un lugar adecuado para una nueva planta industrial debe estudiar las fuentes de aprovisionamiento de agua superficial y subterránea tan cuidadosamente como el costo de la energía y las sustancias que serán tratadas. El costo total del agua depende de muchos factores, de los cuales los siguientes son los más importantes:

1. Costo del agua puesta en la planta
2. Costo del tratamiento primario para uso general
3. Costo de acondicionamiento secundario para uso específico
4. Costo de mantenimiento y reemplazo de tuberías y equipos dañados por el agua
5. Costo de pérdidas en producción
6. Costo de daños al producto por el agua en las operaciones del proceso
7. Costo del tratamiento del agua de desecho contaminada o costo de eliminación.

Estos costos parciales son en tal grado interdependientes, que por lo general no es fácil la decisión. Sin embargo, el estudio técnico de todos los usos proyectados para el agua dentro de la planta y de la mejor manera de preparar el agua para los diversos usos ahorrará más dinero en cada año de explotación que el costo total del estudio original.

#### **4.3 GENERALIDADES DEL AGUA**

El agua que se utiliza en el enfriamiento puede plantear para el funcionamiento del equipo problemas tales como la formación de incrustaciones, corrosión y crecimientos orgánicos. Siendo un disolvente universal, el agua disuelve los gases del aire, las sustancias minerales provenientes del suelo y las rocas con las que entra en contacto. Las condiciones ambientales que rodean al equipo de acondicionamiento pueden producir lodos y algas. Para tener un control efectivo de todos los componentes de un

sistema, conviene hacer un estudio conjunto del sistema y del agua que se va a emplear. En todos los sistemas es conveniente realizar un programa de depuración de aguas. Las técnicas y el equipo necesario para resolver el problema de las aguas varían con las características de éstas, clase y tamaño del sistema, y facilidades disponibles. Se puede realizar un tratamiento a fondo del agua para determinado trabajo, o programarlo únicamente para tratar algunos de los problemas del agua.

#### 4.3.1 VENTAJAS DE LA DEPURACIÓN DEL AGUA

Un programa de depuración de aguas influye en el aspecto económico del sistema, haciendo posible conseguir un funcionamiento más continuo y satisfactorio. La depuración del agua reduce el consumo de energía y los costos de explotación, además de prolongar la vida útil del equipo. Una buena depuración de aguas produce mayores rendimientos del equipo.

La dureza del agua en estado natural, favorece la formación de incrustaciones, y cuando se calienta tiende a formar un depósito de cal. Este depósito, y otras impurezas, se acumulan en los tubos, válvulas, bombas y tuberías, oponiéndose a la circulación de los líquidos y reduciendo el intercambio de calor. Una película pequeñísima de incrustaciones es suficiente para afectar seriamente al rendimiento en la transmisión de calor en una superficie.

#### 4.3.2 PROBLEMAS QUE ORIGINA EL AGUA

Pueden dividirse en tres categorías:

1. La formación de incrustaciones que reduce la conductividad térmica de los intercambiadores y la pérdida de carga en ellos.
2. La corrosión, que puede ser debida en parte a que el agua absorba los gases del aire y ataque los metales. En las zonas industriales éste suele ser el mayor problema, porque se disuelven muchos gases en el agua. Esta corrosión se produce con mayor intensidad en las zonas de aguas blandas.
3. Los crecimientos orgánicos de lodos y algas, que se forman bajo ciertas condiciones del ambiente que rodea la tubería, puede reducir la conductividad térmica de los intercambiadores, por formarse una capa aislante, o puede producir la corrosión y la perforación. (5)

#### 4.3.3 CARACTERÍSTICAS Y COMPONENTES DEL AGUA

Los componentes y las impurezas del agua pueden clasificarse en sólidos, líquidos, gases disueltos y materia en suspensión. Ejemplos de sólidos disueltos son el cloruro de calcio y el carbonato de calcio en solución. Las sustancias disueltas no pueden eliminarse por filtración. El oxígeno y el anhídrido carbónico están disueltos en el agua.

El barro, la arcilla y la arena son ejemplos de materias en suspensión que pueden eliminarse por filtración. La tabla 7, a título de ejemplo, muestra la amplia gama de elementos que se encuentran en el agua de distintos manantiales.

Tabla 7 Ejemplos de análisis mineralógico de diferentes aguas de suministro

Sustancia	Fórmula química	Distintas Aguas								Agua de mar
		1	2	3	4	5	6	7	8	
silice	SiO <sub>2</sub>	2	6	12	37	10	9	22	14	
hierro	Fe	0	0	0	1	0	0	0	2	
calcio	Ca	6	5	36	62	92	96	3	155	400
magnesio	Mg	1	2	8	18	34	27	2	46	1300
sodio	Na	2	6	7	44	8	183	215	78	11000
potasio	K	1	1	1		1	1	10	3	400
bicarbonato	HCO <sub>3</sub>	14	13	119	202	339	334	549	210	150
sulfato	SO <sub>4</sub>	10	2	22	135	84	121	11	389	2700
cloruro	Cl	2	10	13	13	10	280	22	117	19000
nitrate	NO <sub>3</sub>	1			2	13	0	1	3	
sólidos disueltos		31	66	165	426	434	983	564	948	25000
dureza en CaCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	12	11	98	165	287	274	8	172	125
dureza en sulfato de calcio	CaSO <sub>4</sub>	5	7	18	40	58	54	0	295	5900

\* Valores en mg/l  
(CARRIER)

Nota: No se indica el pH porque en una misma fuente puede tener distintos valores dentro de una gama bastante amplia

El pH, la alcalinidad, la dureza y la conductancia específica son de particular importancia en el tratamiento de agua y se explican con más detalle.

**Valor del pH.** El pH es uno de los factores de control más importantes en el tratamiento del agua. Es un símbolo arbitrario que se ha adoptado para expresar el grado de acidez o basicidad de una muestra de agua. El agua neutra tiene un pH de 7. Por debajo de 7 las aguas son ácidas, y entre 7 y 14 son básicas (alcalinas). La mayoría de las aguas naturales tienen un pH comprendido entre 6 y 8. El agua que contiene ácidos libres puede tener un pH inferior a 4.5; un pH inferior a 7 origina la corrosión de los elementos con los que entra en contacto el agua. Cuando el pH es elevado (mayor de 7.5 u 8) es fácil que se produzcan depósitos de carbonato cálcico.

El pH se mide generalmente en los laboratorios mediante aparatos de medida apropiados. Puede determinarse también por medio de indicadores de color, comparando el de la solución con los matices de una tabla de colores que comprende una gama de pH, para un indicador determinado. Existen varias tablas de colores que comprenden los correspondientes valores de pH desde 0 a 14.

Por definición pH es el logaritmo de la inversa de la concentración de hidrogeniones (en moles por litro), siendo H<sup>+</sup> la concentración de iones hidrógeno.

$$pH = \log_{10} 1/H^+$$

Cuando el agua pura se ioniza con formación de iones H<sup>+</sup> y OH<sup>-</sup>, se liberan 0.0000001 gramos de iones hidrógeno por litro o, lo que es lo mismo, 1x10<sup>-7</sup>. Esto puede indicarse diciendo que su pH es de 7. (5)

**Alcalinidad.** La alcalinidad es el factor más importante del agua cuando se quiere determinar su tendencia a la formación de incrustaciones. Generalmente la alcalinidad es la medida de su poder neutralizador de ácidos, y se determina mediante medición de la cantidad de disolución ácida empleada para neutralizar el carácter alcalino del agua analizada, neutralización que se detecta con el cambio de color que se produce en un indicador.

La alcalinidad puede clasificarse en dos categorías, respecto al pH, en la forma siguiente:

1. *Alcalinidad de fenolftaleína*, que mide los carbonatos y los iones hidroxílicos. Se determina por neutralización a un pH de 8.3. En las aguas naturales no suele haber alcalinidad de fenolftaleína; no obstante, se encuentra algunas veces en aguas que se han ablandado con carbonato sódico.
2. *Alcalinidad del anaranjado de metilo (total)* que nos da una medida de todas las sustancias alcalinas, y comprende la alcalinidad de la fenolftaleína. Se determina empleándose en su análisis una solución con un pH de 4.3.

La diferencia entre las dos alcalinidades la establece la presencia del ion bicarbonato.

Las pruebas de fenolftaleína y de anaranjado de metilo son las que normalmente se emplean en el tratamiento de aguas. En la fig. 16 puede verse un gráfico de pH, indicando los distintos constituyentes que pueden existir para distintos pH.

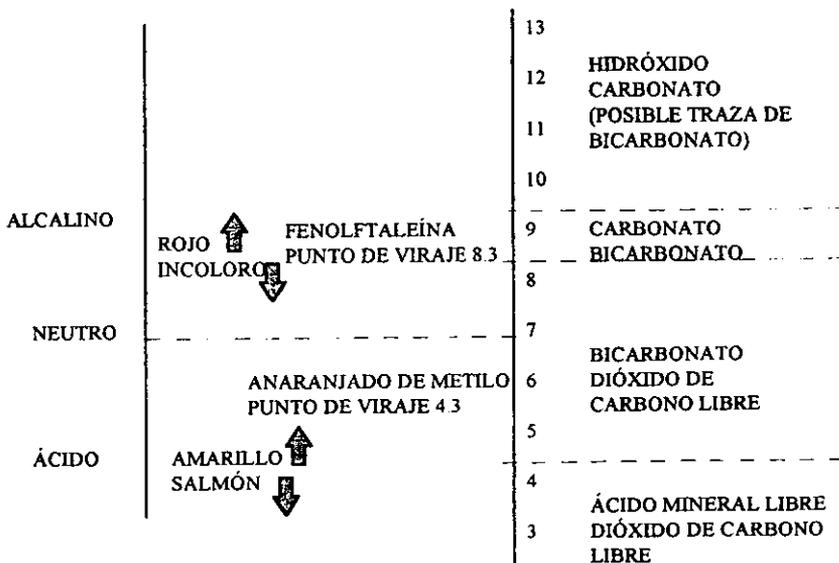


Fig. 16 Escala de pH con los componentes que existen en las aguas naturales y tratadas (CARRIER)

**Dureza.** La dureza representa la suma de las sales de calcio y magnesio que contienen el agua; aunque puede incluir también aluminio, hierro, manganeso, estroncio o zinc.

La dureza de carbonatos (dureza temporal) se atribuye a los carbonatos y bicarbonatos de calcio y magnesio, expresada en ppm de  $\text{CaCO}_3$ . El resto de la dureza (dureza permanente) que no corresponde a los carbonatos, se debe a los sulfatos, cloruros y nitratos de calcio, o magnesio, expresados en ppm como  $\text{CaCO}_3$ . La dureza permanente no constituye un serio problema en el tratamiento del agua porque tiene una solubilidad aproximadamente 70 veces mayor que la dureza de los carbonatos. En muchos casos el agua puede contener hasta 1200 ppm de dureza permanente sin que se depositen incrustaciones de sulfato cálcico.

La dureza del agua puede clasificarse en la forma siguiente:

Tabla 8 Clasificación de la dureza

DUREZA (en ppm de $\text{CaCO}_3$ )	CLASIFICACIÓN
menos de 15	muy blanda
de 15 a 50	blanda
de 50 a 100	dureza media
de 100 a 200	dura
de 200 en adelante	muy dura

La dureza se reduce muchas veces en las plantas locales de suministro de agua mediante sustancias o intercambiadores de iones sódicos, como la zeolita. Esta se utiliza también en los aparatos domésticos de ablandamiento de agua. En estos casos, se reconoce la dureza por la dificultad de obtener espuma jabonosa, por mucho jabón que se utilice. Entonces, se forma un cuajarón pegajoso e insoluble, que es el resultado de la acción del jabón sobre las sales productoras de la dureza. Si el agua es dura, al hervirla se forma en las vasijas un depósito de incrustaciones.

#### 4.3.5 SISTEMAS DE CIRCULACIÓN DE AGUA

El estudio del sistema comprende el número y tipos de circuitos de agua, materiales de construcción y situación del equipo. Cada tipo de circuito de agua necesita un tratamiento distinto.

**Sistema de agua perdida (que circula una sola vez).** Este sistema puede plantear problemas de incrustaciones o de corrosión, pero casi nunca los dos simultáneamente. Si hiciera falta un tratamiento de aguas muy completo, puede resultar más económico proyectar un equipo con un gran factor de suciedad (debido a las incrustaciones) y limpiar el sistema frecuentemente, o emplear materiales caros y muy resistentes a la corrosión antes que emplear el tratamiento de agua. En este sistema también pueden presentarse problemas de lodos y algas.

**Sistema cerrado de recirculación.** Necesitan el tratamiento de agua para evitar la corrosión, pero rara vez se plantearán problemas de incrustaciones, lodos y algas.

**Sistema abierto de recirculación.** Este sistema invariablemente tiene problemas de corrosión y de incrustaciones. Durante los meses cálidos se hace necesario el control de lodos y algas. A este sistema pertenecen los sistemas de enfriamiento con Torre.

#### 4.3.6 CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS ABIERTOS DE RECIRCULACIÓN DE AGUA

Aunque los sistemas cerrados y los de agua que circula una sola vez no tienen características especiales que interesen al ingeniero de tratamiento de aguas, los sistemas abiertos de agua recirculada tienen características que pueden interesarle. Estas son la evaporación, acción del viento, ciclos de concentración y control por drenaje.

**Evaporación.** La pérdida por evaporación en una torre de enfriamiento o en un condensador evaporativo es aproximadamente el 1% de la cantidad de agua que circula por cada 5.5 °C de salto térmico a través de la torre. Este dato es suficientemente preciso para la mayoría de los cálculos.

**Pérdidas de agua en los sistemas de rociado.** En los sistemas de rociado, el flujo de aire arrastra pequeñas gotas (junto con las sales disueltas) desde la torre, pozo de rociado o condensador de evaporación, con la consiguiente pérdida de agua en el sistema. Esta pérdida de agua varía con cada tipo de torre de enfriamiento, pero pueden tomarse como valores normales los porcentajes indicados en la siguiente tabla:

Tabla 9 Pérdidas por flujo de aire en diferentes equipos

EQUIPO DE ELIMINACIÓN DE CALOR	PÉRDIDAS POR FLUJO DE AIRE (%)
Depósitos de pulverización o tanques de rocío	1 - 5
Torres atmosféricas	0.3 - 1
Torres de agitación mecánica	0.1 - 0.3
Condensadores evaporativos	0 - 0.1

(CARRIER)

**Ciclos de concentración.** El número de ciclos de concentración expresa la relación entre los sólidos disueltos en el agua que recircula y los sólidos disueltos en el agua de reposición. Por ejemplo, 3 ciclos de concentración indican que la cantidad de sólido disuelto en el agua que recircula es tres veces mayor que en el agua de depósito. El proceso evaporativo que se emplea para enfriar agua en los sistemas abiertos de recirculación concentra los sólidos disueltos en el agua; esta es una característica de las torres de enfriamiento, condensadores evaporativos y pulverizadores.

#### 4.4 TRATAMIENTO

El tratamiento a que debe someterse el agua para uso general en una planta depende de las sustancias que acarrea en suspensión y en solución y del uso principal que se le va a dar. Las operaciones que frecuentemente se aplican a toda o la mayor parte del agua de la planta se denominan generalmente tratamiento primario; posteriormente pueden ser necesarias operaciones de acondicionamiento secundario

para usos específicos, como generación de vapor, enfriamiento o elaboración de materiales. Si la planta requiere agua de calidad progresivamente más elevada para diversos fines, se diseñan etapas sucesivas de tratamiento.

Las operaciones que aquí se consideran como tratamiento primario son: clarificación, filtrado y ablandamiento, que se hallan descritas minuciosamente en muchos libros e informes técnicos, junto con la eliminación del hierro, manganeso y sulfuros, impurezas especialmente molestas en algunos abastecimientos de agua. (9)

Si el agua que hay que tratar contiene desperdicios industriales, materia orgánica, tóxicos, contaminantes, etc. que en general se comporta como aguas negras, debe sufrir un tratamiento para lograr reducir estos efectos indeseables divididos en varias etapas:

#### 4.4.1 TRATAMIENTO PRELIMINAR

Tiene por objeto eliminar los sólidos de tamaño considerable como piedras, papeles, plásticos, madera, lodos, arena, etc. Se efectúa por medio de un desarenador, que es un canal de velocidad constante. Los sólidos grandes se quedan detenidos por medio de rejillas, así como las arenas y lodos se sedimentan.

#### 4.4.2 TRATAMIENTO PRIMARIO

- *Sedimentación*: Las impurezas son separadas aprovechando únicamente la fuerza de gravedad y la coalescencia natural de las partículas.
- *Coagulación*: Se agregan sustancias que induzcan y aceleren la coalescencia y sedimentación de las partículas sólidas, sustancias coloidales y macromoléculas. Generalmente se usa hidróxido de hierro, sulfato de hierro u otros polielectrolitos.
- *Floculación*: Cuando se agita el agua mecánicamente, se forman agregados o se aumenta la coalescencia de partículas, que se sedimentan fácilmente.
- *Precipitación química*: Se agregan sustancias como carbonato de calcio, sulfato de sodio o fosfato de aluminio para eliminar las impurezas disueltas en el agua (dureza del agua, hierro, manganeso, fosfato, etc.)

#### 4.4.3 TRATAMIENTO SECUNDARIO

Elimina la materia orgánica disuelta en el agua; con tal propósito se puede emplear el método químico o procedimientos biológicos. La precipitación química se hace con polielectrolitos, sulfato de hierro, sulfato de aluminio, que forman un lodo que se sedimenta. Da buenos resultados pero es costosa. La oxidación biológica es sin duda el método preferido de tratamiento secundario: consiste en la oxidación de la materia orgánica por medio de microorganismos en condiciones anaeróbicas o aeróbicas. Existen tres métodos para efectuar la oxidación biológica:

1. Lagunas de oxidación, estabilización o aeración
2. Filtros biológicos, y
3. Lodos activados.

Cada uno de estos métodos es eficaz si se usa en los intervalos de operación en que su eficiencia es mayor.

#### 4.4.4 TRATAMIENTO TERCIARIO

Implica la purificación del agua para volverla a utilizar nuevamente. El tratamiento se selecciona de acuerdo con el uso a que se destine esa agua. Cuando se va a utilizar el agua para el transporte de materiales no se le da ningún pretratamiento, pero si se desea utilizarla para generar vapor, enfriamiento o lavar a presión, es necesario ablandarla y desoxigenarla. Para poder recircular agua en la industria alimentaria y en la de papel es necesario desinfectarla y desmineralizarla. (28)

#### 4.5 ACONDICIONAMIENTO DE AGUA PARA TORRES DE ENFRIAMIENTO

El agua ha tenido un uso extensivo en operaciones de enfriamiento debido a que es un excelente medio de enfriamiento y también debido a que es abundante y barata. La necesidad de disipar calor en ciertas operaciones industriales es casi universal. En la planta de energía, ha de condensarse el vapor que sale de la caldera. Se han de condensar los vapores de las columnas de fraccionamiento en las refinerías de petróleo, en las destilerías y en las fábricas de muchos productos químicos. Requieren refrigeración los hornos metalúrgicos, los motores diesel o de gas, los picos de soldadores, los reactores, las unidades de acondicionamiento de aire, y éstos son sólo algunos ejemplos. El agua es el medio refrigerante universal. (9)

Toda agua en estado natural contiene sólidos disueltos, gases y una variedad de materia suspendida en diferentes cantidades. Estos contaminantes pueden ser una fuente de varios problemas operativos. Los bicarbonatos y sulfatos de calcio, sodio y fierro son los sólidos más comúnmente presentes. La cantidad de cada uno de ellos dependerá de su abundancia en la tierra donde se encuentra situada el agua de donde se obtiene. El  $\text{CO}_2$  es el más común de los gases disueltos encontrados en el agua y las altas concentraciones existen en aguas poco profundas y lagos debido a los procesos de putrefacción. La materia suspendida puede consistir en sedimento y una gran variedad de constituyentes orgánicos. Todo sistema hidráulico es capaz de desarrollar algas y limo en diferente grado si las condiciones ambientales lo permiten. (6)

La presencia de materia disuelta, y suspendida puede conducir a la precipitación bajo condiciones apropiadas causando incrustación y suciedad en procesos y equipo, y sistemas de distribución. Las altas concentraciones de materia suspendida pueden provocar erosión. Ambos problemas pueden ser traducidos en pérdidas monetarias debido a mantenimiento costoso y pérdidas de tiempo en el reemplazo de equipo. En el caso de los constituyentes orgánicos, se puede inducir un ambiente en el cual los microorganismos se puedan desarrollar, causando serios riesgos a la salud en ciertas aplicaciones. Las temperaturas moderadas en muchos sistemas de enfriamiento favorecen el desarrollo de algas y bacterias. El lodo resultante puede impedir seriamente la transferencia de calor o estorbar el paso del agua. Para controlar esta proliferación orgánica, comúnmente se agrega cloro al agua; también se ha usado algo el bromo en vez de cloro. Compuestos orgánicos clorados, con propiedades biocidas, como los

clorofenatos, se emplean cuando el agua contiene tanta materia orgánica no viva, que el consumo de cloro sería excesivo. Los hongos causan serios daños a las torres de enfriamiento de madera, en particular a las partes que están húmedas, pero no se cubren de agua, como ocurre con los eliminadores de niebla. El procedimiento más práctico es tratar la madera con fungicidas, ya sea antes de construir una nueva torre o en cuanto se observe el primer ataque de los hongos o se tema su aparición.

Debido a los problemas inherentes de incrustación y riesgos potenciales a la salud en algunas aplicaciones, el tratamiento de agua de torres de enfriamiento debe ser considerado cuidadosamente en la totalidad del diseño del sistema. El tratamiento de agua para conseguir con ella resultados óptimos cuando se emplea en refrigeración es distinto del que requiere la misma agua si ha de alimentar una caldera. Aunque la separación del cieno es conveniente, por lo general no es preciso ablandar el agua para enfriamiento. Un agua con bicarbonato cálcico deposita incrustaciones en una superficie metálica caliente, pero en la mayor parte de los casos, el depósito puede evitarse a temperaturas hasta el punto de ebullición a la presión atmosférica mediante la adición al agua de unas 2 ppm de un fosfato complejo que inhibe la cristalización de carbonato cálcico. También se emplea ácido sulfúrico, bien regulado, para neutralizar parte de la alcalinidad.

El agua de enfriamiento corroe casi siempre al acero y puede atacar a otros metales del equipo por donde pasa. En los sistemas con recirculación, esta corrosión se controla por adición de inhibidores, como un fosfato vítreo complejo solo o con un cromato. (9)

#### 4.5.1 PROBLEMAS OPERATIVOS

Además de los minerales comunes absorbidos del suelo, las aguas naturales pueden también ser afectadas por el drenaje industrial, lo que casi siempre provoca condiciones de acidez. Los equipos de procesamiento defectuosos pueden introducir una variedad de contaminantes tales como aceite, grasas, ácidos, bases, e hidrocarburos directamente al sistema de enfriamiento. Los contaminantes aéreos indeseables como el sulfato de hidrógeno y vapores ácidos provenientes de equipo de proceso y ceniza aérea de equipos de calentamiento con carbón pueden ser acarreados dentro de la torre y así disolverse en el agua circulante. Sin un control apropiado, la presencia de algunos de éstos materiales causará corrosión de las partes metálicas, deterioro de la madera, o pérdida del desempeño térmico general en el sistema de enfriamiento.

Son cinco los tipos de problemas en el agua de enfriamiento encontrados en los sistemas de torres de enfriamiento. Estos son: la *formación de costra o incrustación*, *corrosión*, *crecimiento orgánico* (algas y limo bacteriológico), *materia suspendida* (arena, sedimento), y el *escape de aceite*. Con la excepción del escape de aceite, estos problemas pueden ser controlados con técnicas estándar de tratamientos de agua. Los diferentes tipos de tratamiento han sido empleados con varios grados de éxito. El tratamiento empleado incluye el uso de un sistema circulatorio con una pequeña cantidad de agua tratada de compensación, con o sin la adición de inhibidores químicos al agua circulante.

Además de los cuatro primeros problemas, que provienen del origen del agua, el escape de aceite dentro del agua también causa problemas. El aceite interferirá con otros tratamientos empleados. Por esto es que es deseable el eliminar el escape de aceite lo más pronto posible de los equipos conforme se vaya desarrollando.

Por la pérdida de agua en la evaporación, las sales contenidas en el agua tienden a concentrarse y pueden precipitarse, causando incrustación en el sistema. La tendencia a la incrustación del agua recirculada puede ser controlada por un apropiado decremento a un bajo nivel de contenido de sal y por la adición de químicos. Estos químicos son inhibidores que previenen la precipitación cuando ocurre. Los problemas por corrosión encontrados en el enfriamiento por evaporación concierne al circuito de enfriamiento (condensadores, intercambiadores) y a la torre de enfriamiento por sí misma.

El oxígeno,  $\text{CO}_2$ , y varios químicos suelen reducir el incrustamiento pero pueden causar erosión. El control de la corrosión es suplido por el uso de inhibidores como los cromatos, polifosfatos, silicatos, y álcalis. La corrosión de la torre por sí misma es debida a condiciones particulares que existen dentro de ella (aire, humedad, y temperatura) y también al tratamiento del agua. Todo material de construcción que vaya a ser expuesto a estas condiciones deberá ser escogido cuidadosamente. La infraestructura y los tubos para la distribución en los cabezales deben estar bien hechos con acero galvanizado, acero recubierto, acero inoxidable, y silicon bronceado. (6)

Aunque la madera usada en las torres de enfriamiento es muy resistente a la putrefacción, sufre daños químicos y bioquímicos. Cuanto más alcalina es el agua tanto mayor es su acción debilitante sobre la madera por extraerle la lignina y otros componentes. Por esta razón, conviene que el pH no sea superior a 7. La cloración también ha de limitarse al mínimo imprescindible para evitar la formación de Iodo. (9)

El incrustamiento y corrosión son un fenómeno relativo. Las propiedades del agua que influencia a ambas es la dureza del calcio, la alcalinidad, sólidos totales disueltos, pH, y la temperatura. Teóricamente, las condiciones mencionadas pueden ser controladas, por tanto el agua puede estar en equilibrio y ni la corrosión ni la incrustación se desarrollaran. En la práctica, sin embargo, este equilibrio es difícil de lograr, ya que es una condición límite y se debe mantener un delicado balance. La corrosión del hierro y acero es una simple oxidación entre el metal formando óxido de hierro debido a una acción galvánica. La tasa de oxidación es más rápida con altas concentraciones de oxígeno. Es por esto que la corrosión es más problemática en el agua de recirculación que en las de un sólo uso. El ataque es más alto en el agua con mayor acidez debido a que el pH bajo del agua es un mejor electrolito. Por tanto, el aumento del pH a punto de equilibrio decreta la corrosión. Sin embargo, el aumento en el pH causa la formación de incrustados. El principal agente formador de incrustación en el agua de enfriamiento es el carbonato de calcio, el cual tiene una solubilidad de aproximadamente 15 ppm y es formado por la descomposición del bicarbonato de calcio.

La incrustación resulta cuando el límite de solubilidad del carbonato de calcio es alcanzado, donde el punto de precipitación en las superficies de los tubos ocurre. El alcance de la precipitación del carbonato de calcio está en función de la composición del agua y de la temperatura. La alcalinidad, los sólidos disueltos, y el pH determina las características de la incrustación. El decremento del pH por la adición directa de ácido o

por carbonización puede bajar la tendencia al incrustamiento del agua pero con ciertas limitaciones. Si el agua está en el lado de equilibrio de incrustación, el aumento de la temperatura incrementará el depósito de escamas. El incrustamiento de carbonato de calcio no es apropiado debido a la resistencia hacia la transferencia de calor en los equipos de intercambio. El incrustamiento y la corrosión no ocurrirán simultáneamente, aunque es posible debido al diferencial de temperatura en el sistema. El agua puede ser de un lado corrosiva a la entrada y del otro lado formadora de escamas a la salida. Si el agua está cerca de esta condición de equilibrio, las tasas de corrosión e incrustación pueden existir, pero tenderán a ser muy pequeñas.

En sistemas de no recirculación del agua la corrosión y la incrustación son un problema menor, pero en sistemas donde hay recirculación el agua se concentrará, además de que el agua reaerea en la torres de enfriamiento, provocando que sea más agresiva como corrosivo. El propósito en el agua de enfriamiento recirculado es mantener un acondicionamiento del agua; sin embargo, es algo difícil de conseguir debido a que los sólidos disueltos se concentran por las pérdidas por evaporación.

Haciendo un resumen de lo anterior, la materia disuelta naturalmente en el agua consiste principalmente en calcio en forma de bicarbonato (dureza temporal) y sulfatos y cloruros (dureza permanente). La tendencia del agua a la incrustación cuando es alcalina por el calentamiento, o a ser corrosiva depende del balance de todos estos constituyentes.

La incrustación formada en condiciones moderadas de temperatura es debida a la dureza temporal (bicarbonato) que es convertida a carbonato de calcio, la cual ocurre por el calentamiento o incremento de la alcalinidad a tal grado que haya una saturación de carbonato de calcio. La solubilidad del carbonato de calcio también afecta a la corrosión.

#### 4.5.2 CONTROL DE INCRUSTACIÓN Y DEPÓSITOS

Cuando el agua se calienta o evapora, la formación de incrustaciones insolubles puede causar serios problemas en los sistemas de enfriamiento. Las incrustaciones crean una capa protectora que reduce la corrosión, pero al mismo tiempo también reduce la conductividad térmica y por tanto su capacidad de transmisión térmica.

El depósito de incrustaciones más común en los sistemas de enfriamiento es el carbonato de calcio, aunque también puede haber pequeñas cantidades de carbonato magnésico y sulfato cálcico. Algunas aguas con gran contenido de hierro dejan también un depósito de óxido ferroso. Los polifosfatos, que se emplean para evitar la formación de incrustaciones de carbonato de calcio, pueden precipitar y formar un depósito de fosfato cálcico.

La solubilidad del  $\text{CaCO}_3$  y del sulfato de calcio, dos de las sustancias que lleva el agua disueltas, disminuyen con el aumento de la temperatura (fig. 17). En un mismo sistema de agua, en las superficies calientes, como las de los condensadores, se producen con mayor facilidad las incrustaciones. (5)

**Incrustaciones de carbonato de calcio.** Los principales factores que determinan la formación de incrustaciones de  $\text{CaCO}_3$  en un sistema son:

1. Gran alcalinidad de anaranjado de metilo en ppm de  $\text{CaCO}_3$ .
2. Gran contenido de calcio, en ppm de  $\text{CaCO}_3$ .
3. Elevado pH.
4. Alta temperatura.
5. Gran % de sólidos disueltos.

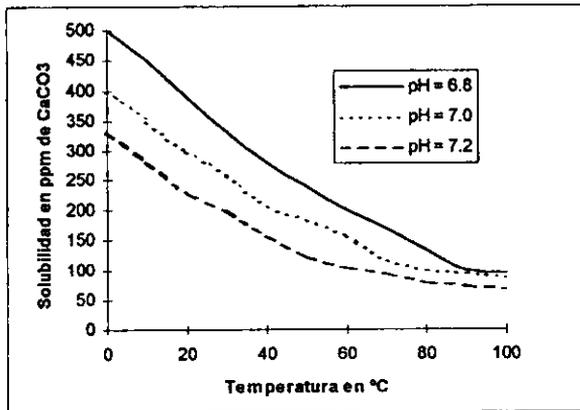


Fig. 17 Solubilidad del  $\text{CaCO}_3$  a diferente pH.  
(CARRIER)

Normalmente la alcalinidad del naranja de metilo es una buena medida de la cantidad de bicarbonato cálcico que hay en el agua. El carbonato cálcico se forma por descomposición del bicarbonato, según la siguiente reacción química:



Inversamente los carbonatos se convierten en bicarbonatos por adición de  $\text{CO}_2$  u otras sustancias (el  $\text{CO}_2$  en el agua forma ácido carbónico). Esto explica el aparente aumento de solubilidad del  $\text{CaCO}_3$  cuando disminuye el pH (fig. 17); el carbonato que se disuelve es en realidad bicarbonato, que es varias veces más soluble que el carbonato. La adición de sustancias ácidas produce también otro efecto, cambiando los carbonatos y bicarbonatos en otras sustancias más solubles, lo que permite mayores concentraciones de sustancias químicas en el agua. Una elevada alcalinidad del anaranjado de metilo, gran contenido de calcio, contribuyen a la formación de depósitos de  $\text{CaCO}_3$ .

Como se ve en la fig. 17, un bajo pH aumenta la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$ , mientras que al aumentar el pH se facilita la precipitación del  $\text{CaCO}_3$ .

El aumento de la temperatura disminuye la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$  y favorece la formación de incrustaciones. Si la concentración de sólidos disueltos es elevada, aumenta la propensión a las incrustaciones; no obstante, su efecto no es grande.

**Incrustaciones de sulfato de calcio.** El sulfato de calcio tiene una gran solubilidad, y rara vez constituye problema en el tratamiento de aguas, a no ser que exista una cantidad excesiva en la totalidad del agua. Puede formarse por la adición del SO<sub>2</sub> del aire que se disuelve en el agua para formar ácido sulfuroso, H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, o sulfúrico, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, el que a su vez, reacciona con el carbonato de calcio, o también por la acción del ácido sulfúrico que se utiliza para control de las incrustaciones. El sulfato de calcio se limita a 1200 ppm de CaCO<sub>3</sub> (que corresponde a 1630 ppm de CaSO<sub>4</sub>). Para regular esta concentración se utiliza el drenaje o purgado.

**Depósitos de óxido de hierro.** En el caso de aguas de pozo que contienen mucho hierro natural, al descomponerse el bicarbonato ferroso se deposita óxido de hierro según la reacción siguiente:



**Barros.** El barro puede producirse por la existencia de productos de la corrosión del sistema. Los polifosfatos que se utilizan para evitar la formación de incrustaciones de CaCO<sub>3</sub> pueden provocar una precipitación de polifosfato cálcico, cuando la concentración de ortofosfato es demasiado alta. El barro puede formarse en los depósitos de agua y en las tuberías, por lo que para evitar a formación de barros se recomienda una velocidad mínima del líquido de 1 m/s.

#### 4.5.2.1 Predicción de la tendencia a la formación de incrustaciones

El agua que forma una incrustación ligera puede ser corrosiva, mientras la que forma incrustaciones grandes es menos propensa a esta acción. Generalmente, las aguas corrosivas no forman incrustaciones. Si se hace un tratamiento equilibrado de las aguas, el resultado debe ser un agua que no sea corrosiva ni forme incrustaciones, o al menos que éstas sean ligeras. Para predecir estas tendencias se utilizan dos índices.

##### *Índice de saturación de Langelier*

El profesor W. F. Langelier adelantó la idea, que hoy se acepta normalmente, de utilizar un índice de saturación calculado para predecir las tendencias corrosivas o de formación de incrustaciones del agua. El CaCO<sub>3</sub> es el ingrediente principal de las incrustaciones que se encuentran en las superficies intercambiadoras de calor en los sistemas de enfriamiento de agua. La incrustación que se forma a temperaturas moderadas (de 10 a 55 °C) está producida por la conversión del bicarbonato de calcio en carbonato, por calentamiento. La incrustación también es afectada por el aumento de alcalinidad suficiente para producir una sobresaturación con respecto al carbonato. El pH tiene un efecto muy marcado sobre la solubilidad del carbonato de calcio. (5)

El índice de saturación de Langelier se determina conociendo condiciones específicas del agua de enfriamiento como temperatura, contenido de sólidos disueltos, calcio total, alcalinidad total y pH, y se calcula de la siguiente manera:

$$\text{pH}_s = (9.3 + A + B) - (C + D)$$

donde:

A = sólidos totales, en ppm.

B = temperatura °F.

C = dureza de calcio, expresada en ppm de CaCO<sub>3</sub>.

D = alcalinidad, expresada en ppm de CaCO<sub>3</sub>.

El ecuación de Langelier para el índice de saturación es:

$$I \text{ (índice de saturación)} = \text{pH (actual)} - \text{pHs}$$

Si el índice de saturación es 0, en el agua existe un balance químico. Si el índice es positivo, la tendencia a la formación de incrustación es existente. Finalmente, si el índice es negativo, hay una tendencia del agua a la corrosión. (6)

Tabla 10 Tendencia del agua a partir del índice de Langelier

INDICE DE SATURACIÓN DE LANGELIER	TENDENCIA DEL AGUA
+ 2.0	Formación de costra; para aplicaciones prácticas no corrosivas
+ 0.5	Ligeramente corrosiva y forma costra
0.0	Equilibrada, pero es posible la picadura por corrosión
- 0.5	Ligeramente corrosiva y no forma costra
- 2.0	Fuerte corrosión

(CHERESMIISINOFF)

Cuando el índice de Langelier es + 0.5, o mayor, generalmente se producen incrustaciones. La importancia de éstas aumenta en proporción logarítmica con los valores del índice de Langelier. Por ejemplo, un agua que tenga un índice de 2 resulta, aproximadamente, con unas incrustaciones 33 veces más importantes que otra que tenga un índice de + 0.5, en el mismo sistema. Aunque esta relación no indica con exactitud nada en el aspecto cuantitativo, sí indica que las incrustaciones pueden ser importantes cuando alcanza un índice de 2. (5)

### *Índice de estabilidad de Ryznar*

El índice de estabilidad de Ryznar proporciona un método empírico para determinar la tendencia a la formación de incrustaciones y se basa en un estudio sobre los resultados operativos de aguas que tienen distintos índices de saturación.

$$\text{índice de estabilidad} = 2 \text{ pHs} - \text{pH}$$

pH = pH obtenido por análisis

pHs = pH calculado de saturación de CaCO<sub>3</sub>

Este índice que siempre es positivo, se usa con frecuencia junto con el índice de Langelier para predecir con más exactitud las posibilidades de corrosiones y depósitos en las tuberías de agua.

Tabla 11. Predicción de las características del agua mediante el índice de Ryznar

ÍNDICE DE ESTABILIDAD DE RYZNAR	TENDENCIA DEL AGUA
4 - 5	Capa gruesa de incrustación
5 - 6	Capa fina de incrustación
6 - 7	Poca incrustación o corrosión
7 - 7.5	Corrosión importante
7.5 - 9	Mucha corrosión
9 o mayor	Corrosión inadmisibles

(CARRIER)

El valor óptimo para el índice de estabilidad es 6.6. (6)

#### 4.5.2.2 Prevención de las incrustaciones

Para evitar o aminorar la formación de incrustaciones pueden seguirse varios métodos.

1. El aumento de la concentración de sólidos producido por la evaporación en un sistema de recirculación puede controlarse mediante drenaje acompañado de incorporación de agua nueva.
2. La tendencia del  $\text{CaCO}_3$  a precipitar puede evitarse añadiendo al agua ciertas sustancias químicas, por ejemplo, polifosfatos, que tienden a mantener el carbonato de calcio en disolución.
3. El pH del agua puede reducirse añadiendo un ácido (generalmente sulfúrico). La cantidad de ácido debe ser la suficiente para reducir la alcalinidad, pero no para crear acidez que produzca corrosión.
4. Para eliminar elementos como el calcio, magnesio y fierro, que forman compuestos relativamente insolubles, el agua puede sufrir un tratamiento previo a su utilización.

**Método de Drenaje o Purga.** Este método se utiliza en todos los sistemas de recirculación abiertos, donde se evapora el agua. Puede ser suficiente en algunos casos, pero generalmente se añade algún otro tratamiento para evitar la formación de incrustaciones, la corrosión, o ambas a la vez.

**Preventivos de Incrustaciones.** Algunas sustancias evitan la formación de cristales y por tanto, pueden utilizarse para evitar la formación de incrustaciones. Estos agentes aumentan la solubilidad de las sales y conducen a un estado de sobresaturación sin que se precipite la sustancia disuelta. Algunas de estas sustancias son polifosfatos, taninos, ligninas y almidones. Una combinación de éstos siempre es más eficaz que el empleo de uno solo.

Los polifosfatos en una proporción de 2 a 5 mg/ft se emplean con mucha frecuencia para evitar o reducir la formación de incrustaciones. Los polifosfatos desde el punto de vista molecular son fosfatos deshidratados, se convierten eventualmente en ortofosfatos cuando se disuelven en el agua; esta conversión se producen en el sistema de recirculación del agua. Este es el motivo por el que los polifosfatos deben almacenarse en forma seca. Si la concentración de los ortofosfatos en el sistema fuera demasiado grande, podría deducirse un sedimento de ortofosfato cálcico, especialmente en aguas que contienen mucha cal. El contenido de ortofosfatos del agua debe limitarse

a dos o tres veces el contenido de polifosfatos, por medio del drenaje. Esto es muy importante cuando se utilizan los residuos de polifosfato en el control de la corrosión. Existen métodos para determinar el pH de saturación del fosfato cálcico.

**Empleo de ácidos.** Los polifosfatos pueden emplearse solos o con tratamiento mediante ácidos y preventivos de la corrosión. Cuando se añade ácido al sistema se puede permitir una mayor concentración total de sólidos. El bicarbonato cálcico se convierte en sulfato cálcico más soluble y estable, según la reacción siguiente:



Es decir, el tratamiento mediante ácidos reduce la alcalinidad y en virtud de esta reacción evita la sobresaturación del  $\text{CaCO}_3$ . Al mismo tiempo, el sulfato de calcio es mucho más soluble que el carbonato de calcio. El empleo de ácido permite una mayor concentración de sólidos disueltos sin precipitación de carbonato. Aproximadamente se estima que hace falta 1 mg de ácido sulfúrico en los sistemas de agua recirculada por cada mg de alcalinidad de anaranjado de metilo, en  $\text{CaCO}_3$  para neutralizarla.

Ocasionalmente, en vez de ácido sulfúrico se utiliza el ácido sulfámico, este es una sustancia blanda y cristalina, es de manejo seguro cuando está seco y mucho más conveniente, aunque también mucho más caro, que el ácido sulfúrico. Para evitar la formación de compuestos amoniacales, que atacan mucho al cobre, la temperatura de la solución ácida no debe superar los 70 °C.

**Eliminación de la dureza del agua.** Rara vez es necesario eliminar la dureza del agua de depósito en los sistemas que utilizan condensador de agua, aunque cuando se trata de agua de calderas es lo que se hace comúnmente. En el intercambio de iones que se produce en la zeolita, el calcio se sustituye por el sodio, que es mucho más soluble. No obstante, el ablandamiento de las aguas por medio de la zeolita no reduce la alcalinidad del agua de depósito, y para evitar la formación de incrustaciones puede ser necesario un drenaje bastante importante. Este es sólo uno de los distintos procedimientos que existen para ablandar el agua.

#### 4.5.3 CONTROL DE LA CORROSIÓN

La corrosión en los sistemas abiertos de recirculación en los que las gotas de agua entran en contacto con el aire, es un problema mucho más importante que la formación de incrustaciones. En algunas zonas industriales no es raro encontrar tuberías o partes de una torre de enfriamiento deterioradas por la corrosión en el transcurso de sólo dos o tres años; en atmósferas muy corrosivas las tuberías pueden perforarse en menos de un año.

Los productos de la corrosión reducen la capacidad de las tuberías, aumentan las resistencias de rozamiento y los costos de bombeo. Los productos de la corrosión tienen un volumen varias veces mayor que el del metal al que sustituyen y con frecuencia pueden obstruir o taponar las tuberías de pequeño diámetro.

**Tipos de corrosión.** En un sistema de acondicionamiento de agua de enfriamiento pueden distinguirse diversos tipos de corrosión en las tuberías del agua:

1. Corrosión uniforme
  2. Corrosión por picaduras
  3. Corrosión galvánica
  4. Corrosión por pilas de concentración o celdillas
  5. Erosión-Corrosión
- (5)

#### 4.5.3.1 Causas de la corrosión

Aunque son muchos los factores que contribuyen a la corrosión en los sistemas de refrigeración, el principal factor es el oxígeno disuelto en el agua de enfriamiento. La reacción del oxígeno disuelto con los metales féreos aumenta con la temperatura, como puede verse en la fig. 8. Los principales factores que controlan las características corrosivas del agua son:

1. La concentración del oxígeno disuelto
  2. La temperatura
  3. El contenido de anhídrido carbónico
  4. El pH
  5. Los sólidos disueltos
  6. Los sólidos en suspensión
- La velocidad

El agua neutra (pH=7) saturada de aire corroe el hierro a una velocidad tres veces mayor que el agua exenta de aire. El agua caliente que contiene oxígeno lo hace a una velocidad tres o cuatro veces mayor que el agua fría.

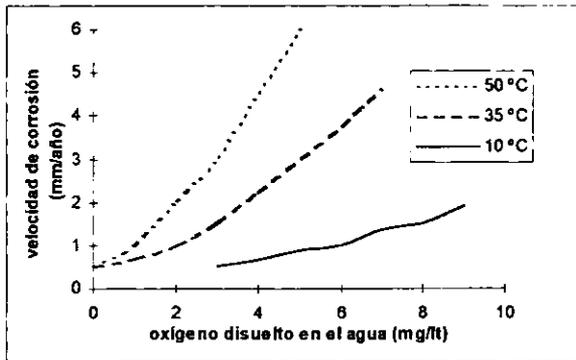


Fig. 18 Efecto de la concentración de oxígeno sobre la corrosión a diferentes temperaturas (CARRIER)

Muchas aguas naturales contienen sustancias disueltas, tales como el anhídrido carbónico, oxígeno, cloruros y sulfatos, los cuales corroen los metales en contacto con el agua. La corrosión afecta los intercambiadores de calor, bombas, torres de enfriamiento, lavadores de aire y tuberías. En un sistema abierto de recirculación, como una torre de enfriamiento, un condensador evaporativo o un lavador de aire, la mayor parte de la corrosión se debe a impurezas ácidas absorbidas del aire por donde pasa el agua. Esto ocurre en las grandes ciudades en las que el agua tiene muy poca alcalinidad y la combustión del carbón y azufre de los carburantes produce grandes cantidades de SO<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> en los humos procedentes de los hogares y que pasan a impurificar el aire. La tabla 12 indica algunas cantidades de estos gases existentes en la atmósfera.

Tabla 12 Datos de los gases contenidos en diferentes atmósferas

AIRE						
GAS	Fórmula	Rural		Urbano		
		% por volumen	presión parcial (kg/cm <sup>2</sup> )	% por volumen	presión parcial (kg/cm <sup>2</sup> )	presión parcial (kg/cm <sup>2</sup> )
oxígeno	O <sub>2</sub>	21	0.22	21	0.22	
anhídrido carbónico	CO <sub>2</sub>	0.03	0.00028	0.06	0.00063	
anhídrido sulfuroso	SO <sub>2</sub>	ninguno	ninguna	0.003	0.00028	

#### GASES DE COMBUSTIÓN

GAS	Fórmula	Carbón bituminoso		Aceites comestibles		Gas natural	
		% por volumen	presión parcial (kg/cm <sup>2</sup> )	% por volumen	presión parcial (kg/cm <sup>2</sup> )	% por volumen	presión parcial (kg/cm <sup>2</sup> )
oxígeno	O <sub>2</sub>	2	0.021	7	0.073	10	0.105
anhídrido carbónico	CO <sub>2</sub>	15	0.157	13	0.136	10	0.105
anhídrido sulfuroso	SO <sub>2</sub>	0.07	0.0007	0.03	0.00063	0.0001	0.0001

(CARRIER)

El pH se modifica con la concentración de CO<sub>2</sub> que forma ácido carbónico. Los pH bajos aumentan la corrosión. En el caso del hierro, la corrosión disminuye a medida que aumenta el pH del agua, y prácticamente desciende hasta un pH de 11. No obstante, no debe tolerarse un pH muy elevado porque ello supondría la formación de incrustaciones en los intercambiadores de calor y la designificación de las maderas de las torres de enfriamiento.

Los sólidos disueltos, particularmente los cloruros y los sulfatos, intensifican la acción corrosiva del oxígeno y del anhídrido carbónico. Las grandes concentraciones de sólidos aumentan la conductividad eléctrica del agua, y como la corrosión es esencialmente una acción electroquímica, los sólidos disueltos la afectan seriamente, particularmente cuando existen metales diferentes en el circuito del agua. Los sólidos en suspensión pueden arrastrar partículas de metal, o evitar la permanencia de las películas protectoras que se han formado por las sustancias preventivas de la corrosión. Un aumento en la velocidad del agua, generalmente aumenta la corrosión.

#### 4.5.3.2 Control de la corrosión

Para evitar la corrosión del acero puede utilizarse un recubrimiento de zinc. También se pueden utilizar diferentes recubrimientos orgánicos e inorgánicos, pero no en los sistemas de tuberías porque esta capa protectora no puede mantenerse eficazmente. Ciertas sustancias químicas, en pequeñas concentraciones, protegen el metal formando

una fina película o barrera monomolecular en su superficie que evita el proceso electroquímico de la corrosión. Estos inhibidores químicos reducen grandemente la velocidad de la corrosión.

La corrosión puede reducirse al mínimo mediante diferentes métodos:

1. Uso de inhibidores orgánicos o inorgánicos
2. Formación de una película de  $\text{CaCO}_3$  en las superficies metálicas
3. Control de pH entre 7.0 y 8.5
4. Eliminación del aire por métodos mecánicos

#### 4.5.4 CONTROL DE LODOS Y ALGAS

En esta parte se trata de los lodos y algas, organismos que afectan al funcionamiento de los equipos enfriadores de agua, y describe los métodos y sustancias químicas que se utilizan para controlar la suciedad de origen biológico. También incluye el deterioro de la madera.

##### 4.5.4.1 Clases de suciedad biológica

Los lodos están formados por microorganismos capaces de multiplicarse con rapidez produciendo grandes masas de materia orgánica. La tabla 13 enumera y da descripción de los organismos capaces de formar estos lodos orgánicos que se encuentran generalmente sólo en los sistemas de recirculación abiertos. Los lodos y algas impiden la correcta transmisión del calor en los condensadores porque se adhieren fácilmente a las superficies depositando una capa muy aislante.

Dichos m.o. pueden clasificarse según su naturaleza en algas, hongos y bacterias.

Tabla 13 Principales creadores de lodos

Clasificación aproximada	
Algas	Monocelulares, forman algunas veces capas viscosas
	Pluricelulares, en hojas o frondosidades
Hongos	Bacteria (esquizomicetos) que forman frecuentemente recubrimientos viscosos
	Mohos (mixomicetos) que forman hojas viscosas en una etapa de su vida
	Hongos (ascomicetos) una de cuyas especies, las levaduras, forman ocasionalmente agregados viscosos
	Hongos algoideos (ficomicetos) y hongos pedunculados (basidiomicetos) que raramente forman lodo, pero sus filamentos pueden retener lodos de otros organismos

(CARRIER)

Las especies de algas de mayor importancia en los sistemas de enfriamiento de agua se encuentran en los puntos del sistema que tienen acceso al aire y a la luz. En presencia de la luz solar estas plantas microscópicas desarrollan procesos de fotosíntesis para elaborar sus alimentos y desprender oxígeno. En las superficies metálicas las masas de algas vivas pueden acelerar la corrosión en forma de picaduras. Las algas muertas que se encuentran en los intercambiadores de calor pueden producir una acción corrosiva de tipo galvánico capaz de provocar importantes picaduras en el metal.

El segundo tipo de suciedad biológica es el conocido con el nombre de hongos sin clorofila, que no pueden elaborar su propio alimento. A este grupo pertenecen los mohos

y las levaduras, los cuales dependen del alimento que se encuentre en el agua y utilizan como fuente de alimento una amplia gama de materia nitrogenada y celulosa.

El tercer tipo lo constituyen las bacterias que forman lodos, aunque no todas las bacterias forman lodos. Un grupo reduce los sulfatos que contiene el agua convirtiéndolos en iones sulfito de gran poder corrosivo. Otro grupo utiliza el hierro soluble y los depósitos insolubles de óxido de hierro para formar una envoltura viscosa alrededor de sus células. Algunos tipos de bacterias se alimentan de los nitritos que se utilizan como preventivos de la corrosión.

#### 4.5.4.2 Control de la suciedad biológica

El tratamiento químico para combatir estos microorganismos es un método más eficaz que la limpieza mecánica, ya que dichos microorganismos se encuentran en muchas zonas inaccesibles, tanto en las tuberías como en los equipos de acondicionamiento. Los hongos y las bacterias viven en zonas oscuras del sistema, tales como los intercambiadores de calor y tuberías, así como también en zonas iluminadas como las torres de enfriamiento y condensadores evaporativos. Si estos lodos y algas llegan a formar depósitos de importancia, deben quitarse por medios mecánicos, en aquellos lugares donde sea posible hacerlo, antes de realizar el tratamiento químico.

**Sustancias químicas.** La tabla 14 contiene una lista de las sustancias químicas más empleadas en la eliminación de lodos.

Tabla 14 Sustancias químicas usadas para eliminar lodos

PRODUCTO QUÍMICO	NOMBRE COMERCIAL	ESTADO FÍSICO
Cloro	Cloro	Gas
Hipocloritos	Hipoclorito de calcio Hipoclorito de sodio	Cristalino
Fenoles de sodio clorados	Clorofenilfenato Tetraclorofenato Pentaclorofenato	Aglomerados
Permanganato potásico	Permanganato de potasio	Cristalino
Sulfato cúprico	Sulfato de cobre	Cristalino

(CARRIER)

Frecuentemente, los microorganismos que forman el lodo se hacen inmunes a un determinado algacida, aunque no al cloro. Esta característica obliga a cambiar periódicamente el tipo de algacida a emplear, lo que se conoce comúnmente como *choques*.

#### 4.5.4.3 Métodos de tratamiento

No existe ningún agente tóxico eficaz contra todos los tipos de suciedad biológica. La selección de cada tóxico habrá de fundarse en el tipo de microorganismos presente en el sistema y de las sustancias químicas que se utilicen para combatir las incrustaciones y la corrosión. Los métodos de empleo y la frecuencia con que se realice el tratamiento deben variarse en cada caso particular. Así, habrá compuestos que podrán ser utilizados para limpiar de algas las torres de enfriamiento, pero quedarán bacterias activas capaces de producir lodos en el intercambiador de calor. Los cromatos, aparte de ser inhibidores

de la corrosión, contribuyen a la eliminación de algunos organismos capaces de formar lodos. En general, deberá conocerse la compatibilidad entre los tóxicos empleados y los tratamientos que se den para evitar la corrosión e incrustaciones. Por todo ello, se acusa la necesidad de un especialista en tratamiento de aguas.

Es más económico y efectivo utilizar grandes dosis masivas que realizar un tratamiento continuo con plaguicidas y biocidas.

#### **4.5.4.4 Deterioro de la madera y su control**

La madera de las torres de enfriamiento está sometida a tres clases de deterioro: físico, químico y biológico, produciéndose las tres simultáneamente.

La madera se compone de celulosa, lignina y extractos naturales. La celulosa es lo que da a la madera su resistencia. La lignina actúa como aglutinante y mantiene la unión entre las fibras. Los extractos proporcionan a la madera su resistencia a la degradación, y son precisamente estas sustancias las que hacen que la madera de secoya sea tan duradera. No obstante, estos extractos son solubles, y el paso del agua los va eliminando. Aunque por este motivo no se reduce la resistencia mecánica de la madera, sí se va produciendo su degeneración con mayor rapidez.

El deterioro químico de la madera produce generalmente la deslignificación, que se acusa por el color blanquecino que adquiere la madera. Los agentes químicos que más intervienen en este proceso son los oxidantes como el cloro, y los álcalis como el bicarbonato de calcio, carbonato de calcio y carbonato de sodio. Este ataque químico se produce generalmente en las partes inundadas de la torre y en la entrada de agua.

Para evitar esta acción, el pH debe mantenerse por debajo de 8, y mejor aún entre 6 y 7. El cloro residual libre debe mantenerse por debajo de 1.0 mg/lit cuando se realiza una cloración intermitente.

El ataque biológico se produce en forma de putrefacción de la superficie y degeneración interior de la madera. Los microorganismos se alimentan de la celulosa y dejan libre la lignina, dando por resultado la pérdida de resistencia de la madera. La degeneración interna se produce en los plenos de las torres, los tabiques interiores, puertas, alojamientos de los ventiladores y soportes. La putrefacción superficial se produce en las zonas inundadas.

Los agentes que impiden el deterioro químico de la madera contribuyen a evitar la acción biológica superficial. Añadiendo periódicamente al agua germicidas antioxidantes que reducen las posibilidades de ataque. En las zonas expuestas a degeneración interna se debe rociar la madera con sustancias tóxicas para los microorganismos antes de que se produzca la contaminación y repitiendo esta operación con cierta frecuencia se puede establecer una norma de mantenimiento preventivo. Si se llevan a un laboratorio muestras tomadas periódicamente de la madera, se puede establecer el comienzo de un programa preventivo.

## 4.5.5 SÍNTESIS DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA TORRES DE ENFRIAMIENTO

### 4.5.5.1 Pretratamiento

La prevención de incrustación y corrosión es común en todo equipo de transferencia de calor, no sólo de la torres de enfriamiento. La necesidad de protección de la superficie del metal contra la corrosión en los sistemas de agua de enfriamiento es esencial para mantener una eficiencia máxima y vida útil del equipo. La corrosión que es inadecuadamente controlada puede conducir a un daño irreversible en el equipo y también genera la necesidad de reemplazar partes del equipo en tiempos no programados, y éstos pueden disminuir la eficiencia de la planta y su productividad.

Los programas efectivos para el control de la corrosión pueden anticipar problemas y también prevenirlos. El control de la corrosión en superficies metálicas depende de la formación y mantenimiento de una capa inhibidora protectora de corrosión en la superficie del metal. Esta capa protectora deber ser puesta durante una aplicación normal dentro de un programa de inhibición de corrosión; sin embargo, deberá haber un lapso estacionario antes que la película protectora se forme. Las superficies metálicas que están expuestas al agua de enfriamiento antes de que la película esté completamente formada, son candidatas a la acción de una acelerada corrosión dentro de la operación inicial del sistema.

Podemos definir al pretratamiento con un período inicial de acondicionamiento donde una película protectora de corrosión es aplicada a las superficies metálicas del sistema de enfriamiento. Las condiciones del pretratamiento deben conducir a la rápida formación de la barrera protectora. El procedimiento de acondicionamiento debe abarcar:

1. la limpieza y preparación de las superficies metálicas y
2. la aplicación de una concentración inhibidora más alta que lo normal.

La limpieza y el tratamiento se pueden realizar separada o combinadamente en un solo paso. Existen muchos procedimientos que pueden ser empleados en la limpieza de las superficies metálicas. Las técnicas más comunes incluyen el tumbado con agua, el tratamiento con un limpiador ácido o básico, y el uso de surfactantes especiales durante la limpieza. El sistema deberá ser limpiado con chorro de agua robustamente después de la limpieza para minimizar el ataque metálico debido a la acción residual de algún químico limpiador.

El tratamiento químico pasivador deberá comenzarse lo más rápido posible después de la limpieza. La acumulación de nuevos productos corrosivos puede ser iniciada si no se comienza rápidamente. Este debe ser realizado por un equipo de tratamiento dentro o fuera de operación del equipo.

Dentro de la operación del equipo (*on-line*) quiere decir que se debe elevar la concentración del inhibidor aproximadamente 3 veces más que la concentración normal mantenida. A grandes concentraciones la tasa en la que se forma la capa protectora es acelerada. Esto, por tanto, reduce el grado de corrosión inicial después de la limpieza, pero aún no protege la superficie metálica. La tasa en la cual la protección contra corrosión es establecida depende de la temperatura, pH y el inhibidor utilizado.

Fuera de la operación del equipo (*off-line*) supone un tratamiento del mismo, pero cuando este se encuentra sin operación. Los niveles de tratamiento son típicamente más altos; en consecuencia, la pasivación es completada más rápidamente. La pasivación con tratamiento de no-cromato generalmente utiliza compuestos como polifosfato, zinc, molibdeno, u otros inhibidores no-cromatos en combinación con varios agentes limpiadores activados. La tabla siguiente muestra la forma de dosificar los tratamientos dentro o fuera de operación:

Tabla 15 Procedimientos de pretratamiento.

<p><i>Procedimiento de tratamiento on-line</i></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Elevar la concentración del inhibidor dos o tres veces del nivel normal.</li><li>2. Circular la concentración elevada del inhibidor continuamente por 4 a 12 horas. Mantener el pH entre 6 y 7 y las temperaturas entre 49 y 60 °C. Si la temperatura ambiental debe ser utilizada, incrementar el tiempo de pretratamiento en un período de 24 a 48 horas.</li><li>3. Después de la pasivación, el sistema deberá ser desconcentrado. Reducir el nivel de la concentración del inhibidor al nivel normal de mantenimiento.</li><li>4. Iniciar el programa de tratamiento normal.</li></ol> <p><i>Procedimiento de tratamiento off-line</i></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Limpiar el sistema fuertemente de toda suciedad, aceite, incrustación, materia orgánica y productos corrosivos.</li><li>2. Después de la limpieza exhaustiva, llenar con agua fresca. Agregar la formulación del pretratamiento al nivel de concentración requerido.</li><li>3. Circular la solución a través del sistema, manteniendo el pH dentro de 6 a 7. La circulación deberá mantenerse por 2 a 12 horas en temperaturas de 49 a 60 °C.</li><li>4. Después de la pasivación, remover la solución de pretratamiento y reemplazarla con agua acondicionada de enfriamiento.</li><li>5. Colocar la unidad de vuelta a su lugar y operar normalmente.</li></ol>
---

(CHERESMISINOFF)

El primer método de control de corrosión en las torres de enfriamiento estipula la adición de varias ppm de cromato de sodio, éste es un excelente controlador de corrosión anódica en estas dosificaciones. Sin embargo, estos programas son ineficientes y caros. La llegada de un tratamiento a base de un compuesto sinergizante como el cromato de zinc-polifosfato no sólo hace que el control de la corrosión sea más eficaz, sino que disminuye los costos. Un programa de control excelente de corrosión requiere solo de 30-60 ppm de inhibidor mientras que uno ineficaz requiere de uno o dos veces más concentración.

El polifosfato también es utilizado en sistemas de enfriamiento para mantener un suficiente control de la corrosión. Las torres de enfriamiento son operadas dentro de un intervalo de pH de 6 - 7.5 para proveer de adecuada estabilidad al polifosfato. La factibilidad de operación de las torres de enfriamiento a niveles de pH altos, donde el potencial de corrosión es reducido, ha incrementado la popularidad de los programas de bajo cromato. (6)

#### 4.5.5.2 Resumen de Tratamiento de agua

El tratamiento de aguas correspondiente a estos sistemas está sintetizado en la tabla 16.

Tabla 16 Resumen de controles para el tratamiento de aguas

<b>ABIERTO CON RECIRCULACIÓN</b>	
Control de incrustación	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Drenaje</li> <li>2. Agentes activos de superficie, tales como polifosfatos</li> <li>3. Adición de ácido</li> <li>4. Ajuste de pH</li> <li>5. Ablandamiento</li> </ol> <p>Otras consideraciones:            Factor de suciedad adecuado            Temperatura de superficie            Temperatura del agua            Sistema de limpieza</p>
Control de corrosión	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Inhibidores de corrosión en altas concentraciones (200 - 500 mg/lit)</li> <li>2. Inhibidores de corrosión en bajas concentraciones (20 - 80 mg/lit)</li> <li>3. Control de pH</li> <li>4. Materiales de construcción adecuados</li> </ol>
Control de lodos y algas	Fenoles clorados Otros germicidas Cloro por hipocloritos o por cloro líquido

*Nota: los materiales abrasivos deben ser evitados en el sistema de agua, y no debe exceder en el tubo la máxima velocidad.*

#### 4.5.6 CONDICIONES RECOMENDADAS DE AGUA PARA TORRES DE ENFRIAMIENTO

La calidad del agua y las condiciones ambientales en la mayoría de las torres de enfriamiento industriales con materiales modernos de sus partes internas, los cuales son más livianos y resistentes permiten una amplia vida de servicio a éstas que son de construcción común.

Los diseños estándar de torres bajo condiciones normales asumen que la máxima temperatura del agua que entra a ella siempre será 120 °F (48.8 °C), aún en condiciones extremas. Las temperaturas por arriba de 120 °F, aun por un tiempo corto, pueden provocar un daño sobre el relleno de PVC, muchos componentes termoplásticos, el galvanizado y la madera. Aquellos procesos extraños que demandan la temperatura del agua por arriba de 120 °F, usualmente deberán ser revisados con un proveedor de torres de enfriamiento para que éste se asegure de colocar los materiales adecuados diferentes a los normales.

Normalmente las condiciones químicas del agua entran en los límites siguientes:

- El pH entre 6.5 a 8, aunque el pH disminuido hasta 5 es aceptable si no hay acero galvanizado en el sistema. El pH bajo ataca el acero galvanizado, el concreto y los productos derivados del cemento, fibra de vidrio y aluminio. El pH alto ataca la madera, fibra de vidrio y aluminio.
- Los cloruros expresados en NaCl por abajo de 750 ppm.
- El calcio (como CaCO<sub>3</sub>) por abajo de 1200 ppm -excepto en climas áridos donde el nivel crítico para la formación de incrustaciones puede ser muy bajo.

- Los sulfatos por abajo de 5000 ppm -si el calcio excede de 1200 ppm, los sulfatos deberán ser limitados a 800 ppm (menos en climas áridos) para prevenir la formación de incrustaciones.
- Sulfitos menores a 1 ppm.
- Silica (como SiO<sub>2</sub>) abajo de 150 ppm.
- Hierro abajo de 3 ppm.
- Manganeso abajo de 0.1 ppm.
- El índice de saturación Langelier entre -0.5 a +0.5.
- Sólidos insolubles abajo de 150 ppm si los sólidos son abrasivos.
- Los aceites y grasa por abajo de 10 ppm o de lo contrario se perderá desempeño térmico.
- No debe haber solventes orgánicos.
- No debe haber sustratos o materia orgánica que promueva el crecimiento de algas o limo.
- El cloro (del agua tratada) debe ser menor a 1 ppm libre residual para tratamientos intermitentes; y menor a 0.4 ppm libre residual para tratamientos continuos.

Estas condiciones son las normalmente definidas para la circulación del agua de enfriamiento para torres, incluyendo las concentraciones químicas causadas por la recirculación del agua. (6)

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

## V. CONCLUSIONES

De acuerdo con la explicación previa, de los diferentes equipos de enfriamiento de agua que han sido utilizados en la industria, las Torres de Enfriamiento cuentan con ventajas superiores con respecto a los estanques de enfriamiento o con los estanques de aspersión. Estas ventajas son de índole operacional, económica, y por tanto, ecológica. Entre éstas están:

- Requerimiento de mucho menor espacio por volumen de agua enfriado.
- Control más preciso de las condiciones de operación, y con esto, un diseño de los equipos de intercambio calórico más exacto.
- Mínimas pérdidas de agua (hasta un 60% de pérdida en estanques de aspersión por brisado y evaporación).
- Tiempos de residencia pequeños por enfriamiento y evaporación más rápida.
- Más convenientes por inspección y mantenimiento de sus accesorios como: bombas, eliminadores de agua, relleno, ventiladores, y demás equipo.
- Pueden satisfacer variaciones de carga.
- Pueden tener rangos de enfriamiento mayores.

### Objetivo Particular 1

Los criterios para la selección del tipo de torre más conveniente, tomando en cuenta sus características, se dividieron en 3 categorías de la siguiente forma:

#### A. *Requerimientos de la Planta Industrial*

- Tipología de proceso (metalúrgica, petroquímica, alimentaria, química, eléctrica)
- Posibles variaciones en la carga (por paro de equipos o aumento/disminución en la producción, mantenimiento, turnos por día)
- Necesidades de temperatura de entrada y salida del agua en la torre, referida al diseño de los equipos de intercambio calórico (rango)
- Aproximación requerida
- Proyección de crecimiento de la planta a futuro

Es necesario la descripción de estas variables para determinar los GPM que estarán recirculando, y proyectar si habrá o no variaciones en la carga. De esta manera se podrá seleccionar un tipo y modelo en específico que cubra con estos requerimientos, y que también esté dotada de mecanismos que permitan trabajarla a carga total o carga parcial, ya sea apagando ventiladores en torres con multiventiladores, con motores que cuenten con la característica de manejar dos velocidades (alta-baja) o reduciendo el flujo de aire con reductores de velocidad, entre otros.

Se deben evaluar los posibles incrementos en desplazamiento y enfriamiento de agua por crecimiento a futuro, para sobrediseñar y trabajar a carga parcial, o llegado el momento montar otro equipo. Además por tal cambio, analizar si se cambiará tubería, bombas o accesorios por otros de mayor capacidad.

## **B. Condiciones del sitio donde operará la Torre**

- Sequedad del aire
- Elevación de la zona
- Velocidad y dirección del viento
- Condiciones del suelo
- Espacio para la instalación
- Localización de la planta en la zona industrial (consideración por producción de niebla y ruido)
- Plano Lay-out de la planta, situando la locación tentativa de la torre, material de contacto y acceso
- Calidad, tratamiento, análisis y disponibilidad del agua
- Equipos que interfieran u otras torres de enfriamiento cercanas

Muy importante para el dimensionamiento, son las variables como la temperatura de entrada y salida del agua en la torre, la temperatura de bulbo húmedo de diseño y la aproximación, así como, la elevación que tenga la zona, velocidad y dirección del viento (si es torre atmosférica), área de transferencia (empaquete), coeficiente de transferencia de masa, entre otras. Es importante resaltar que la temperatura del agua a la entrada no debe pasar el límite de 120 °F (48.8 °C), ya que de lo contrario los materiales internos como el relleno, estructura, distribuidores de agua, etc. podrán sufrir daños, además de que a temperaturas elevadas la tendencia a la producción de incrustaciones es mucho mayor.

Otro aspecto de suma importancia es la calidad y disponibilidad del agua en el sitio, ya que se debe proyectar el tipo de tratamiento a realizar, así como generar un plan para la dosificación de los productos químicos y purgado en cambios de capacidad.

## **C. Características de las Torres**

- Tipo de tiro (mecánico o natural)
- Dispositivos de control de capacidad
- Tipo de relleno y características
- Tipo de eliminador de brisado
- Material de construcción
- Motores y voltaje (requerimientos mínimos de potencia)
- Costo de construcción o compra
- Costo de operación (bombeo y ventiladores)
- Costo de mantenimiento

Para el control preciso de la operación se recomienda el uso de torres que no dependen de las condiciones meteorológicas, por tanto, es más adecuado el uso de torres de tiro mecánico. Los materiales con los que están construidas las torres son muy importantes para proyectar el tipo de tratamiento de agua más conveniente, ciclos de mantenimiento, y para prever los posibles ataques al equipo, ya sean bioquímicos, químicos o físicos. Considerar que se debe montar una metodología que permita obtener el comportamiento ante modificaciones en el flujo de aire o flujo de agua o ambas, para

que de esta manera se opere la torre de la forma más conveniente frente a posibles cambios de capacidad.

Una vez estudiados estos factores se puede evaluar el tipo de torre más conveniente para ciertas aplicaciones industriales.

## **Objetivo Particular 2**

Con respecto a este objetivo se reveló que la calidad del agua es uno de los aspectos críticos en la eficiencia y rendimiento del equipo, no solo de la torre en sí, sino de todo el sistema de enfriamiento. También, que las ventajas de su depuración cuando llega a tener niveles intolerables de ciertas sustancias en el uso de enfriamiento de equipos, es considerada muy efectiva en el cuidado del sistema. Es por esto, que es muy recomendado llevar un buen control de sus condiciones para mantener los niveles permisibles, y así asegurar el equilibrio entre desempeño y vida del equipo.

Se debe tomar en cuenta que la calidad del agua puede desviarse (por ser un sistema abierto con recirculación) por existir distintas variables en juego como: la lluvia; el cambio de estación; cambio en el tratamiento del agua del municipio; cambio en las temperaturas de operación, y otros. Basado en lo anterior y tomando en cuenta que la mayoría de estos fenómenos son difícilmente controlables, se deben recalcular las dosis de los productos para el tratamiento del agua, frente a estos posibles cambios.

Los procedimientos de inspección recomendados ayudan a mantener la vida útil del equipo, logrando con esto que se tengan altos rendimientos y excelentes eficiencias del sistema enfriador de agua. Estos procedimientos son muy sencillos y en el caso del monitoreo de la calidad del agua toma algunos minutos, a través de titulaciones sencillas. Existen muchas herramientas como el índice de Langelier y Ryznar, que ayudan a la rápida toma de decisiones del tratamiento más conveniente que se debe aplicar con respecto a la calidad del agua, para conservar las condiciones del sistema.

La prevención del escape de aceite o de cualquier solvente ajeno en el agua es de suma importancia, ya que éstos interfieren con los tratamientos aplicados. Lo mejor es localizar inmediatamente la fuga y aplicar una acción correctiva.

## **Objetivo General**

En base al objetivo general, se concluyó que son muchos los factores que intervienen en la operación y selección de las Torres de Enfriamiento, la mejor manera de integrarlos para fines prácticos, es estudiarlos particularmente y seguir una secuencia basada en los criterios del objetivo particular 1.

Además se encontró que estos equipos son capaces de disminuir consumos de energía en procesos de reducción de la temperatura del agua, donde se puedan sustituir

por los sistemas de refrigeración, y por tanto, es muy importante el ahorro que se obtiene, además de los aspectos ecológicos que se cuidan con esta reducción. La carga de calor liberada por pequeñas evaporaciones de agua es muy considerable, y todo esto es posible ya que el agua es una sustancia con un calor latente muy elevado, que al perderlo logra enfriar el líquido restante del sistema de recirculación.

Hoy por hoy, no existe industria transformadora de materiales que no cuente con una torre para el enfriamiento de motores, hornos, intercambiadores, condensadores, o para operaciones de transferencia de masa, por tanto, es muy importante el conocimiento de los fundamentos de su funcionamiento y su relación con la calidad del agua. Según la revisión bibliográfica y la investigación de campo, para la industria de alimentos (que maneja cargas térmicas relativamente reducidas), las torres que sobresalen por su uso son las pequeñas de tiro inducido o tiro forzado, que manejan flujos máximos de 5000 GPM. Pero en la industria petroquímica o productora de energía eléctrica donde se manejan capacidades más elevadas, se utilizan torres con flujos de hasta 35000 GPM. Éstas son con preferencia a la configuración inducida.

Después del análisis de la información se consideró que el tipo de Torre más conveniente sin importar la aplicación y la capacidad, es la de tiro inducido o tiro forzado, ya que las atmosféricas o hiperbólicas dadas las condiciones de nuestro país serían inadecuadas. Las de tiro inducido o forzado aseguran un flujo continuo de aire, lo que permite un mejor control de su operación. Las torres de tiro inducido a contracorriente para capacidades grandes, parecen ser las mejores debido a sus características y sobretodo a que poseen la mejor configuración desde el punto de vista termodinámico.

Si en una Industria se cuenta con una Torre antigua, y su capacidad es insuficiente, existen hoy en día varias formas de aumentar su eficiencia, entre las que destacan:

1. Cambio en el relleno por uno más eficiente y posiblemente más liviano y duradero.
2. Cambio en eliminadores de brisado que retienen el agua correctamente, pero permiten un flujo de aire mayor proporcionando un enfriamiento superior.
3. Modificación en el sistema de distribución.
4. Cambio en el ángulo de paso del ventilador para permitir un aumento en los pcm del aire, todo esto si el amperaje del motor del ventilador lo permite.
5. Cambio en la chimenea del ventilador por una tipo Venturi, que permita generar más velocidad con el mismo motor.

Por último, integrando todos los aspectos revisados previamente se concluye que, como regla general, a mayor temperatura, humedad y concentración de sustancias como el oxígeno, carbonatos, materia suspendida, sedimentos, solventes, aceites o ácidos en el sistema de enfriamiento, se obtiene un margen de corrosión o incrustación muy elevado, que es considerado la mayoría de las veces como intolerable para el sistema de enfriamiento.

CAPÍTULO 6

**BIBLIOGRAFÍA**

## VI. BIBLIOGRAFÍA

1. BADGER Y BANCHERO. "Introducción a la Ingeniería Química". Ed. McGraw-Hill. 1970.
2. BROOKE, Maxey. "Development of Cooling Water Treatment". Ed. American Institute of Chemical Engineers.
3. BURGER, Robert. "Cooling Towers: The Neglected Energy Source". Energy Progress, Vol. 7, No. 4, 1987.
4. CARLSON, C.D. "The Cooling Tower Institute". Ed. American Institute of Chemical Engineers.
5. CARRIER. "Manual de Aire Acondicionado". Ed. Marcombo. 1976.
6. CHEREMISINOFF, Paul N. "Handbook of Water and Wastewater Treatment Technology". Ed. Marcel Dekker inc. 1995.
7. "Cooling Towers". Ed. American Institute of Chemical Engineers. Preparado por: Chemical Engineering Progress.
8. COMEAUX, Roy V. "Supply, Use and Disposal Problems". Ed. American Institute of Chemical Engineers.
9. "Enciclopedia de Tecnología Química". Tomo I, Ed. Hispano-americana. 1961.
10. FOUST et al. "Principios de Operaciones Unitarias". Ed. Cía. Editorial Continental. 1982.
11. GEANKOPLIS, Christie. "Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias". Ed. Cía. Editorial Continental. 1982.
12. GRIFFIN, Robert W. "Corrosion Control of Cooling Towers". Ed. American Institute of Chemical Engineers.
13. HIMMELBLAU, David. "Principios y Cálculos Básicos de la Ingeniería Química". Ed. Cía. Editorial Continental. 1977.
14. JIMESON Y ADKINS. "Waste Heat Disposal in Power Plants". Ed. American Institute of Chemical Engineers.
15. KERN, Donald Q. "Procesos de Transferencia de Calor". Ed. Cía. Editorial Continental. 1965.
16. KERST, Herman. "Evaluation of Cooling Tower Water Treatment". Ed. American Institute of Chemical Engineers.
17. MACALUSO, Charls A. "Ecological Aspects of Cooling Systems". Ed. American Institute of Chemical Engineers.
18. "Manual de Refrigeración y Aire Acondicionado". Tomo II, Ed. Prentice-Hall. 1987.
19. "Manual de Torres de Enfriamiento". B.A.C. PRITCHARD, INC.
20. McCABE Y SMITH. "Operaciones Básicas de Ingeniería Química". Ed. Revertè. 1981.
21. McKETTA Y CUNNINGHAM. "Encyclopedia of Chemical Processing and Design". Vol 11, Ed. Marcel Dekker Inc. 1980.
22. NESTER, D. M. "Salt Water Cooling Tower". Ed. American Institute of Chemical Engineers.
23. NORDELL, Eskel. "Tratamiento de Agua para la Industria y otros usos". Ed. Continental. 1961.
24. OCON Y TOJO. "Problemas de Ingeniería Química". Ed. Aguilar. 1982.

25. PERRY et al. "Manual del Ingeniero Químico". Ed. McGraw-Hill. 1992.
26. PETERS y KU. "Energy considerations in Industrial Water Treatment". Energy Progress, Vol. 4, No. 3, 1984.
27. PHELPS, Peter M. "Increasing Cooling Tower Capacity without enlarging the structure". Ed. American Institute of Chemical Engineers.
28. QUINTERO RAMIREZ, Rodolfo. "Ingeniería Bioquímica: Teoría y aplicaciones". Ed. Alhambra Mexicana. 1981.
29. ROGERS, Kenneth R. "Tile Fill Packing". Ed. American Institute of Chemical Engineers.
30. TREYBAL, Robert E. "Operaciones de Transferencia de masa". Ed. McGraw-Hill, 1988.

**CAPÍTULO 7**

**GLOSARIO**

## VII: GLOSARIO

### A

**Ácido mineral libre:** puede ser sulfúrico, nítrico o clorhídrico que se encuentra algunas veces en las aguas residuales de la industria.

**Agente sinergizante (en el tratamiento de aguas):** es una sustancia que aumenta las propiedades de un anticorrosivo o de un preventivo de incrustaciones.

**Agua de suministro o de depósito:** es el agua de suministro normal que compensa las pérdidas por evaporación, brisado o drenaje; también es conocida por el nombre de "make-up" o agua de repuesto.

**Alcalinidad:** representa la suma de los iones carbonato, bicarbonato e hidróxido que se encuentran en el agua; otros iones como el fosfato o silicato pueden contribuir parcialmente a esta alcalinidad. Normalmente se expresa en términos de ppm o gramos por litro de carbonato cálcico,  $\text{CaCO}_3$ .

**Alga:** es una forma de vida pequeña de planta que requiere luz solar y aire para su existencia.

**Algicida:** es toda sustancia que se emplea para destruir algas.

**Análisis del agua:** es el análisis químico de los materiales disueltos en el agua. Comprende también la determinación del pH y la cantidad de sólidos en suspensión.

**Ánodo:** es un electrodo positivo hacia el que se mueven los iones no metálicos con carga negativa, siendo en él donde se produce la reducción. En los procesos de corrosión el ánodo es normalmente el electrodo que tiene mayor tendencia a disolverse.

**Aproximación:** Es la diferencia entre el agua fría y la temperatura de bulbo húmedo, su unidad son los °F.

### B

**BHP (brake horsepower):** es la potencia actual de un motor o una máquina.

**Biocida:** es toda sustancia que se emplea para destruir organismos vivos como algas, bacterias y hongos. Puede destruir solamente uno de estos grupos de organismos, o solamente una determinada bacteria, alga u hongo dentro de estos grupos.

**BTU (British Thermal Unit):** es la cantidad de calor requerida para elevar la temperatura de 1 libra de agua 1 °F.

### C

**Cátodo:** es un electrodo negativo hacia el que se dirigen los iones metálicos con carga positiva y en donde se produce la reducción de los mismos en un par electroquímico. En los procesos de corrosión el cátodo suele ser el electrodo que presenta mayor resistencia a la misma.

**Capacidad:** la capacidad térmica son los gpm que una torre de enfriamiento enfriará en un intervalo o aproximación conocida.

**Cambiador de calor:** es el equipo para la transferencia de calor desde una sustancia a otra. El intercambio puede ser directo, como en las torres de enfriamiento, o indirecto, como en el casco de un condensador.

**Carga térmica a retirar:** es el calor removido en la torre del agua de recirculación, puede ser calculado como el calor sensible desde una temperatura de entrada a la de salida por el galonaje y su Cp.

**Ciclos de concentración:** son las relaciones que existen entre el porcentaje de sólidos disueltos en el agua que circula y el correspondiente al agua de suministro.

**Clorador:** es un dispositivo destinado a medir, disolver y suministrar cloro líquido en un sistema de agua.

**Conductividad específica:** mide la capacidad del agua para conducir corriente eléctrica. Se expresa en micromhos por centímetro cúbico. El micromho es la millonésima del mho que, a su vez, es el inverso del Ohmio.

**Corrosión galvánica:** suele producirse al entrar en contacto dos metales distintos en presencia de un electrolito. Se caracteriza por un movimiento de electrones desde el metal de mayor potencial (ánodo) hacia el de menor potencial (cátodo), resultando la corrosión del material anódico. La corrosión por pila galvánica puede también producirse al encontrarse dos metales similares en presencia de un electrolito de concentración no uniforme.

**Corrosiones:** destrucción del metal por métodos químicos o electroquímicos. En los procesos de corrosión, los productos de la reacción pueden ser solubles o insolubles en el medio de contacto. Los productos insolubles de la corrosión pueden producir depósitos en la zona atacada o cerca de ella, o pueden ser arrastrados lejos de ella.

## D

**Deslignificación:** es la destrucción de la lignina, sustancia aglutinante que mantiene unidas las fibras de celulosa en la madera.

**Depósitos biológicos:** son depósitos de organismos biológicos o de productos que resultan de sus procesos vitales, y que se forman en el agua. Estos depósitos pueden ser de naturaleza microscópica, como lodos, o de naturaleza macroscópica como caracollitos o mariscos. Los lodos suelen estar formados por depósitos de tipo gelatinoso o filamentosos.

**Drenaje:** es la salida continua de parte del agua que existe en un sistema de recirculación. Esta agua, que tiene una cierta concentración de sustancias disueltas, es reemplazada por agua de la fuente normal de suministro, produciéndose un descenso en la concentración. El drenaje suele expresarse en litros o m<sup>3</sup> por hora.

**Dureza:** es fundamentalmente la suma de las sales de calcio y magnesio que existen en el agua, aunque suele incluir otros elementos como el aluminio, hierro, manganeso, estroncio o zinc. Dureza temporal, o de carbonatos, es la fracción de la dureza total que puede combinarse con los iones carbonato, CO<sub>3</sub>, o bicarbonato, HCO<sub>3</sub>. El resto de la dureza recibe el nombre de dureza permanente. Esta se debe principalmente a los sulfatos, cloruros o nitratos de calcio y magnesio.

## E

**Electrolito:** es una disolución por la que circula una corriente eléctrica.

**Eliminador de brisado:** son estructuras que se emplean para no permitir la salida del agua que el aire puede llevarse debido a su velocidad.

**Entrada de aire:** es la entrada en las torres de enfriamiento a través del cual el aire entra a la torre. En las torres de enfriamiento de tiro inducido en contracorriente, la entrada de aire es llamada comúnmente "louvered face".

**Erosión:** es el desgaste continuo producido por la acción del rápido movimiento del agua, particularmente cuando lleva burbujas de gas o partículas abrasivas en suspensión.

## F

**Flujo de aire (ACFM):** es el total de pies cúbicos por minuto de la mezcla de aire medidos a la descarga del aire en la torre.

## I

**Incrustaciones:** consisten en un depósito que forma la disolución en el recipiente que la contiene. Normalmente es cristalina, densa, y en algunas ocasiones de estructura columnar.

**Índice de estabilidad de Ryznar:** significa un dato práctico más a considerar junto con el índice de saturación de Langelier, basándose en la experiencia. Este índice, que es siempre positivo, es igual al doble del pH que se calcula para la saturación de carbonato cálcico, menos el pH medido. Los índices cuyo valor está por encima de 6.5 indican una tendencia a la corrosión, mientras que los que están por debajo de 6.5 indican tendencia a formar incrustaciones.

**Índice de saturación de Langelier:** se utiliza para predecir las características del agua en relación con la formación de incrustaciones. Los valores positivos indican una tendencia a formar incrustaciones y los negativos nos indican lo contrario. Este índice es la diferencia algebraica entre el pH resultante de un análisis y el que se calcula por saturación de carbonato cálcico.

**Inhibidor de la corrosión:** es una sustancia química que se añade a una disolución para reducir el grado de corrosión o las incrustaciones.

**Interferencia:** es la contaminación del aire a la entrada de la torre con la descarga de vapor de otra torre de enfriamiento o fuente de calor.

**Intervalo:** es la diferencia entre la temperatura a la entrada de la torre y la temperatura a la salida de la torre.

**Ion:** es un átomo o grupo de átomos con carga eléctrica.

## M

**Miligramo por litro (mg/l):** representa mg de soluto por litro de disolución. Equivale a 1 ppm.

**Modificadores de tensión superficial:** son sustancias que poseen características de estabilización que tienden a reducir al mínimo los depósitos de carbonato de calcio. Los polifosfatos son un ejemplo de ellos.

## N

**Niebla:** es la humedad condensada que ocurre cuando el aire de descarga saturado y tibio de la torre entra en contacto con el aire frío de la atmósfera.

## P

**Partes por millón (ppm):** representa las partes de soluto por cada millón de partes en peso de la disolución. Se utiliza normalmente para expresar los resultados de un análisis de agua. Una ppm es igual a una diezmilésima de 1% (0.0001%), o bien, a 1 mg de materia por litro.

**Pérdidas por arrastre de aire:** es la pérdida de pequeñas gotitas de agua producidas por la circulación del aire. Su magnitud varía en diferentes tipos de instalaciones. Es una pérdida de agua que se produce en el sistema y que se sustituye por nueva agua suministrada. Las pérdidas por arrastre de aire tienden a limitar los ciclos de concentración, y normalmente se expresan como un porcentaje del grado de circulación (es igual al brisado).

**pH:** es el logaritmo con signo cambiado de la concentración de iones H de una disolución. Indica el grado de acidez o alcalinidad de una disolución. Un pH igual a 7 indica estado neutro. Los valores por debajo de 7 indican acidez creciente, y por encima de 7 indican alcalinidad creciente.

**Purgas:** es el agua descargada desde el sistema para el control de la concentración de sales u otras impurezas en el agua circulada, su unidad es el % de agua circulada expresada en gpm (gal/min) (es igual al drenaje).

**Psicrómetro:** es el instrumento usado primordialmente para medir la temperatura de bulbo húmedo.

## R

**Reductor de velocidad:** es un equipo utilizado para el cambio de velocidad en el ventilador, puede ser hidráulico o de engranaje.

**Rellenos:** son las partes de la torre donde se efectúa el intercambio calórico y másico entre el agua de circulación y el flujo de aire a través de la torre.

## S

**Sedimentos:** depósitos sedimentarios que forma el agua. Generalmente no se adhieren fuertemente a las paredes, lo que permite su eliminación por medios mecánicos. Estos sedimentos no se encuentran necesariamente en el mismo lugar donde se han formado. Pueden llegar a ser duros, adherentes y solidarios de la superficie sobre la que se ha formado.

**Serie galvánica:** es una lista de metales y aleaciones ordenados con arreglo a sus potenciales relativos en un medio determinado.

**Sistema abierto de agua recirculada:** es un sistema en el que el agua circula de forma repetitiva a través de un circuito formado por intercambiadores de calor y depósitos abiertos a la atmósfera, como torres enfriadoras y lavadores de aire. El agua se airea y evapora, o se condensa vapor de agua en los pulverizadores. Se establece algún drenaje para limitar el porcentaje de sólidos en el sistema.

**Sistema cerrado de recirculación:** es un sistema en el que el agua circula de forma repetitiva a través del intercambiador de calor. No hay aportación de agua nueva excepto para compensar las fugas. Tampoco hay evaporación.

**Sistema de agua no recirculada:** es el sistema en el que el agua circula una sola vez y se descarga. No hay evaporación.

**Sistema de distribución:** son aquellas partes de la torre, empezando por la entrada donde el agua es distribuida a través de los rellenos.

**Sólidos disueltos:** son los que no pueden eliminarse por filtración. Su presencia es debida a la acción disolvente del agua en contacto con los minerales del suelo.

**Sólidos suspendidos:** son los que no están en disolución y pueden eliminarse por filtración.

**Sólidos totales:** es la suma de los sólidos disueltos y en suspensión.

## T

**Tasa de agua recirculada:** es la cantidad de agua caliente que entra a la torre, su unidad son gal/min.

**Tasa de aire:** es el flujo de aire estándar por unidad de área en el relleno. También puede dar una alternativa del significado de velocidad en pies por minuto. La unidad es lb/ft<sup>2</sup>-min.

**Titulación o neutralización:** es el proceso mediante el cual se añade un líquido de concentración y volumen conocidos, a otro líquido, hasta el punto en que se produce un efecto determinado, generalmente un cambio de color de un indicador.

**Torres de Flujo en contracorriente:** el aire está fluyendo en una dirección opuesta a la caída de agua dentro de las torres de enfriamiento.

**Torres de Flujo cruzado:** el aire está fluyendo a través del relleno en forma perpendicular al plano de caída del agua.

**Torres de Flujo forzado:** son el tipo de torre mecánica donde uno o varios ventiladores están localizados a la entrada del aire para forzarlo dentro de la torre.

**Torres de Flujo inducido:** son el tipo de torre mecánica donde uno o varios ventiladores están localizados a la salida del aire para inducirlo a salir de la torre.

**Torres de tiro natural:** es el tipo de torre donde el movimiento del aire es debido a un diferencial de densidad entre el aire de entrada y el de salida. Debido a la transferencia de calor que sufre el aire, este que ahora es más caliente tiende a subir y así salir de la torre.

**Torres de tiro mecánico:** es el tipo de torre donde el aire es movilizadado por la acción de uno o más ventiladores. Existen dos tipos de sistema: aire forzado y aire inducido.

**Tuberculación:** es la formación de productos de la corrosión localizados en forma de pequeños grumos distribuidos sobre una superficie, y que reciben el nombre de tubérculos.

**Tubo pitot:** es un instrumento que opera por un diferencial de presiones, y es utilizado primordialmente para medir la tasa de aire circulante a través de la torre.