



**UNIVERSIDAD POPULAR AUTÓNOMA
DEL ESTADO DE PUEBLA**

TUTOR DE TORRES DE ENFRIAMIENTO

POR :

LAURA ESTELA ALCÁZAR ESQUIVEL

TRABAJO PRÁCTICO

Presentado a la Escuela de Ing.
Química como Requisito Parcial
para obtener el Título de:

INGENIERO QUÍMICO



UPAEP – Secretaría General

Dirección General de Apoyos Académicos

Dirección del Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación.

Biblioteca Central - **Karol Wojtyla**

Tesis Digitales Restricciones de uso:

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

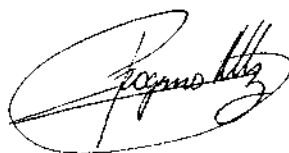
El uso de textos, imágenes, gráficas, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente de donde la obtuvo mencionando el autor o autores involucrados en el documento.

Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Puebla, Pue.
25 de Octubre de 1995

Este trabajo práctico denominado "Tutor de Torres de Enfriamiento" que asesoré, cumple con los requisitos de calidad y contenido, por lo que me permito autorizar a la Srita. Laura Estela Alcázar Esquivel a promover la obtención del Título de Ingeniero Químico en la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla.

ATENTAMENTE

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Rogerio Edmundo Martínez Gómez", enclosed within a large, loopy oval stroke.

M.I.Q. Rogerio Edmundo Martínez Gómez

Asesor del Trabajo

Agradecimientos

A mis Padres

Sr. Ubiel Alcázar Torres
Sra. Ma. Estela Esquivel Vda. de Alcázar
Porque me dieron vida sintiendo
la grandeza de su cariño
porque me formaron de niña enseñandome
los verdaderos valores de la vida

A mi abuela

Sra. Dolores Espinoza Vda. de Esquivel

A mis tíos :

Srita. Ma. Guadalupe Esquivel Espinosa
por su apoyo incondicional
Dra. Susana Rebeca Esquivel Espinosa
que ha sido más que una hermana
Sr. Alfredo Esquivel Espinosa

Al asesor de mi tesis : M.I.Q. Rogerio E. Martínez Gómez
por las valiosas observaciones que me ayudaron
al desarrollo de la presente tesis

Agradezco a la Ing. y M.A. Josefina Rivero Villar,
directora de la Escuela de Ingeniería Química su
apoyo durante mi permanencia en la carrera.

A mis amigos con cariño : Ruth, Raúl, Velia, Janet

A toda mi familia

A mis maestros y amigos al lado de los que he crecido
mental y emocionalmente

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

GENERALIDADES

- Principios
- Torres de Tipo Mecánico
- Torres Atmosféricas de Enfriamiento
- Torres de Tipo Natural
- Tanques de rociado

CAPÍTULO 1

PSICROMETRÍA

- 1.1 Cálculo de la Carta Psicrométrica
 - 1.1.1 Gráfico de humedad
 - 1.2 Procesos de Saturación Adiabática
 - 1.2.1 Medición de la Humedad
 - 1.3 Programa
 - 1.3.1 Lista de variables y constantes empleadas en el programa
- Referencias Bibliográficas

CAPÍTULO 2

MODELO Y SIMULACIÓN DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO PARA AIRE/AGUA POR COMPUTADORA

- 2.1 Deducción de las ecuaciones para el cálculo de una Torre de Enfriamiento
 - 2.1.1 Cálculo de la Sección Transversal de la Torre
 - 2.1.1.1 Determinación de la razón mínima aire-agua
 - 2.1.1.1.1 Cálculo del Gasto de Aire a través de la Torre
 - 2.1.1.1.2 Cálculo de la Sección Transversal de la Torre
 - 2.1.1.2 Comprobación del Caudal del líquido respecto a las condiciones de carga
 - 2.1.2 Evaluación de las condiciones de operación
 - 2.1.3 Cálculo de la altura del relleno
 - 2.1.4 Cálculo de la pérdida de presión
 - 2.1.5 Lista de variables y constantes empleadas en el programa
 - 2.2 Pérdidas en operación
 - 2.2.1 Lista de variables y constantes empleadas en el programa
 - 2.3 Tipos de Torres de Enfriamiento
 - 2.3.1 Torre de Enfriamiento de Tiro Forzado
 - 2.3.2 Torre de Enfriamiento de Tiro Atmosférico
 - 2.3.3 Lista de variables y constantes empleadas en el programa
- Referencias Bibliográficas

CAPÍTULO 3

AUMENTO EN LA EFECTIVIDAD DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO EXISTENTE

3.1 PROCESOS FÍSICOQUÍMICOS

- 3.1.1 Ciclo del Agua
- 3.1.2 Evaporación del Vapor Condensado
 - 3.1.2.1 Costos de Condensación
- 3.1.3 Calor Desprendido en la Evaporación
 - 3.1.3.1 Concentración del Nitrato de Amonio Perdido
 - 3.1.3.2 Diseño de Parámetros
- 3.1.4 Ósmosis Inversa
 - 3.1.4.1 Membranas y Módulos
 - 3.1.4.2 Aplicaciones
 - 3.1.4.3 Factores de diseño
- 3.1.5 Electrodialisis
 - 3.1.5.1 Cómo trabaja la Electrodialisis
 - 3.1.5.2 Ejemplo: Tratamiento en una torre de Enfriamiento
- 3.1.6 Remoción de Vapor
 - 3.1.6.1 Cómo y donde se usa
 - 3.1.6.2 Diseño de un Sistema de Remoción
 - 3.1.6.3 Costo
- 3.1.7 Torres de Enfriamiento Mojadas/Secas
 - 3.1.7.1 Torres de Enfriamiento Mojadas
 - 3.1.7.2 Combinación de Torres de Enfriamiento Mojado/Seco
 - 3.1.7.3 Diseño y Factores de Costo
- 3.1.8 Persianas de enfriamiento
 - 3.1.8.1 Persianas VS. Torres de Enfriamiento
 - 3.1.8.2 Consideraciones del diseño
- 3.1.9 Ablandamiento de la Corriente Lateral
 - 3.1.9.1 Cómo eliminar Obstrucciones
 - 3.1.9.2 Aplicaciones
- 3.1.10 Resumen

3.2 PROCESOS AUXILIARES

- 3.2.1 Una torre de Enfriamiento puede aumentar su efectividad con el empleo de intercambiadores, turbinas y compresores
- 3.2.2 Criterio al invertir en una torre de enfriamiento
- 3.2.3 Optimización de una torre de enfriamiento
- 3.2.4 Flujo a Contracorriente VS. Flujo Cruzado

3.3 USO DEL AGUA DE DESECHO COMO SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

- 3.3.1 Afluente del Agua de Desechos domésticos
- 3.3.2 Reuso del afluente en una planta de fertilizante
- 3.3.3 Reuso del afluente de un hervidor y del proceso de condensado
- 3.3.4 Reuso de afluentes químicos
- 3.3.5 Reuso del agua ácida remocionada de los fondos
- 3.3.6 Disolución del aire que flota en el afluente
- 3.3.7 Prevención de la obstrucción

3.4 TRATAMIENTO DEL AGUA

- 3.4.1 Manera fácil de agregar ácido al agua de abastecimiento de la torre de enfriamiento
- 3.4.2 Cálculo Rápido del Arrastre y Caudal de abastecimiento para la Torre de Enfriamiento

Referencias Bibliográficas

CAPÍTULO 4

AUMENTO DE LA VIDA DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO

4.1 Tratamientos Físico-Químicos

4.2 Equipo y Servicios de Mantenimiento

- 4.2.1 Tratamiento no químico para el agua de Torres de Enfriamiento
- 4.2.2 Control de la Contaminación Biológica sin químicos
- 4.2.3 Filtración en la corriente lateral de una T.E.
- 4.2.4 Electrodesionización
- 4.2.5 Método de remoción de metales del agua
- 4.2.6 Detección del nivel bajo de Hidrazina
- 4.2.7 Algunos productos químicos que Inhiben la Corrosión
- 4.2.8 Control de la corrosión y la deposición de la torre con fosfato
- 4.2.9 Automatización de los tratamientos Químicos por computadora
- 4.2.10 La solubilidad química minimiza la formación de sólidos
- 4.2.11 Biocidas
- 4.2.12 Los trazadores ayudan a controlar las dosificaciones
- 4.2.13 Filtración compatible con el Tratamiento Químico de aguas
- 4.2.14 Biocida capturado por cloro
- 4.2.15 Tratamiento de aguas de la planta
- 4.2.16 Distribución automática de Cloro y Bromo

Referencias Bibliográficas

CAPÍTULO 5

EVALUACIÓN ECONOMICA DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO

5.1 Evaluación económica

- 5.1.1 Monto anual del capital invertido
- 5.1.2 Costo anual de operación
 - 5.1.2.1 Costo de la energía del ventilador
 - 5.1.2.2 Costo de bombeo del agua
 - 5.1.2.3 Costo anual de operación
- 5.1.3 Lista de variables y constantes empleadas en el programa

Referencias Bibliográficas

CAPÍTULO 6

REDUCCIÓN DE COSTOS

6.1 Modificaciones al proceso

6.2 Ventiladores de velocidades variables para reducir los costos de operación

- 6.2.1 Ahorro al ajustar la velocidad del ventilador
- 6.2.2 Cálculos de Restitución
- 6.2.3 Otras características

6.3 Los filtros para eliminar la contaminación en Torres de Enfriamiento

- 6.3.1 Retrolavado Manual
- 6.3.2 Ahorro de energía
- 6.3.3 Nueva Tecnología en la filtración del agua de enfriamiento

6.5 Congelamiento para reducir los costos de tratamiento

Referencias Bibliográficas

CONCLUSIONES

APÉNDICE A

Definiciones

APÉNDICE B

Diagrama de flujo de los programas

INTRODUCCIÓN

El objetivo de la presente tesis es desarrollar un programa tutor para el estudio de torres de enfriamiento.

La finalidad de dicho tutor es contar con un paquete de computo autodidacta mediante el cual se pueda aprender sobre el funcionamiento y el diseño de dichas torres de enfriamiento.

Dicho tutor debe:

- 1) Mostrar información descriptiva de las torres de enfriamiento
- 2) Mostrar la construcción de un diagrama psicrométrico y su uso
- 3) Simular los tipos de torres de enfriamiento más empleadas en la industria para el sistema aire-agua
- 4) Explicar algunas opciones prácticas para aumentar la efectividad y vida útil de una típica torre de enfriamiento
- 5) Mostrar una ejemplo de evaluación económica
- 6) Mostrar algunas alternativas para la reducción de costos.

El primer capítulo y las generalidades presentan conceptos básicos de Psicrometría y descripción de los tipos de torres de enfriamiento respectivamente. En el primer capítulo se describen el proceso de saturación adiabática que es el estado en que trabaja la torre en consideración y el cálculo de los puntos de la carta psicrométrica mediante un programa. El capítulo 2 trata sobre el modelo y simulación de una torre de enfriamiento para aire/agua por computadora, deducción de las ecuaciones (cálculo de la sección transversal, pérdidas en operación y los tipos de torres de enfriamiento a calcular en esta tesis). El capítulo 3 contiene los procesos fisicoquímicos, procesos auxiliares, tratamientos de aguas, así como el uso del agua de desecho para lograr un aumento en la efectividad de una torre de enfriamiento existente. El capítulo 4 se dedica a los tratamiento fisicoquímicos y servicios de mantenimientos para aumentar la vida de una torre de enfriamiento. El capítulo 5 estima la evaluación económica de una torre, en base a los costos de energía del ventilador, el costo de bombeo de agua y el costo anual de operación. Finalmente, el capítulo 6 da algunas procedimientos para reducir los costos de funcionamiento de una torre de enfriamiento.

Mi gratitud por la asesoría de la presente tesis al M.I.Q. Rogerio Edmundo Martínez Gómez.

Laura Estela Alcázar Esquivel

GENERALIDADES

PRINCIPIOS

Los procesos de enfriamiento del agua se cuentan entre los más antiguos que halla desarrollado el hombre. 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 de 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 eliminación teórica de calor posible 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 un punto de vista ideal ésta es la temperatura teórica más baja a la que puede enfriar el agua. Prácticamente, la temperatura del agua se acerca, pero no llega a ser equivalente, a la del 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 suficiente de llenado y la separación de agua en gotitas. En la práctica, las torres de enfriamiento rara vez se diseñan para acercamientos menores de 5°F.

Cuando se pone en contacto directo agua caliente con aire frío, el agua se enfriará por la pérdida de calor sensible y por la evaporación. Al mismo tiempo, el aire se calentará y se humidificará. El enfriamiento de agua es un caso de transferencia de materia y de calor simultáneos, la transferencia de materia se da en el paso del agua evaporada desde la superficie líquida al seno del aire. Como en todos los procesos de transferencia de materia y de transmisión de calor por contacto directo, una de las consideraciones primarias al diseñar la instalación es la creación de una gran área interfacial. Evidentemente una torre de relleno constituye una solución para conseguir este propósito.

El enfriamiento de agua es una operación en la que la mayor resistencia a la transferencia corresponde a la fase gaseosa, por consiguiente, para una transferencia eficiente, entendiéndose por eficiencia como la capacidad que tiene la torre para llevar a cabo dicha transferencia, se requiere una elevada velocidad del aire, por eso, la pérdida de presión se hace crítica, y los rellenos se diseñan principalmente desde este punto de vista. Como consecuencia, el tipo de relleno más común, empleado para el enfriamiento de agua está constituido por las rejillas de madera, tanto de goteo como de película líquida, siendo este último el más utilizado.

Las torres pueden ser de tiro mecánico, tiro natural o de tiro atmosférico, aplicándose la última denominación a las torres basadas en el paso del viento a través de la estructura. Según la posición del ventilador las torres de enfriamiento de tiro mecánico pueden ser de tiro inducido o forzado. Las torres de tiro inducido son más satisfactorias en su funcionamiento, puesto que proporcionan una distribución de aire más uniforme y reducen el peligro de recirculación del mismo, proporcionando, por consiguiente, un rendimiento más elevado por tiempo por término medio. Sin embargo, representa pérdidas por arrastre ligeramente superiores y costo de funcionamiento superior en comparación con otros tipos por estar colocado el ventilador en la salida del aire. Las torres y estanques de pulverización y tipos similares de instalaciones de enfriamiento de agua no son de uso frecuente, y no serán tratadas aquí.

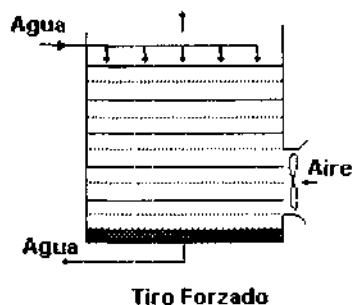
La altura de la torre de enfriamiento requerida depende considerablemente de las condiciones atmosféricas, particularmente de la temperatura húmeda (lectura del termómetro húmedo) del aire de entrada. En una determinada localidad, la temperatura húmeda varía durante el año, alcanzando su máximo valor sólo muy raras veces. Así, pues, resultaría antieconómico diseñar la torre basándose en la temperatura húmeda máxima. Debiendo llegarse a un compromiso entre las condiciones máxima y media. Uno de los métodos surgidos en el uso de la llamada temperatura húmeda "5 por 100" que se define como la temperatura húmeda que no es sobrepasada por más de 5 por 100 del número total de horas durante los meses de verano (junio, julio, agosto), y que se calcula del estudio de los datos meteorológicos locales.

El procedimiento de diseño se verá dentro de los capítulos que tiene la presente tesis.

TORRES DE TIRO MECÁNICO

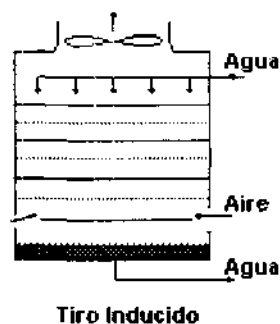
Se emplean dos tipos de torres de tiro mecánico: *el de tiro forzado y el de tiro inducido* en la actualidad.

En la *torre de tiro forzado*, el ventilador se monta en la base y se hace entrar el aire en la base de la misma y 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 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 motores húmedos de salida que retornan a las entradas de aire. Puesto que la temperatura de bulbo húmedo del aire de salida es mucho mayor que la del aire circulante, existe una reducción en el buen desempeño lo cual es evidencia mediante un incremento a la temperatura de agua fría (saliente).



La *torre de tiro inducido* es el tipo que se emplea con mayor frecuencia. A su vez esta clase general se subdivide en diseños de *contraflujo* o *flujos transversales*, dependiendo de las direcciones relativas de flujo del agua y del aire.

Desde el punto de vista termodinámico, la configuración a contraflujo es más eficaz, ya que el agua más fría entra en contacto con el aire más frío, obteniendo así un mínimo potencial de entalpía. Mientras mayores son las gamas de enfriamiento y más difícil la diferencia útil de temperaturas, tanto más evidente serán las ventajas del tipo de contraflujo.



Por ejemplo, con una razón L/G de 1, una temperatura ambiente de bulbo húmedo de 78°F y una temperatura de agua de entrada de 95°F la torre de contraflujo requiere una característica KaV/L de 1.75 para una diferencia útil de temperaturas desde 5°F , 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 7°F , los dos tipos de torre tienen más o menos el mismo valor requerido de KaV/L (menor que el 1%).

El fabricante de torres de flujo transversal puede reducir con eficiencia la característica de torre a acercamientos muy bajos incrementando la cantidad de aire para proporcionar una razón L/G más baja. El aumento en el flujo de aire no se logra necesariamente incrementando la velocidad del mismo sino sobretodo 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 cortos que este, hasta que casi pierde su desventaja inherente a la diferencia de potencial. Con todo a lograr ésto se incrementa el consumo de potencia del ventilador.

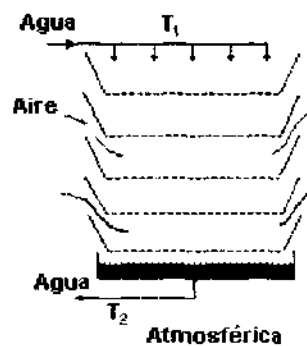
Por último la elección económica entre el sistema de contraflujo y el transversal se determina según la efectividad del llenado, las condiciones de diseño y otros costos de construcción de la torre.

El resultado del funcionamiento de un tipo específico de torre de enfriamiento está dictaminado por la razón de los pesos de aire a agua y el tiempo de un contacto entre uno y otro. En la práctica comercial, la variación de la razón de aire y agua se obtiene primeramente manteniendo constante el flux másico del aire a $350 \text{ ft}/(\text{min})(\text{ft}^2 \text{ de área de la torre activa})$ y haciendo variar el flux volumétrico de agua $\text{gal}/(\text{min})(\text{ft}^2 \text{ de área de torre})$.

Como operación secundaria, la velocidad del aire se altera para que la torre se adapte al requisito de enfriamiento.

TORRES ATMOSFÉRICAS DE ENFRIAMIENTO

La **torre atmosférica de enfriamiento** es aquella en la que la pérdida de calor se logra primordialmente gracias al movimiento natural del aire a través de la estructura. La capacidad de enfriamiento de cualquier torre, con una temperatura de bulbo húmedo y velocidad de viento dados, varía con la concentración del agua, por lo tanto el problema de calcular el tamaño de la torre se reduce a obtener correctamente la concentración de agua para una de las alturas elegidas que operará en ciertas condiciones de velocidad de viento y temperatura de bulbo húmedo. Una vez que se determina éste factor de concentración del agua, el área de la torre de una altura específica se calcula con facilidad dividiendo la carga circulante entre el factor de concentración.

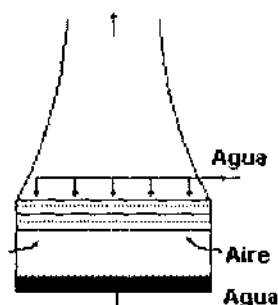


La concentración necesaria para producir el enfriamiento deseado depende primordialmente de los siguientes factores:

1. Intervalo de temperatura ($T_1 - T_2$).
2. Diferencia útil de temperaturas a la temperatura de bulbo húmedo ($T_2 - t_w$).
3. Altura de la torre.
4. Velocidad del viento.
5. Temperatura de bulbo húmedo t_w .

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 un práctico estándar para los requisitos de enfriamiento de agua de las estaciones generadoras de la Gran Bretaña. Estas son esencialmente apropiadas para cantidades muy grandes de enfriamiento y las estructuras de concreto reforzado que se acostumbraba usar llegan a tener diámetros de orden de 265 ft y alturas de 340 ft.



Tiro Natural

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. El flujo de aire a través de la torre de tiro natural se debe en su mayor parte a la diferencia de densidad entre el aire fresco de la entrada y el aire tibio de la salida. El aire expulsado por la columna es más ligero que el del ambiente, y el tiro se crea por efecto de chimenea, eliminando con ello la necesidad de ventiladores mecánicos. Mc Kelvey y Broke (The Industrial Cooling Tower, Elsevier, New York 1959) observan que las torres de tiro natural operan comúnmente a diferencias de presión de aire en la región de 0.2 in de manómetro de agua, cuando se someten a una carga plena. La velocidad media del aire por encima del relleno de torre es por común de 4 a 6 ft/s.

El funcionamiento de la torre de tiro natural difiere del de la torre de tiro mecánico en que el enfriamiento depende principalmente 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 del aire venciendo las resistencias internas, por lo tanto, mientras 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. En esta relación fundamental se ha utilizado con gran provecho en la Gran Bretaña, en donde humedades relativas son por lo común del 75 al 80%. Por lo tanto, en una de 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 de funcionamiento 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.

TANQUE DE ROCIADO

Los **estanques de rocío** constituyen un medio de reducir la temperatura del agua mediante el *enfriamiento de evaporación* y, al hacerlo, reducen enormemente la superficie de enfriamiento necesaria en comparación con un estanque de enfriamiento. El tanque de rocío emplea varias boquillas para rociar el agua y establecer contacto entre ésta y el aire del ambiente. 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.

NOMENCLATURA

K		coeficiente de transferencia de masa en lb de agua/(h)(ft ²)
a		área de contacto en ft ² /ft ³ de volumen de torre
V		volumen de enfriamiento activo en ft ³ /ft ² de área plana
L		velocidad del agua en lb/(h)(ft ²)
T ₁		temperatura de entrada en °F
T ₂		temperatura de salida en °F
T _w		temperatura de bulbo húmedo en °F
(T ₂ - T _w)		acercamiento a la temperatura de bulbo húmedo en °F

CAPÍTULO 1

PSICROMETRÍA

1.1 CÁLCULO DE LA CARTA PSICROMÉTRICA

Para realizar el balance de materia primero se utilizan como referencia algunas de las sustancias que atraviesan por el proceso de forma constante, es decir sin alteración en su composición. Se puede decir que un metro cúbico de aire al 50% de humedad (meteorológica) contiene la mitad de vapor de agua y la otra mitad corresponde al aire. [1.1]

Para aclarar mejor el concepto de humedad es conveniente que consulte el Apéndice A.

1.1.1 GRÁFICO DE HUMEDAD

Los conceptos de humedad, saturación molar, humedad absoluta, aire saturado porcentaje de humedad, calor húmedo, entalpía mezcla aire-agua, volumen húmedo y punto de rocío se representan en la Carta de Humedad ó Diagrama Psicrométrico que se aplica a componentes incondensables, o condensables, siempre y cuando se encuentren a una presión total fija. En el diagrama psicrométrico se pueden obtener valores o información sobre la humedad relativa o saturación porcentual, volumen húmedo, calor húmedo o entalpía total y temperaturas de bulbo húmedo y de bulbo seco.

Son importantes en la carta de humedad: la saturación y las líneas de porcentaje de humedad relativa constante. La saturación se relaciona con la curva de presión de vapor, también con curvas similares se encuentran las líneas de saturación porcentual constante o de saturación relativa constante. Si se grafican las líneas de saturación porcentual constante, caen en ordenadas directamente proporcionales a la ordenada del punto geométrico de saturación para la misma temperatura. Si las líneas de saturación relativa constante son las que se grafican, no existe tal proporción directa. Esto es evidente a causa de la **definición de saturación relativa**:

$$\% \text{ Saturación relativa} = \frac{100 (P_a)}{(P_a)_s} \quad (1.1.1)$$

donde:

P_a : presión parcial de vapor de agua

$(P_a)_s$: Presión vapor del vapor de agua

La curva de saturación relativa estará un poco más abajo de las curvas equivalentes para la saturación porcentual.

Para **determinar la humedad absoluta** a partir de la temperatura del bulbo húmedo, se grafican líneas de temperatura constante del bulbo húmedo aplicando la ecuación:

$$W_w - W_G = \frac{h_G}{29\lambda_w K_G} (t_G - t_w) \quad (1.1.2)$$

donde:

W_w : Humedad a saturación

W_G : Humedad de la muestra de aire

h_G : Coeficiente de transmisión del calor en la fase gaseosa; kCal/hm²°C

λ_w : Calor latente de vaporización Kcal/Kg

K_G : Coeficiente de transferencia de masa en la fase gaseosa, para la fuerza de impulsión en unidades de presión parcial, Km³/hm²atm

t_G : Temperatura de bulbo seco, °C

t_w : Temperatura del bulbo húmedo, °C

Para el caso de **flujo turbulento**, los datos experimentales acumulados, aplicados a un cilindro húmedo que es el caso del bulbo, la ecuación sería:

$$\frac{h_G}{K_G} = 8.5 \left(\frac{\mu}{\rho D_{ab}} \right)^{0.56} \quad (1.1.3)$$

donde:

μ : Viscosidad del líquido, en cp

ρ : Densidad, gr/cm³

D_{ab} : Difusividad de masa

Esta ecuación se usa cuando el aire es gas incondensable.

La siguiente la ecuación se utiliza para otros gases:

$$\frac{h_G}{K_G} = C_h \left(\frac{N_{sc}}{N_{pr}} \right)^{0.56} \quad (1.1.4)$$

donde:

N_{sc} : Número de Schmidt

N_{pr} : Número de Prandtl

C_h : relación h_G/K_G solamente cuando el flujo es turbulento

En el apéndice B se detalla el diagrama de flujo de un programa en para generar los datos de construcción del diagrama psicrométrico. [1.2]

1.2 PROCESOS DE SATURACIÓN ADIABÁTICA

La relación entre la temperatura de la saturación adiabática y la humedad de la fase gaseosa se han estudiado considerando el proceso mediante el cual se puede saturar el gas como se puede apreciar en la Fig. 1.1.

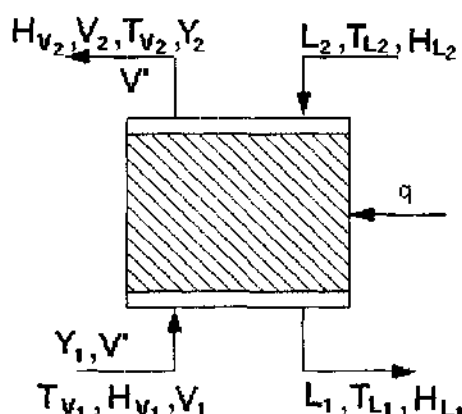


Fig. 1.1 Proceso General de Humidificación.

Los subíndices **1** y **2** se refieren al fondo y al domo de la columna respectivamente; los subíndices **L** y **V** representan las fases líquido y vapor respectivamente; y **V'** es el gasto molar del flujo de un gas incondensable en Kmol/h. Un balance de materia de la torre [1.3], es:

$$L_2 - L_1 = V' (Y_2 - Y_1) \quad (1.2.1)$$

Un balance de entalpía [1.4] da:

$$q + L_2 H_{L2} - L_1 H_{L1} = V' (H_{V2} - H_{V1}) \quad (1.2.2)$$

Para que este proceso general sea adiabático, deben cumplirse las sig. condiciones:

1. No puede transferirse calor a la torre, es decir $q=0$;
2. En el estado estable implica que $t_{L1} = t_{L2}$. Si el líquido se recircula, la diferencia de temperatura entre el gas y el líquido, tenderá a 0 y no habrá transferencia de calor sensible entre las fases. Lo único que acontecerá en la torre es parte del líquido se evapora y pasa a la corriente gaseosa.

Bajo estas condiciones, la ecuación (1.2.2) se transforma en:

$$H_L (L_2 - L_1) = V' (H_{V2} - H_{V1}) \quad (1.2.3)$$

combinando las ecuaciones (1.2.1) y (1.2.2) para eliminar $L_2 - L_1$:

$$H_L (W_2 - W_1) = H_{v2} - H_{v1} \quad (1.2.4)$$

Las entalpías se expresan en términos del calor latente molar y el calor húmedo en la ecuación:

$$H = c_b (t - t_o) + W [\lambda_o + c_a (t - t_o)] \quad (1.2.5)$$

donde:

t_o : Temperatura de referencia, °C

λ_o : Calor latente de evaporación a t°C

quedando la ecuación (1.2.4) de la siguiente forma:

$$c_L (t_{L2} - t_o) (W_2 - W_1) = [c_{h2} (t_{v2} - t_o) + \lambda_o W_2] - [c_{h1} (t_{v1} - t_o) + \lambda_o W_1] \quad (1.2.6)$$

Suponiendo que la torre sea suficientemente alta para que las fases de gas y líquido alcancen el equilibrio en la parte superior, la fase gaseosa estará saturada, y $t_{L2} = t_{L1} = t_{v2}$. La temperatura en el domo de la torre, t_2 sería entonces la temperatura adiabática de saturación y W_2 sería la humedad del gas saturado en t_2 . La temperatura de la fase gaseosa en el fondo de la torre, (t_{v1}), puede designarse simplemente como t_1 . Aplicando estas restricciones, la ecuación (1.2.6) se convierte en:

$$c_L (t_{L2} - t_o) (W_2 - W_1) = [c_{h2} (t_2 - t_o) + \lambda_o W_2] - [c_{h1} (t_1 - t_o) + \lambda_o W_1] \quad (1.2.7)$$

Los calores húmedos puede sustituirse en términos uno del otro, ya que:

$$\begin{aligned} c_{h1} &= c_b + W_1 c_a \\ c_{h2} &= c_b + W_2 c_a \\ \text{ó } c_{h2} &= c_{h1} - W_1 c_a + W_2 c_a \end{aligned} \quad (1.2.8)$$

Así que:

$$c_L (t_{L2} - t_o) (W_2 - W_1) = [c_{h1} (t_2 - t_o) - W_1 c_a (t_2 - t_o) + W_2 c_a (t_2 - t_o) + \lambda_o W_2] - [c_{h1} (t_1 - t_o) + \lambda_o W_1] \quad (1.2.9)$$

La ecuación queda así:

$$c_{h1} (t_2 - t_1) = (W_2 - W_1) [c_L (t_2 - t_1) - \lambda_o - c_a (t_2 - t_1)] \quad (1.2.10)$$

Los términos entre paréntesis en esta ecuación, son iguales a $-\lambda_2$, como puede verse en el siguiente balance de entalpías:

$$H_{L2} - H_{a2} = -\lambda_2 = (H_{L2} - H_{Lo}) + (H_{Lo} - H_{ao}) + [-c_a (t_2 - t_o)] \quad (1.2.11)$$

Esta última ecuación expresa el resultado obtenido - cuando se determina $H_{a2} - H_{L2} = \lambda_2$ utilizando una trayectoria en la que el sistema, se enfría primero como un líquido hasta t_o , vaporizándose entonces en este punto y finalmente calentándose como un vapor hasta t_2 . La suma de los cambios de entalpía, junto con la trayectoria completa, igualarán la diferencia entre las entalpías final e , debido a que la entalpía es una función cuyo valor no está determinado por la trayectoria seguida, sino solamente por su valor inicial y final. Haciendo las substituciones indicadas:

$$c_{h1} (t_2 - t_1) = \lambda_2 (W_1 - W_2) \quad (1.2.12)$$

Puesto que en este desarrollo t_2 y W_2 fueron condiciones para la temperatura adiabática de saturación, la ecuación (1.2.12) puede escribirse como:

$$c_{h1} (t_{sat} - t_1) = \lambda_{sa} (W_1 - W_{sa}) \quad (1.2.13)$$

el subíndice *sa* indica la condición adiabática de saturación correspondiente a las condiciones iniciales de la fase gaseosa designadas mediante el subíndice 1.

La ecuación (1.2.13) proporciona la relación entre la temperatura y la humedad de un gas para cualquier condición de entrada y las condiciones correspondientes para el mismo gas en su temperatura adiabática de saturación. Por lo que si ambas temperaturas, la adiabática y la real del gas son conocidas, entonces se puede calcular la humedad del gas. La humedad de la condición adiabática de saturación, puede encontrarse a partir del lugar geométrico de saturación, y la humedad del gas puede calcularse mediante la ecuación, (1.2.13). Dicha ecuación se desarrolló a partir de balances globales de materia y de entalpía, ecs. (1.2.1) y (1.2.2), entre la condición inicial del agua y la condición de saturación adiabática. Porqué está aplicada sólo para el uso de dos puntos, pero puede no describir la trayectoria seguida por el gas a medida que se satura.

1.2.1 MEDICIÓN DE LA HUMEDAD

Existen varios métodos para medir la humedad atmosférica como el *métodos del punto de condensación o rocío*, o el *método de bulbo húmedo*, este último es el más comúnmente usado. [1.5]

MÉTODO DEL BULBO HÚMEDO : un método para medir la humedad de una corriente gaseosa en la determinación de la temperatura del bulbo húmedo, juntamente con la temperatura del gas en sí. Esto se hace, obligando al gas a pasar rápidamente sobre el bulbo de un termómetro que se mantiene húmedo con el líquido que se forma por condensación del vapor presente en la corriente gaseosa. El dispositivo físico es el que se aprecia en la Fig. 1.2.

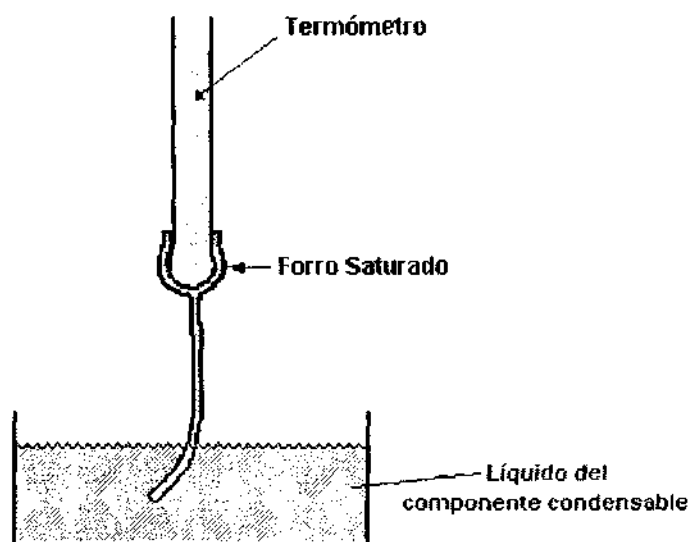


Fig. 1.2 Termómetro de bulbo húmedo.

Durante este proceso, si el gas no está saturado algo de líquido se evapora de la chaqueta saturada, hacia la corriente gaseosa en movimiento, transportando con él, el calor latente asociado. La remoción de calor latente da como resultado un descenso en la temperatura del bulbo del termómetro y en su chaqueta, por lo que se transferirá calor sensible hacia la superficie de la chaqueta, con convección procedente de la corriente gaseosa o por la radiación procedente del ambiente. En el estado estable, el flujo neto de calor hacia la chaqueta será cero, y la temperatura permanecerá constante. La temperatura del bulbo húmedo es la temperatura a la que puede llegar en estado estable por un termómetro cubierto con un paño húmedo expuesto a un gas que se mueve rápidamente (Fig. 1.2). La proporción de la transferencia hacia la chaqueta es:

$$q = (h_G + h_r) A (t_G - t_w) \quad (1.2.14)$$

y la proporción de transferencia de masa desde la chaqueta es:

$$N_s = K_G A (W_w - W_G) \quad (1.2.15)$$

en donde los subíndices indican la superficie de la chaqueta a la temperatura del bulbo húmedo y la temperatura del gas total. La proporción de transferencia de calor es sensible hacia la chaqueta, q sigue los mecanismos normales de convección y de radiación. La proporción de transferencia de la masa del componente a hacia la chaqueta N_s sigue también el mecanismo normal de transferencia de masa en la fase gaseosa. Los coeficientes h_G y h_r para la transferencia de calor mediante son por convección y radiación, respectivamente hacia el bulbo. Utilizando h_r se supone que la transferencia de calor radiante puede ser aproximadamente la que se obtiene por la siguiente ecuación:

$$q_r = h_r A (t_G - t_w) \quad (1.2.16)$$

Todo el calor transferido en estado estable hacia la chaqueta se utiliza para evaporar N_s Kg. de líquido, es decir:

$$q = - N_s \lambda_w \quad (1.2.17)$$

la proporción de calor sensible transferido hacia la chaqueta es igual al calor latente transportado por la masa N_s . Combinando las ecuaciones (1.2.14), (1.2.15) y la (1.2.16) se obtiene:

$$(h_G + h_r) A (t_G - t_w) = - K_G A (W_w - W_G) \lambda_w$$

si las áreas para la transferencia de calor son iguales, entonces se tiene:

$$t_G - T_w = \frac{K_G \lambda_w}{h_G + h_r} (W_w - W_G) \quad (1.2.18)$$

esta ecuación relaciona la temperatura de bulbo húmedo con la humedad del gas como se hizo con la ecuación (1.2.13) con respecto a la temperatura adiabática de saturación, siempre y cuando puedan obtenerse los valores predecibles a los términos:

$$K_G \lambda_w / (h_G + h_r)$$

Los coeficientes de transferencia dependen del flujo particular, de las condiciones límite, y de las condiciones para la temperatura. Al medir la temperatura del bulbo se debe asegurar el que se puedan producir los valores de:

$$K_G \lambda_w / (h_G + h_r)$$

El coeficiente de radiación se hace mínimo impidiendo que la chaqueta del bulbo quede en contacto con los alrededores. El gas en movimiento, al pasar por el bulbo lo tiene que hacer muy rápido, y para conseguir esto, se le da vuelta rápida al termómetro en el interior del gas utilizando un aparato llamado psicrómetro, o bien insertando el bulbo húmedo del termómetro dentro de un orificio en la trayectoria de el flujo del gas. Bajo estas condiciones, la ecuación (1.2.18) se reduce a:

$$t_G - T_w = \frac{K_G \lambda_w}{h_G} (W_w - W_G) \quad (1.2.19)$$

Como se puede observar la ecuación (1.2.13) y la ecuación anterior son idénticas, por lo tanto, *la temperatura adiabática de saturación es igual a la temperatura del bulbo húmedo para el sistema aire-agua*. Esto no ocurre para otros sistemas.

Para otros sistemas que no son aire-agua, el comportamiento en un aparato de contacto entre las fases para la saturación es bastante complejo. Si las consideraciones generales de la columna satisfacen el modelo adiabático, el líquido y el gas que entran y que salen deben estar relacionadas en sus funciones mediante la ecuación de saturación adiabática. Esta ecuación no da información acerca de la trayectoria de la entalpía para la humedad, ni para la fase líquida, ni para la fase gaseosa en diferentes puntos dentro del equipo de contacto. Cada punto dentro del sistema debe estar conforme a la relación del bulbo húmedo, la cual requiere que la transferencia de calor se consuma como calor latente de vaporización de la masa transferida. El considerar una torre de saturación adiabática para el sistema indicado, muestra que el líquido que entra y que sale debe de estar a la temperatura de saturación adiabática, tal como sucede con el gas de salida. Las especulaciones que se hagan sobre la trayectoria, indican que el gas puede seguir una línea recta que una las condiciones iniciales y las de saturación adiabática, con las consiguiente oscilación de la temperatura de líquido para seguir la temperatura requerida del bulbo húmedo; o sea, que mientras el líquido pudiera permanecer constante en una temperatura para el punto de saturación adiabática, el gas puede seguir una trayectoria durante la humidificación que podría satisfacer las relaciones del bulbo húmedo en todos los puntos dentro de la columna. Probablemente hay algún cambio en la temperatura del líquido, y se puede predecir alguna dificultad en seguir la trayectoria de la temperatura del gas y de la composición, así que en todos los puntos del sistema, la relación del bulbo húmedo se satisface también en los extremos del sistema se satisfacen las condiciones de saturación adiabática. Si N_{sc} es constante a través de todo el rango de temperaturas y de humedades cubiertas por una sola línea de temperatura constante del bulbo húmedo, la ecuación (1.2.19) nos muestra que la línea será una recta. Se ha visto que para los gases de composición fija, ambas D y v , varían aproximadamente con la temperatura elevada a la tres medios. La difusividad de masa D varía solamente un poco sobre la concentración. Así que, *la variación de N_{sc} es ligera y puede considerarse despreciable cuando la saturación tiene lugar a una baja humedad molar*. Para que las líneas sean rectas y paralelas, la relación $K_G \lambda_w / h_G$ debe ser constante a través el rango de temperaturas y de humedades cubiertas por la carta.

N_{sc} y λ_w pueden ser constantes o bien variar compensándose. Para el sistema aire-agua las líneas son aproximadamente rectas y paralelas.

Las curvas que conectan todos los puntos y que tienen la misma temperatura adiabática de saturación se grafican también sobre la carta de humedad siendo útiles en los cálculos de humidificación y de secado. Por la ecuación (1.2.12), la pendiente de la línea que conecta cualquier punto y a su temperatura adiabática de saturación es:

$$-C_{H1} / \lambda_{sa}$$

Si C_h es constante para la temperatura y humedad cubierta, el lugar geométrico de todos los puntos que tienen la misma temperatura adiabática de saturación c_h/λ_{sa} será también la pendiente del geométrico. Comúnmente, c_h no es constante, aumenta cuando la humedad aumenta. Entonces, el lugar geométrico de los puntos de temperatura de saturación adiabática fija, llamada **línea de saturación adiabática** la cual es cóncava hacia arriba, como se aprecia en la Fig. 1.3.

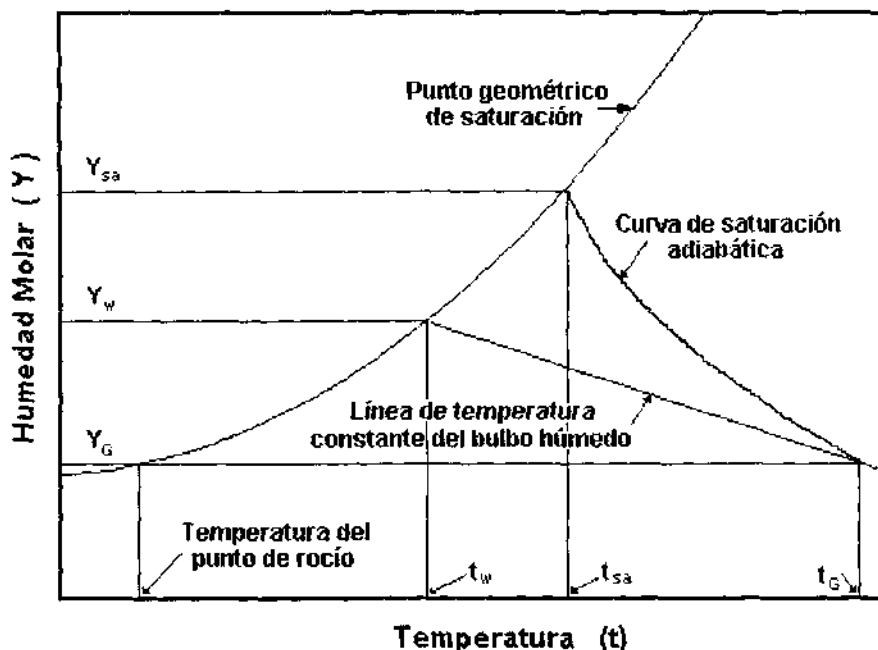


Fig. 1.3 Curvas de temperatura constante en bulbo húmedo y de temperatura de saturación adiabática, sobre una gráfica de humedad.

En esta figura, la línea de temperatura adiabática de saturación y la línea de temperatura del bulbo húmedo son idénticas, esto es:

$$t_G = Y_G$$

Para el sistema aire-agua, o cualquier otro para el cual es válida la relación de Lewis, la línea de temperaturas constantes para la saturación adiabática y línea de las temperaturas constantes para el bulbo húmedo serían idénticas. Es decir:

$$t_w = t_{sa}$$

Se acostumbra hacer una gráfica separada de volúmenes contra temperatura para dar la información sobre el volumen húmedo y no se presenta mediante coordenadas de humedad contra temperaturas, como se esperaría que sucediese. En ésta gráfica se aprecia el volumen específico del componente incondensable, así como el volumen específico de la mezcla de vapor-gas saturado. A partir de estas curvas, puede determinarse el volumen húmedo de cualquier mezcla, vapor-aire, mediante la saturación por ciento.

$$V_h = V_{seco} + (V_s - V_{seco})(\text{Saturación por ciento}) \quad (1.2.20)$$

donde:

V_h : Volumen húmedo del gas húmedo a $t^\circ\text{C}$

V_{seco} : Volumen específico del gas seco a $t^\circ\text{C}$

V_s : Volumen húmedo del gas saturado a $t^\circ\text{C}$

Estas curvas se superponen generalmente en la carta para la humedad utilizando una escala de temperatura común, pero una ordenada independiente para el volumen.

Las informaciones sobre la entalpía se grafican por separado en la misma forma para el volumen. Así:

$$H = H_{\text{seco}} + (H_s - H_{\text{seco}})(\text{por ciento de saturación}) \quad (1.2.21)$$

los subíndices **seco** y **s**, se refieren a las condiciones secas y saturadas respectivamente; los valores de entalpía deben de leerse para una sola temperatura. Como en el caso de la gráfica del volumen, las curvas de la entalpía para el gas seco y saturado, se superponen en la carta para la humedad, utilizando la misma escala de temperaturas pero una ordenada independiente para la temperatura en función de la entalpía.

Las ecuaciones (1.2.20) y (1.2.21), se aplicarán solamente a soluciones ideales en las cuales no hay cambios en el volumen ni efecto térmico cuando se mezclan dos componentes sin tomar en consideración la concentración de la mezcla. En la mayor parte de los casos en donde se emplean las ecuaciones (1.2.20) y (1.2.21). La fase gaseosa es una solución muy diluida de componentes que son químicamente inertes uno con respecto del otro; y la suposición de que el sistema se comporta de acuerdo con el modelo de una solución ideal es bastante precisa. Sin embargo, las soluciones gaseosas no siguen las leyes de las soluciones ideales en todos los casos y se debe tener cuidado cuando la concentración del vapor sea grande.

La entalpía de una mezcla vapor-aire puede determinarse también directamente gracias a la carta de humedad sin emplear la ecuación (1.2.21). Este método aplica el hecho de que las líneas de temperatura constante para la saturación adiabática son también líneas de entalpía casi constantes.

Una carta para humedad en el sistema aire-agua con una presión de 1 atm. se muestra en la Fig. 1.4.

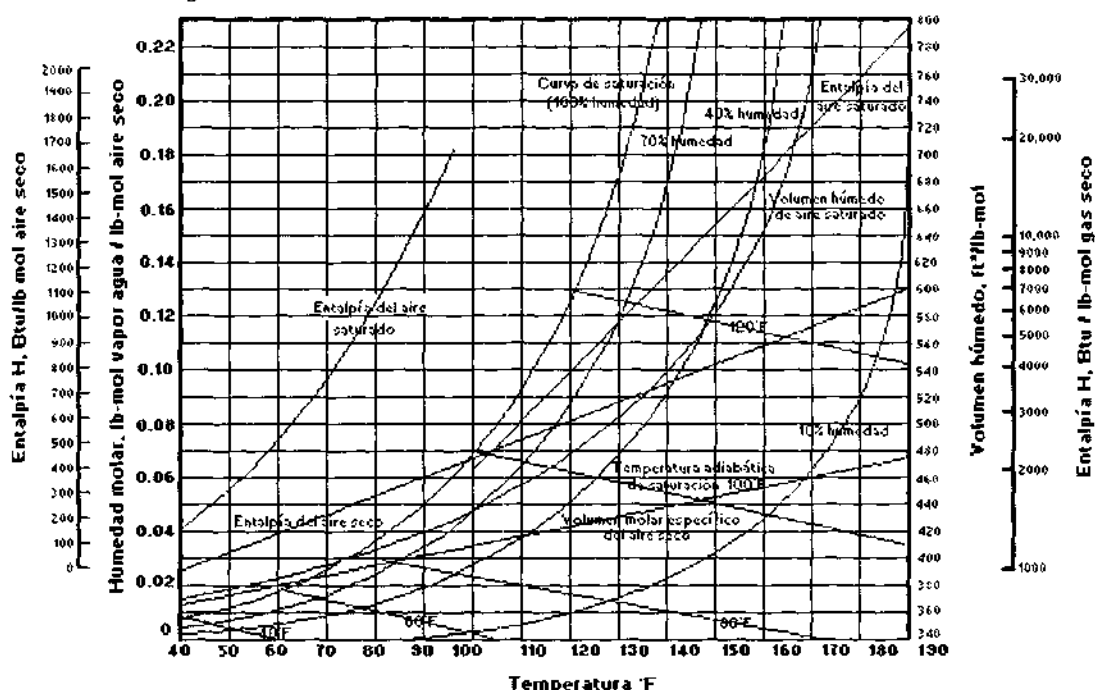


Fig. 1.4 Carta psicrométrica para el sistema de aire-agua a 1 atm.

El lugar geométrico de saturación, las líneas de humedad fija por ciento, y las líneas de temperatura constante para la saturación adiabática se grafican mediante coordenadas de humedad contra temperatura en esta carta. Puesto que la carta es para un sistema aire-agua las líneas de temperatura constante para la saturación adiabática son también líneas de temperatura constante para el bulbo húmedo, las líneas son casi rectas, paralelas y espaciadas a 20°F a lo largo de la curva de saturación, hay otras dos curvas: una con coordenadas de volumen húmedo contra temperatura sobre la cual se grafican los volúmenes de aire seco y aire saturado, y otra con coordenadas de entalpía contra temperatura, sobre la cual están graficadas las entalpías del aire seco y aire saturado.

Tal como sucede con cualquier presentación de datos termodinámicos, los detalles de la carta dependen del sistema representado de las unidades seleccionadas, de las bases utilizadas y de la presión, temperatura y humedad. La carta de la Fig. 1.4 se aplica a una presión total de 1 atm. para el sistema binario aire-agua. Los cambios significativos en la presión total, o bien cantidades de un tercer componente, como el CO_2 , impedirá el empleo de la carta.

Las unidades se han dado basadas en un Kilogramo de aire seco y las entalpías se han calculado utilizando bases de $H=0$ para el aire seco a 0°C y 1 atm de presión, y para el agua líquida a 0°C y a su punto triple de presión. Las cartas para la humedad han sido publicadas para otros sistemas que no sean aire-agua, con bases diferentes, con cantidades significativas de un tercer componente y con diferentes variables utilizadas como coordenadas principales. La amplia aplicación a cálculos de Ingeniería Química, es lo que ha hecho que esta carta sea una de las más empleadas.

1.3 PROGRAMA

El programa siguiente es una adaptación del proyecto Vanmegamo de la BUAP año 1975 (programado en el lenguaje de fortran, con tarjetas para un computador I.B.M. 1130). [1.6]

El programa de *Cálculo de los puntos de la Carta Psicrométrica*, calcula los valores para trazarla, da una serie de datos tabulados. La décima curva es la curva de saturación relativa o curva del 100% de humedad. De las 11 tablas que se calculan, las diez primeras son representativas de las temperaturas y contenidos de humedad, correspondientes a las 9 curvas de humedad relativa.

La primera tabla es representativa de los puntos de la curva del 10% de humedad relativa, ésta tabla en su primera columna despliega las temperaturas en grados Kelvin, dentro del rango de temperaturas inicial y límite, con una variación de 1°K por cada renglón, la segunda columna representa a los valores de la presión_{vapor} del vapor de agua en la mezcla vapor-aire, a las condiciones de presión total y temperatura para cada curva; la tercera columna representa la humedad correspondiente a una temperatura y presión_{vapor} calculada, para la línea de saturación porcentual correspondiente; la cuarta columna da el calor húmedo en función al contenido de humedad en la muestra, y la quinta columna proporciona los valores del volumen húmedo, dadas las características de temperatura y humedad calculada de la mezcla vapor de agua.

La décima primera tabla representa los valores de los diferentes puntos que servirán para poder trazar las curvas de enfriamiento adiabático o de entalpía constante, a intervalos de 5°C dentro de un rango de temperaturas de 10 a 85°C . En esta tabla encontramos que la primera columna representa los valores de la temperatura del bulbo húmedo, la siguiente columna es el resultado del cálculo de la presión vapor de la mezcla, la tercera representa la temperatura del bulbo seco (temperatura del aire), en la columna central se pueden leer los

valores para la humedad a saturación, la quinta columna representa el calor latente de vaporización del agua, la columna 6 es la humedad de la muestra a las condiciones sobre la línea de enfriamiento adiabático y la última columna representa la entalpía de la mezcla vapor de agua-aire. Se proporcionan dos series de tabulaciones, una para la presión normal de una atmósfera a 760 mmHg y otra para la presión de la ciudad de Puebla, siendo estimada como de 0.85 atm ó 646 mmHg, para la temperatura de 90°C como límite superior y como límite inferior una temperatura de 10°C, estas se presiones se pueden adecuar a la conveniencia del usuario del programa. El procedimiento de cálculo da comienzo con el cálculo de las constantes Q y O de la ecuación de Clausius-Clapeyron para poder calcular el valor de las presiones vapor del agua en la mezcla vapor de agua-aire a partir de las temperaturas y presiones dadas, los valores de las constantes se obtuvieron a partir de la resolución simultánea de las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}\log P_1 &= O + Q/T_1 \\ \log P_2 &= O + Q/T_2\end{aligned}$$

resolviendo simultáneamente ambas ecuaciones:

$$\begin{aligned}\log P_2 - \log P_1 &= Q (1/T_2 - 1/T_1) \\ \log P_2/P_1 &= Q (1/T_2 - 1/T_1) \\ Q &= (\log(P_2/P_1)) / (1/T_2 - 1/T_1) \\ O &= \log P_2 - Q/T_2\end{aligned}$$

Después se sustituyen los valores de las constantes Q y O en la ecuación que nos dará el valor de la presión parcial del vapor de agua en la mezcla aire-agua.

$$P = (e)^{2.303(O-Q/T_1)}$$

el valor calculado de la presión parcial del vapor de agua en la mezcla se sustituye en la ecuación que define la humedad a la saturación afectada por el incremento para cada caso, así:

$$W = 0.6202 (P / (760-P)) (INC)$$

Con el valor de la humedad calculado se puede obtener el valor del calor húmedo "S" con la ecuación:

$$S = 0.24 + 0.45A$$

Con el mismo valor de la humedad calculada también se calcula el volumen húmedo a esas condiciones:

$$V = 22.41 + (0.082)(T_1 - 273.2)(1/29 + W/18)$$

Al concluir esta secuencia de valores calculados la máquina tiene instrucciones de imprimir los valores que calculó en forma de tabla, después de imprimirlos irá a una proposición que le indicará si debe incrementar la temperatura (T_1), o si debe hacer el incremento (INC) para cada curva, si la proposición le indica que aumente la temperatura, esto lo hará en 1°C y empezará nuevamente la secuencia de cálculo, los nuevos valores los imprimirá y llegará nuevamente a la misma proposición, si no ha llegado al límite de temperatura, si se acaba de calcular el último valor, incrementará el valor de la variable INC y con esto automáticamente escribirá un nuevo letrero que encabezará la siguiente tabla, escribiendo en él a qué curva de saturación porcentual se refiere y dando lugar al inicio de un nuevo cálculo de las variables ya descritas y repitiéndose la secuencia hasta terminar la décima tabulación que corresponde a la curva del 100% de saturación relativa.

La tabla final es la que nos proporciona las funciones complementarias a la carta de humedad, en ella como principal objetivo se buscó el obtener los puntos que representan las líneas de enfriamiento adiabáticos o de entalpía constante para su trazado; se inicia el cálculo considerando una temperatura de bulbo húmedo igual a 10°C, después se hace que la temperatura del bulbo seco sea igual a la temperatura del bulbo húmedo; ahora se calcula la presión parcial del vapor de agua en la mezcla y con su valor se obtiene la humedad a saturación denominada W_{sat} , el siguiente cálculo proporciona el calor latente de vaporización para diferentes temperaturas de bulbo húmedo. La entalpía de la muestra es calculada como una función de T_w , $Clat$ y T_g y la humedad de la muestra a lo largo de las diferentes condiciones del proceso de enfriamiento adiabático se calculó como W_g (como humedad del gas). Al llegar a este último cálculo se toma la primera decisión; si la primera curva de enfriamiento adiabático no ha alcanzado su máximo valor representativo en cuanto se refiere a la magnitud de la temperatura, la computadora imprimirá los resultados de los cálculos efectuados, y hará un incremento en la temperatura del bulbo seco del aire en 5°C, y empezará a repetir los cálculos en la proposición de la humedad a saturación (W_{sat}) para una nueva temperatura del aire, incrementada en 5°C de esta manera concluirán todos los cálculos y nuevamente llegará a la decisión en la cual sino se ha llegado a la temperatura del aire igual a 100°C volverá a empezar los cálculos con un nuevo incremento para T_g y así sucesivamente hasta llegar al valor de $T_g=100$, en el cual pasará a escribirlo y aumentará en 5°C el valor de T_w , dando origen a la siguiente curva que será la curva correspondiente a la temperatura de 15°C de enfriamiento adiabático, iniciándose el cálculo de los puntos de esta nueva curva precisamente en el lugar geométrico en donde se hacen iguales las temperatura del bulbo seco y la temperatura del bulbo húmedo, iniciándose nuevamente la secuencia de cálculo para T_g y también debiendo terminarse en $T_g=100$, momento en el cual se incrementará la T_w incrementada anteriormente y dando principio a una nueva curva, y así sucesivamente hasta llegar a la curva correspondiente de los 85°C, la cual aún se imprimirá completa, al llegar a este punto la computadora dará por concluido el programa de tabulación de las curvas.

1.3.1 Lista de variables y constantes empleadas en el programa, su significado y las unidades en que se encuentran dadas.

Variables	DESCRIPCIÓN Y UNIDADES
T2.....	Temperatura límite superior, °K
P1.....	Presión límite inferior, mmHg
T.....	Temperatura límite Inferior, °K
P2.....	Presión límite superior en mmHg
Inc.....	Incremento adimensional, menor que 1
Q.....	Constante de Clausius-Clapeyron
O.....	Constante de Clausius-Clapeyron
P.....	Presión parcial del vapor de agua en la mezcla en mmHg
W.....	Humedad, Kg de vapor/Kg de aire seco
S.....	Calor húmedo, Kcal/°CKg de aire
V.....	Volumen húmedo en m ³
TA.....	del bulbo húmedo, °C
H.....	Entalpía, Kcal/Kg aire
TG.....	Temperatura del bulbo seco, °C
Pes.....	Presión parcial del vapor de agua en la mezcla, mmHg
Wsat.....	Humedad a saturación, Kg de agua/Kg de aire seco
Clat.....	Calor latente de Vaporización, Kcal/Kg agua
WG.....	Humedad de la muestra, Kg agua/Kg aire seco

Referencias Bibliográficas

1.1 Principios de Operaciones unitarias

A.S.Foust, L.A. Wensel, C.W. Clump, Louis Maus y L.B. Andersen
Editorial C.E.C.S.A. 1972

1.2 Programación en Turbo Pascal

Luis Joyanes Aguilar
Mc Graw Hill 1994

1.3 Métodos de cálculos en los procesos de transferencia de materia.

H. Sawistowski y W. Smith
Editorial Alhambra 1964

1.4 Manual del Ingeniero Químico

J.H. Perry
Editorial Mc Graw Hill (2a. Edición en español) 1986

1.5 Operaciones de transferencia de masa

Robert E. Treybal
Editorial Mc Graw Hill 1988

1.6 Proyecto de tesis Avanzado de la BUAP año 1975

Ing. Gustavo Avila Arias.

1.7 Fortran 77

M.Z. Smith (IBM Corporation)
Houghton Mifflin Company Boston 1985

CAPÍTULO 2

MODELO Y SIMULACIÓN DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO PARA AIRE/AGUA

2.1 DEDUCCIÓN DE LAS ECUACIONES

Teoría : Existen varios modelos para la transferencia de masa y de calor simultáneas, las cuales llevan implícitas diversas suposiciones, aquí se usará el siguiente modelo [2.1] :

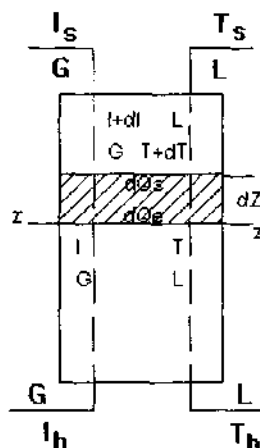


Fig. 2.1 Balance de calor a una altura diferencial de la columna

El agua pierde calor por transmisión de calor sensible y por evaporación. Para una altura diferencial de la torre dz y una área de la sección transversal A (como se muestra en la Fig. 2.1), se puede dar la ecuación para la transmisión de calor sensible siguiente:

$$dQ_s = h_g a (T - t) A dz \quad (2.1.1)$$

donde:

h_g : coeficiente de transmisión de calor en la fase gaseosa.

a : área interfacial por unidad de volumen de la torres

T : temperatura másica del agua a la altura " z " de la torre.

t : temperatura másica del aire a lo largo de la torre.

La ecuación anterior es sólo aproximadamente correcta porque el coeficiente individual de transmisión de calor se utiliza junto con la fuerza impulsora global. Por lo tanto se supone que toda la resistencia a la transmisión de calor está localizada en la fase gaseosa: *es decir, que la resistencia a la transmisión de calor en el agua es despreciable*. Esto se puede considerar verdadero debido a que el coeficiente de transmisión de calor para el agua es mucho mayor que el del aire. La transmisión de calor por evaporación puede expresarse como producto de la cantidad de agua transferida por difusión a través de la película del aire, así el calor latente de evaporación será:

$$dQ_e = \lambda K_G a P M_A (P/(P-p)_{ml}) (p_i - p) Adz \quad (2.1.2)$$

donde:

λ : calor latente de evaporación

K_G : coeficiente de transferencia de materia en la fase gaseosa en moles por unidad de tiempo, unidad de área interfacial y unidad de presión.

$P M_A$: peso molecular del agua

P : presión total

p : presión parcial del vapor de agua en el aire.

p_i : presión parcial del vapor de agua en la interfase igual a la presión de vapor saturada a la temperatura del agua. (la temperatura de la interfase es igual a la temperatura másica o del seno del agua).

$(P-p)_{ml}$: Presión parcial media logarítmica del aire.

Si se analiza el término $P/(P-p)_{ml}$ denominado **factor de arrastre**, representa el efecto del caudal másico de vapor de agua sobrepuesto a la transferencia por difusión. La expresión $(P-p)_{ml}$ es la presión parcial medida logarítmica del aire a través de la película del mismo.

La humedad absoluta, H , está dada por:

$$H = (P M_A / P M_a) p / (P - p) \quad (2.1.3)$$

donde $P M_a$ es el peso molecular del aire, se tiene:

$$p = (P - p) H (P M_a / P M_A) \quad (2.1.4)$$

sustituyendo la ecuación (2.1.4) en la (2.1.2), resulta:

$$\begin{aligned} dQ_e &= \lambda K_G a P M_A P / (P - p)_{ml} [(P - p_i) H_i - (P - p) H] A dz \\ dQ_e &= \lambda K_G a P M_A P ((P - p) / (P - p)_{ml}) [(P - p_i) / (P - p) H_i - H] A dz \end{aligned}$$

donde:

H_i : es la humedad absoluta en la interfase a la humedad de saturación a la temp. del agua.

Los valores $(P - p) / (P - p)_{ml}$ y $(P - p_i) / (P - p)$ son muy próximos a la unidad, por lo que la ecuación (2.1.5) se simplifica a:

$$dW_e = \lambda K_G a P M_A P (H_i - H) Adz \quad (2.1.5)$$

$$dW_e = \lambda K_H a (H_i - H) Adz \quad (2.1.6)$$

donde $K_H = K_G P M_A$ es el coeficiente de transferencia de materia en la fase gaseosa a utilizar con un fuerza impulsora expresada en función de las humedades.

La entalpía del aire húmedo, I , es igual a:

$$\begin{aligned} I &= s(t - t_o) + \lambda_o H \\ s &= C_a + C_v H \end{aligned} \quad (2.1.7)$$

donde:

s : calor húmedo

C_a : calor específico del aire, 0.24 (Aprox.)

C_v : calor específico del vapor de agua, 0.45 (aprox)

t_o : temperatura normal de referencia

λ_o : calor latente de evaporación a t_o

Sustituyendo la expresión para λH de (2.1.7) en (2.1.6), suponiendo λ_o aproximadamente constante, se obtiene:

$$dQ_e = K_H a [(I_i - I) - s(T - t)] Adz \quad (2.1.8)$$

La cantidad total de calor total eliminada del agua en la sección se obtiene sumando las ecuaciones (2.1.1) y (2.1.8):

$$\begin{aligned} dQ &= dQ_s + dQ_e \\ dQ &= a \{ h_w (T - t) + K_H [(I_i - I) - s(T - t)] \} Adz \\ dQ &= K_H a [(h_w / K_H - s)(T - t) + I_i - I] Adz \end{aligned} \quad (2.1.9)$$

Para el sistema aire-agua, h_w / K_H es aproximadamente igual a s , es decir,

$$(h_w / K_H) - s = 0$$

por lo que la ecuación (2.1.9) se convierte en:

$$dQ = K_H a (I_i - I) Adz \quad (2.1.10)$$

La entalpía del aire aumentará al pasar a través de la sección transversal y la del agua disminuirá en dQ , así que

$$dQ = G dI = L C dT \quad (2.1.11)$$

donde:

C : calor específico del agua

G : caudal del aire

L : caudal de agua

Combinando las ecuaciones (2.1.10) y (2.1.11) se obtiene:

$$G dI = K_H a (I_i - I) Adz \quad (2.1.12a)$$

$$L C dT = K_H a (I_i - I) Adz \quad (2.1.12b)$$

separando variables e integrando:

$$\int_{I_b}^{I_s} dI / (I_i - I) = K_H a A z / G \quad (2.1.13a)$$

$$\int_{T_b}^{T_s} C dT / (I_i - I) = K_H a A z / L \quad (2.1.13b)$$

donde z es la altura de relleno y los subíndices b y s se refieren a la base y parte superior de la torre respectivamente.

Los primeros miembros de las ecuaciones (2.1.13a) y (2.1.13b) son similares a las expresiones de las unidades de transferencia utilizadas en los procesos de transferencia en contracorriente.

Para diferenciar las dos expresiones, **integral de $dl/(l_i - l)$** se denominará número de transferencia del gas, N_G , puesto que está basada en la variación de entalpía de la fase gaseosa, **integral de $C dT/(l_i - l)$** número de unidades de transferencia de líquido, N_L , puesto que se basa en la variación de entalpía de la fase líquida, así por definición:

$$N_G = \int_{l_b}^{l_s} dl/(l_i - l) \quad (2.1.14a)$$

$$N_L = \int_{T_b}^{T_s} C dT/(l_i - l) \quad (2.1.14b)$$

Por analogía con otros procesos de transferencia de materia se pueden definir ahora las alturas de las unidades de transferencia de gas y líquido.

De las ecuaciones (2.1.13):

$$H_G = G/K_H a A \quad (2.1.15a)$$

$$H_L = L/K_H a A \quad (2.1.15b)$$

por lo que:

$$z = N_G(H_G) \quad (2.1.16a)$$

$$z = N_L(H_L) \quad (2.1.16b)$$

Al pasar de la ecuación (2.1.12b) a la (2.1.13b) se supuso que "L" era constante, debido a la evaporación, L disminuye a medida que el líquido desciende por la columna sin embargo la cantidad evaporada es pequeña comparada con el caudal total del líquido.

La teoría del enfriamiento del agua por contacto directo y de los procesos de humidificación, v.g. aplicable al sistema aire-agua, se basa en el supuesto caso de que:

$$h_G/K_H s = 1 \quad (2.1.17)$$

El coeficiente de materia K_H , utilizado antes se define por la siguiente ecuación de velocidad:

$$N_A = K_H(H_i - H) \quad (2.1.18)$$

donde:

N_A es el flujo de transferencia de materia.

Este puede expresarse también como:

$$N_A = (K_G)_c (C_w - C_v) \quad (2.1.19)$$

donde C_v es la concentración másica del vapor de agua por unidad de volumen de aire, la relación entre los dos coeficientes de transferencia de materia se obtiene combinando las ecuaciones (2.1.18) y (2.1.19)

$$K_H = (K_G)_c (C_w - C_v)/(H_i - H) = (K_G)_c \rho_a \quad (2.1.20)$$

sustituyendo en la ecuación (2.1.17) y transponiendo términos, resulta :

$$h_G / \text{sup}_a = (K_G)_c / u \quad (2.1.21)$$

que representa la analogía de Reynolds entre la transmisión de calor y la transferencia de materia. La ecuación (2.1.17) de calor es por lo tanto válida para las condiciones en que se aplica la analogía de Reynolds. Estas condiciones pueden definirse mediante lo siguiente:

Los coeficientes de transmisión de calor y transferencia de masa pueden representarse como:

$$h_G = K / S_H \text{ y } (K_G)_c = D / S_p \quad (2.1.22)$$

donde **K** es la conductividad térmica de la difusibilidad másica y **S_H** y **S_p** son el espesor de la "película" para transferencia de calor y el espesor de difusión respectivamente. Sustituyendo la ecuación (2.1.22) en (2.1.17) e introduciendo el concepto de difusibilidad térmica, **D_H**, que es igual a **K/C_pρ** (**K/S_pρ** en el presente caso), y el número de Lewis, **Le**.

$$Le = D_H / D = K / D_s \rho_a \quad (2.1.23)$$

se obtiene:

$$Le(S_p / S_H) = 1$$

de la ley de la tercera potencia [2.2] :

$$S_p / S_H = (D / D_H)^{1/3} \quad (2.1.24)$$

por lo que:

$$Le^{2/3} = 1, \text{ es decir } Le = 1 \quad (2.1.25)$$

La deducción anterior constituye la base teórica de la analogía de Chilton y Corburn entre transmisión de calor y transferencia de materia. Esta analogía se ha confirmado experimentalmente, por lo que la ecuación (2.1.17) puede considerarse válida, si el número de Lewis es igual a 1, por lo que es aproximadamente cierto para el sistema aire-agua.

Suponiendo que el problema fuese diseñar e instalar una torre de enfriamiento para tratar un determinado gasto de agua que estará en la torre a una que se encuentra dentro de los límites que la experiencia aconseja. Se ha determinado que la localidad donde se va instalar tiene una temperatura húmeda 5 por 100" de 21°C. La aproximación de temperatura que se desea es de 6°C a la temperatura húmeda extendiéndose por aproximación como la diferencia entre la temperatura del agua y la salida de la temperatura húmeda del aire a la entrada.

Se calcula y evalúa el trabajo las dimensiones que se requieren así como el costo para cada uno de los tres tipos de torres más comunes.

2.1.1 CÁLCULO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA TORRE

TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO INDUCIDO

2.1.1.1 Determinación de la razón mínima aire-agua.

Para evitar el tener que suponer una razón aire-agua basándose en experiencias, algunos autores recomiendan otro método diferente, similar al que se usa en absorción. La razón mínima aire-agua se define como la razón a la cual, en una torre infinitamente larga el

aire dejaría la torre saturado a la temperatura de entrada del agua. En un caso general, la razón mínima aire-a-a corresponde a una línea de operación que une el punto de operación de la base "A" y el punto B'(T_s, I_{is}) indicado en la Fig. 2.2 con una línea de trazo en algunos casos, como el presente, una línea de operación trazada de esta manera, cortaría la línea de equilibrio.

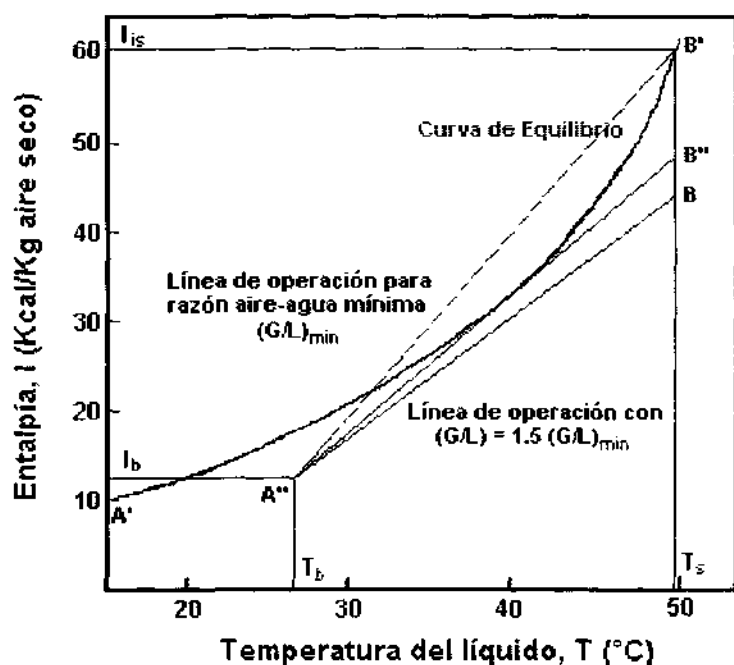


Fig. 2.2 Determinación de la mínima razón aire-agua.

En tal caso, la relación mínima aire-agua se define como aquella que da una línea de operación tal que trazada desde el punto de operación de la base es tangente a la línea de equilibrio ("AB").

Para encontrar el punto de tangencia entre la curva de equilibrio dentro del sistema aire-agua y la línea de operación de la torre de enfriamiento a tratar, debemos de tener las ecuaciones de ambas líneas.

La ecuación de la curva de equilibrio se determina trazando la curva en base a datos de entalpía de aire saturado frente a temperatura encontrados por ejemplo en la 3a. Ed. del Manual del Ing. Químico de John H. Perry. Posteriormente, dicha curva se traza en papel semilogarítmico obteniéndose una recta de la cual se toman dos puntos y así se obtiene la ecuación (2.1.26) que resulta ser exponencial la figura muestra las aseveraciones anteriores (Fig. 2.3).

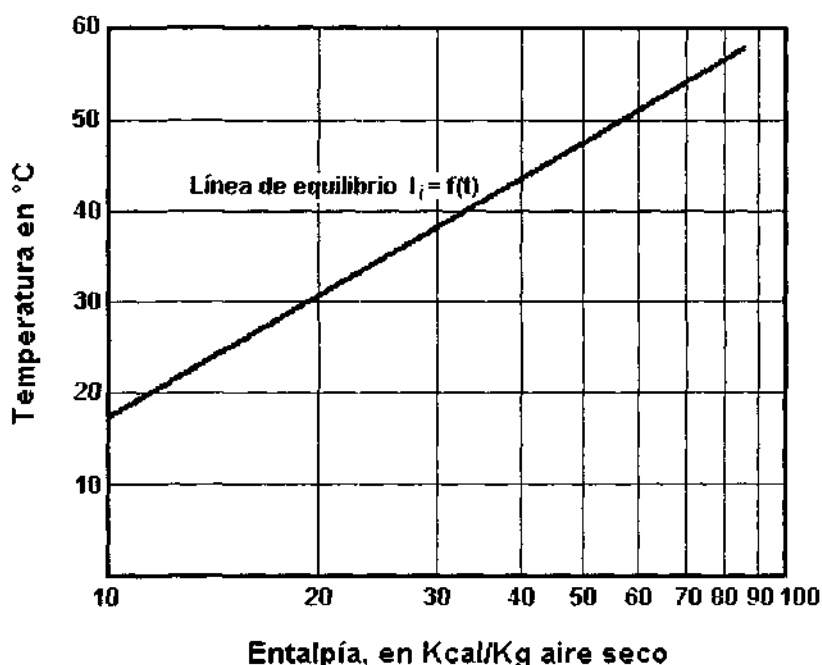


Fig. 2.3 Variación de la entalpía con la temperatura.

Por lo que toca a la ecuación de la línea de operaciones de la torre a diseñar esta se obtiene en base a las condiciones de operación de dicha torre, dando la ecuación (2.1.27).

$$y = 50.6329 \log x - 43.363 \quad (2.1.26)$$

$$y = 1.2727 (x-27) + 14.051 \quad (2.1.27)$$

Resolviendo las ecuaciones (2.1.26) y (2.1.27) simultáneamente se obtiene la ecuación (2.1.28)

$$50.6329 \log x - 1.2727x + 1.2727(27) - 57.414 = 0 \quad (2.1.28)$$

Esta última ecuación sólo se puede resolver por aproximaciones sucesivas para introducirla al lenguaje de máquina se recurre al artificio de reorganizar el problema de manera que la máquina lo resuelva, en el diagrama de flujo (Apéndice B) se muestra este arreglo, en dicha figura se nota que se introducen como datos las variables TWbas y APROX especificados en el principio del programa como temperatura del bulbo húmedo del aire y aproximación de temperatura respectivamente, ambas en grados centígrados. Además entra el dato constante de PEND, siendo este la pendiente de la línea de operaciones el cual irá abatiéndose sucesivamente de acuerdo a la proposición:

$$PEND = PEND - 0.5$$

La razón de éste abatimiento es encontrar el punto de tangencia entre las dos líneas. La máquina va calculando las intersecciones sucesivas a medida que la pendiente de la línea de operación va declinando hasta llegar al punto de tangencia en el cual pasará automáticamente a calcular la siguiente parte del diseño, la lógica que sigue en esta parte del problema se basa en las proposiciones:

$$\text{IF (RES-0)} \geq 0$$

$$\text{IF (RES-73)} \geq 0$$

$$\text{IF (PEND -2)} \geq 0$$

Siendo la variable RES una de las obtenidas al resolver las ecuaciones simultáneas de la línea de operación y la curva de equilibrio.

Las dos primeras expresiones nos dicen que RES deberá estar entre 0 y 73. Esto es para que la máquina deje de calcular aproximaciones en el momento en que llegue al valor superior para pasar al siguiente cálculo, en el momento que no encuentre intersección dejará de aproximar ya que habrá encontrado la pendiente óptima y pasará a calcular la razón mínima aire-agua, definidas en el programa por Gmin dada por la proposición:

$$GL_{min}=1/PEND$$

La ventaja del programa es el hecho de que evalúa el diseño de torres de enfriamiento haciéndolo para 1, 1.5 y 2.5 veces la razón mínima aire agua sin llegar al uso de aproximaciones complejas o subrutinas grabadas.

En las torres de enfriamiento la razón mínima de aire-agua varía normalmente entre 1 y 2 y el intervalo de la velocidad del aire está entre 1.85 y 2.44 m/seg.

Utilizando como primer tanteo un valor de 2.13 para la velocidad del aire, se puede suponer el gasto del aire a través de la torre y la sección transversal de ésta y sus dimensiones, para después darle cierto factor de tolerancia a las dimensiones anteriormente dichas y así recalcular una nueva velocidad del aire en la que se basa el cálculo de todo lo que suceda a esto.

La secuencia que sigue esta parte del programa es la siguiente:

2.1.1.1.1 CÁLCULO DEL GASTO DEL AIRE A TRAVÉS DE LA TORRE.

Se utilizan las proposiciones:

$$\begin{aligned} RAZO &= RAZ * GL_{min} \\ G &= (RAZO * AI * \rho_{oa}) / 60 \end{aligned}$$

donde:

- RAZ:** El número de veces la razón mínima aire-agua
- RAZO:** la razón mínima multiplicada por el número de veces raz
- G:** Gasto del aire a través de la torre
- AI:** caudal del agua en m³/min
- roa:** Densidad del agua en Kg/m³
- 60:** Conversión a Kg/s

2.1.1.1.2 CÁLCULO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA TORRE

Para las condiciones del aire de entrada se deduce del diagrama psicrométrico, que el volumen saturado a 21°C es 0.855 m³/Kg. Por lo tanto, el área de la sección transversal requerida en la torre, está dada por:

$$area = (G * VOL_{sa}) / Vel_{Aire1}$$

donde:

- area:** área de la sección transversal en m²
- VOLsa:** Volumen saturado a las condiciones del aire en m³/Kg
- VelAire:** Velocidad supuesta del aire en m/s

Posteriormente el programa calcula las dimensiones de la sección transversal, utilizando para ello las proposiciones:

$$\text{Lado} = \text{area}^{0.5}$$

Donde:

lado: lado de la sección en m, suponiendo a ésta cuadrada.

Se ha adicionado un factor de tolerancia, pues puede haber dilatación en el material de construcción que puede afectar a nuestro diseño debida al cambio, ya sea moderado o brusco de las condiciones atmosféricas. Para esto se usan las proposiciones:

$$\text{lado2} = \text{lado} + 0.03$$

$$\text{area2} = \text{lado}^2$$

donde:

area2: Área de la sección transversal corregida

lado2: Lado de dicha área.

Ahora bien, la velocidad corregida del aire se obtiene de la manera siguiente:

$$\text{CargA} = (G \cdot 3600) / \text{area2}$$

$$\text{CargLi} = (AL \cdot \text{roa} \cdot 60) / \text{area2}$$

$$\text{VelAire2} = (\text{CargA} \cdot \text{VOLsa}) / 3600$$

donde:

CargA: Carga del aire en la sección corregida, en Kg/h m²

CargLi: Carga del líquido en la sección corregida en Kg/h m²

VelAire2: Velocidad corregida del aire en m/s

2.1.1.2 COMPROBACIÓN DEL CAUDAL DEL LÍQUIDO RESPECTO A LAS CONDICIONES DE CARGA

Los cálculos anteriores suponen que la velocidad del aire es la única variable determinante del área de la sección transversal de la torre. Antes de realizar cualquier otro cálculo debe estimarse el efecto del caudal del líquido, es decir, ha de comprobarse la capacidad de la carga de la torre. Para un buen rendimiento, el caudal del líquido debe ser suficientemente elevado para asegurar un mojado satisfactorio del relleno, pero no debe exceder un límite superior en el que comienza el fenómeno de cascada. El caudal mínimo de líquido para el alcance de un completo mojado del relleno, se llama caudal mínimo de humectación o mojado o caudal mínimo efectivo. El caudal de humectación, se define como el caudal volumétrico del líquido por unidad de periferia del relleno.

Es decir:

$$L_h = V_L / P = V_L'' \cdot A / P$$

donde:

V_L: Caudal volumétrico del líquido = V_L'' · A

P: Periferia del relleno

V_L'': Caudal volumétrico del líquido por unidad de área de la sección transversal de la torre (velocidad másica)

A: Área de la sección transversal de la torre

Ahora bien, la periferia por unidad de área P/A es igual al área superficial del relleno por unidad de volumen de lecho (a'), por lo tanto:

$$L = V_L'' / a'$$

Para rejillas con un espaciado de 5.08 cm (2 plg) o menor, Morris y Jackson [2.3] recomiendan $0.08 \text{ m}^3/\text{h m}$ como caudal mínimo de humectación. Puesto que las rejillas de madera de dimensiones $2 \times 2 \times 3/8$ de pulgada tienen una $a' = 42.65 \text{ m}^2/\text{m}^3$, el caudal mínimo del líquido se calcula en el programa por las proposiciones:

$$A_{\min} = CMH \cdot ASR \cdot r_{oa}$$

donde:

Amin: caudal mínimo del agua en Kg/h^2

CMH: caudal mínimo de humectación $\text{m}^3/\text{h m}$ igual a 0.08

ASR: área superficial del relleno por unidad de volumen del lecho $= 42.65 \text{ m}^2/\text{m}^3$

No se dispone de una expresión general para los límites superiores del caudal del agua en las torres con rellenos de rejillas. Sin embargo, es razonable suponer que el caudal del agua no debe exceder de el de carga. El problema se resuelve con las proposiciones siguientes:

$$A_{\max} = CAMX \cdot ASR \cdot r_{oa}$$

donde:

Amax: Caudal máximo permisible del agua a través de la torre, $\text{Kg}/\text{h m}^2$

Cmax: Caudal máximo de humectación en $\text{m}^3/\text{h m}$ igual a 0.265

2.1.2 EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

Mediante un balance de calor alrededor de la base de la torre, es decir, entre la base de la misma y una sección cualquiera se obtiene:

$$\text{Calor de entrada} = \text{Calor de salida}$$

$$G l_b + LC(T - t_b) = G l + LC(t_b - T_o) \quad (2.1.29)$$

donde:

L : caudal de agua

C : calor específico del aire

despejando en esta ecuación de balance de calor, la entalpía:

$$I = LC(T - t_b)/G + l_b - LC(T_b - t_o)/G \quad (2.1.30)$$

Tomando t_o a 0°C como temperatura de referencia, la ecuación anterior se reduce a:

$$I = LC(T)/G + l_b - LC(T_b)/G \quad (2.1.31)$$

Existe, entonces una relación lineal entre I y T (Fig. 2.2) conocida como ecuación de la línea de operación. Trazando una gráfica de I frente a T , la línea de operación tiene una pendiente L/G (ya que el valor numérico del calor específico es la unidad), con una ordenada en el origen igual a $(l_b - LC T_b/G)$.

En la mayoría de los cálculos de las torres de enfriamiento se conocen I_b , T_b y T_s . Por lo tanto, puede trazarse la línea de operación por alguno de los siguientes métodos:

- I. Trácese una línea de pendiente L/G y ordenada en el origen ($I_b - LCT_b/G$), cuyos extremos tengan por abscisas T_b y T_s . El método no es muy práctico, pues el gráfico utilizado no cubre normalmente todo el intervalo de temperatura que empieza en 0°C .
- II. Fijese el punto de operación correspondiente a la base (T_b, I_b) y trácese desde él una línea de pendiente L/G que finaliza en un punto cuya abscisa es T_s .
- III. Calcúlese I_s a partir de la ecuación (2.1.31) y únense los puntos de operación correspondientes a la parte superior y a la base. Este es el método más sencillo y más seguro, y es el que se utilizará en el presente caso.

La temperatura húmeda de la base de la torre es de 21°C . En la tabla psicrométrica que se elaboró se encuentra que la humedad correspondiente es 0.01558 Kg. de vapor de agua/ Kg de aire seco.

La entalpía del aire en la base de la torre puede también leerse en la tabla antes mencionada, o calcularse mediante la ecuación:

$$I = s(t - t_0) + \lambda_0 H \quad (2.1.32)$$

donde:

- s : calor húmedo = $C_a + C_v H$
- C_a : calor específico del aire, 0.24 (aprox.)
- C_v : calor específico del vapor de agua 0.45 (aprox)
- t_0 : temperatura normal de referencia
- λ_0 : calor latente de evaporación a $t_0^\circ\text{C}$

Aquí, λ_0 es el calor latente del agua a 0°C . Puesto que los valores de C_v y C_a se han considerado constantes en el intervalo de temperaturas escogido se puede leer el valor en las tablas calculadas anteriormente.

La aproximación de temperatura especificada es de 6°C . Por lo tanto, la temperatura de la base más la aproximación, y el punto de operación "A" en la base se representa por las coordenadas calculadas.

La entalpía del aire en la parte superior de la torre se calcula mediante la ecuación (2.1.31) y por consiguiente, las coordenadas del punto de operación en la parte superior "B" se puede calcular también. Los dos puntos terminales, A y B, se unen mediante una línea recta que representa la línea de operación.

La parte del este programa que calcula estos puntos, es la siguiente:

```

O=8.9101
Q=-2250.3281
CA=0.2375
CV=0.45
TempR= 0.0
PREva=2.71828^(2.303*(O+Q/TWbas+273.2))
Wsaba=0.6202*(PREva/(760.0-PREva))
ENTab=CA*(TWsab-TempR)+(CVA+(TWbas-TempR)+Clatva)...
TEMPab=TWbas (Aprox)

```

donde:

O y Q constantes de Clausius-Clapeyron para el cálculo de presiones de vapor.

CA: Calor específico del aire, en Kcal/Kg°C

CVA: Calor específico del agua

TempR: Temperatura de referencia en °C

PREva: Presión vapor de agua en mmHg

TWbas: Temperatura de bulbo húmedo en la base. °C

Wsab: Humedad a saturación en la base de la torre

Clatva: calor latente de vaporización del agua.

ENTab: Entalpía del aire seco en la base de la torre

TEMPab: Temperatura del aire en la base de la torre

TWcab: Temperatura del bulbo húmedo del aire en el domo de la torre.

2.1.3 CÁLCULO DE LA ALTURA DEL RELLENO

En la ecuación (2.1.16), se ve que la altura de la torre **Z** es igual al producto del número de unidades de transferencia por la altura de unidad de transferencia. El número de unidades de transferencia se calcula mediante la ecuación (2.1.14) y la estimación de altura de una unidad de transferencia se hace a partir de cifras o expresiones de la bibliografía. En la expresión para el número de unidades de transferencia se encuentran la Entalpía en la interfase agua-aire, I_i , que se supone es igual a la Entalpía del aire saturado a la temperatura másica del agua y la entalpía del aire I . La variación de la primera entalpía con la temperatura del agua viene dada por la línea de equilibrio y la de la última entalpía, por la línea de operación. Los valores de equilibrio (saturación), pueden tomarse de las tablas o del diagrama psicrométrico, puesto que se supone que la temperatura del agua representa la temperatura húmeda con respecto a I_i . A una determinada presión corresponde una línea de equilibrio, como en absorción y en otros procesos de transferencia de materia en contracorriente, el número de unidades de transferencia puede determinarse de varias maneras. Para la evaluación del número de unidades de transferencia del gas N_G , se emplea el método de integración numérica de los trapecios [2.4] que se usa en caso en que los incrementos ΔI no sean demasiado grandes. La ecuación (2.1.14a) puede expresarse así:

$$N_G = \sum \Delta I / (I_i - I)_{medio} \quad (2.1.33)$$

Para resolver la esta integral, el programa calcula la caída de temperatura que se observará a través de la torre mediante la proposición:

$$DT = TWcab - TWbas$$

donde:

DT: es la caída de temperatura.

Se quiso que se tuvieran 14 incrementos de temperatura a medida que el aire asciende a través de la torre, aunque este número se puede variar a criterio. La instrucción es:

$$Incram = DT/14$$

donde:

Incram es el incremento

Se debe saber que una integración numérica se tabula para que se puedan observar cada uno de los pasos intermedios que se llevan a cabo para la resolución de dicha integral, la computadora sigue las siguientes instrucciones:

```
TempT[1]=TWbas
PRE[1]=2.71828....
Wsa[1]=0.6262...
ENT[1]=CA
TempT[2]:=TempT[1]+Increm
PRE[2]:=2.71828 ...
Wsa[2]:=0.6202 ...
ENT[2]:= CA ..
:
PRE[n]:=2.71828 ...
Wsa[n]:=0.6202 ...
ENT[n]:= CA ..
```

Después, vienen sus respectivas órdenes de escritura, cuyo formato está determinado a modo de que se coloquen los resultados para que se tenga una visión clara de la tabulación para resolver la integral.

En esta parte del programa las variables son definitivas de la siguiente manera:

TempT[n] : son las temperaturas de la torre
PRE[n] : presiones vapor a esas temperaturas.
Wsa[n] : las humedades a saturación.
ENT[n] : las entalpías del aire seco
DEL[n] : las medias entre las entalpías y el aire seco
ENTsa[n] : las entalpías del aire saturado
DEN[n] : las diferencias de entalpías del aire saturado y aire seco.
ED[n] : las medias aritméticas de los valores de DEN
SUM[n] : las áreas de los rectángulos

El resultado de la integral es la suma de los valores SUM expresados en las siguientes proposiciones:

$$\text{Integral} = \text{SUM}[1] + \text{SUM}[2] + \dots + \text{SUM}[n]$$

El coeficiente volumétrico de transferencia de masa lo calcula el programa junto con la altura total del relleno, en base a las proposiciones:

$$\begin{aligned}\text{CKHA} &= 6.72 \cdot \text{CargA}^{0.75} \\ \text{HG} &= \text{CargA} / \text{CKHA} \\ \text{Z} &= \text{Integral} \cdot \text{HG}\end{aligned}$$

2.1.4 CÁLCULO DE LA PÉRDIDA DE PRESIÓN

Para rejas cerradas de madera del tipo utilizado, se empleó una expresión recomendada por Smith y Williamson que transformada en PASCAL queda escrita como las expresiones:

$$\begin{aligned}\text{GRA} &= G1 \cdot (3600^2) \\ \text{DP} &= (100 \cdot (9.85 \cdot Z^5) \cdot \text{CargA}^2)\end{aligned}$$

donde:

GRA: es la fuerza de gravedad convertida a m/s^2

DP: es la caída de presión en cm de agua

2.1.5 Lista de variables y constantes empleadas en el programa, su significado y las unidades en que se encuentran dadas.

VARIABLES	DESCRIPCIÓN Y UNIDADES
AI	Caudal del agua en m^3/min
Amax	Caudal máximo de agua a través de la torre, Kg/hm^2
Amin	Caudal mínimo del agua en Kg/h^2
area	Área de la sección transversal en m^2
area2	Área de la sección transversal corregida en m^2
ASR	Área superficial del relleno por unidad de vol. del lecho m^2/m^3
CA	Calor específico del aire, en $Kcal/Kg^{\circ}C$
CargA	Carga del aire en la sección corregida, en $Kg/h m^2$
CarLi	Carga del líquido en la sección corregida en $Kg/h m^2$
CKHA	Coefficiente volumétrico
Clatva	Calor latente de vaporización del agua
Cmax	Caudal máximo de humectación en $m^3/h m$ igual a 0.265
CMH	Caudal mínimo de humectación $m^3/h m$ igual a 0.08
CVA	Calor específico del agua
DEL[n]	Medias entre las entalpías y el aire seco
DEN[n]	Diferencias de entalpías del aire saturado y aire seco
DT	Caída de temperatura
DP	Caída de presión en cm de agua
ED[n]	Medias aritméticas de los valores de DEN
ENTab	Entalpía del aire seco en la base de la torre
ENT[n]	Entalpías del aire seco
ENTsa[n]	Entalpías del aire saturado
G	Gasto del aire a través de la torre
GRA	Fuerza de gravedad convertida a m/s^2
HG	Coefficiente volumétrico de Transferencia de masa
Incrom	Incremento
Integral	Resultado de la Integral
lado	Lado de la sección en m, suponiendo a ésta cuadrada
lado2	Lado de dicha área
O y Q	Constantes de Clausius-Clapeyron
PRE[n]	Presiones vapor a esas temperaturas
PREva	Presión vapor de agua en mmHg
RAZ	Número de veces la razón mínima aire-agua
RAZO	Razón mínima multiplicada por el número de veces raz
roa	Densidad del agua en Kg/m^3
SUM[n]	Áreas de los rectángulos
TEMPab	Temperatura del aire en la base de la torre
TempR	Temperatura de referencia en $^{\circ}C$
TempT[n]	Temperaturas de la torre
TWbas	Temperatura de bulbo húmedo en la base. $^{\circ}C$
TWcab	Temp del bulbo húmedo del aire en el domo de la torre
VelAire1	Velocidad supuesta del aire en Kg/s
VelAire2	Velocidad corregida del aire en m/s
VOLsa	Volumen saturado a las condiciones del aire en m^3/Kg
Wsaba	Humedad a saturación en la base de la torre
Wsa[n]	Humedades a saturación
Z	Altura Total del relleno

2.2 PERDIDAS EN OPERACIÓN

El agua se enfría principalmente por el fenómeno de evaporación de una cierta cantidad de la misma, que depende básicamente del gradiente de entalpías entre el agua y el aire.

Dicha evaporación de agua representa una pérdida efectiva del agua que se recircula y deberá suplirse, pues de lo contrario se logrará un incremento en la concentración de las sales disueltas en ésta a valores demasiado altos, la cantidad de agua que se evapora puede calcularse en la expresión:

$$W_v = G(1/(1+H_b))(H_s-H_b) \quad (2.2.1)$$

En donde:

W_v : agua perdida por evaporación, m³/día

G : caudal de aire en Kg/s

H_b : Humedad en la base de la torre en Kg agua/Kg aire seco

H_s : humedad en la cabeza de la torre en Kg agua/Kg aire seco

Normalmente para fines estimativos, puede considerarse que se pierde aproximadamente de 0.85 a 1.25% del total de agua recirculada por cada 12°C de intervalo de enfriamiento en la torre.

Otro tipo de pérdidas, que puede minimizarse mediante un diseño adecuado de la torre, lo constituyen los arrastres de tipo mecánico de una cierta cantidad de agua debido al flujo del aire en la torre. En torres bien diseñadas, estas pérdidas se estiman aproximadamente de 0.1 a 0.3% del total de agua recirculada, en el caso de torres de tipo de tiro inducido.

Por otra parte, debido a las pérdidas por evaporación de agua en la torre, la concentración de sólidos disueltos tienden a incrementarse y es por tanto conveniente mantener una extracción en forma continua o intermitente de cierta cantidad de agua recirculada, como purga del sistema. La magnitud de dicha purga depende del contenido normal de sales. Un valor recomendado por algunos autores es de 0.3% del agua recirculada por cada 12°C de intervalo de enfriamiento en la torre. En todo caso, el agua circulante no deberá contener una cantidad de sólidos tales mayor de 5.000 ppm y 10 ppm de aceites o gomas.

Como consecuencia de las anteriores extracciones y pérdidas de agua en la torre de enfriamiento, se requiere mantener un reposición constante de agua de proceso tratada. Un valor usual de lo anterior se estima en un 5% de la recirculación total.

Las pérdidas se programaron como;

$$A_{per} = G(1/(1+Wsab))(W_{sas}-W_{sab})*87$$

donde:

A_{per} : agua perdida por evaporación, l/min

G : caudal del aire Kg/s

W_{sab} : humedad en la base de la torre en Kg agua/Kg aire seco

W_{sas} : humedad de la cabeza de la torre en Kg agua/Kg aire seco

2.2.1 Lista de variables y constantes empleadas en el programa, su significado y las unidades en que se encuentran dadas.

VARIABLES.	DESCRIPCIÓN Y UNIDADES
Aper.....	Agua perdida por evaporación, l/min
G	Caudal del aire en Kg/s
Wsab.....	Humedad en la base de la torre en Kg agua/Kg aire
seco	
Wsas	Humedad de la cabeza de la torre en Kg agua/Kg aire
seco	

2.3 TIPOS DE TORRES DE ENFRIAMIENTO

2.3.1 TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO FORZADO

Como ya se dijo anteriormente se usan dos tipos de torres de tiro mecánico : la de tiro forzado y la de tiro inducido. En la primera, hay un ventilador en su base que ayuda a sacar el aire del fondo por la parte superior a elevada velocidad. En la de tiro inducido el ventilador está sobre la cubierta de la estructura y el aire es aspirado hacia arriba y descargado a alta velocidad.

Exceptuando la localización de los ventiladores, las características estructurales y de funcionamiento de los dos tipos de tiro mecánico (forzado e inducido) son en esencia las mismas. Por esto el programa no calcula para una torre de tiro forzado, porque los resultados de diseño serían los mismos, por lo tanto se procede a calcular el tercero y último tipo de la torre.

2.3.2 TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO ATMOSFÉRICO

En la Fig. 2.4 se representa una sección transversal de una torre atmosférica de enfriamiento. En esta torre, el agua se bombea a su parte superior de donde se derrama por un sistema de distribución. Cuando el agua empieza a descender, es dividida y distribuida por las cubiertas que contienen el relleno de la torre.

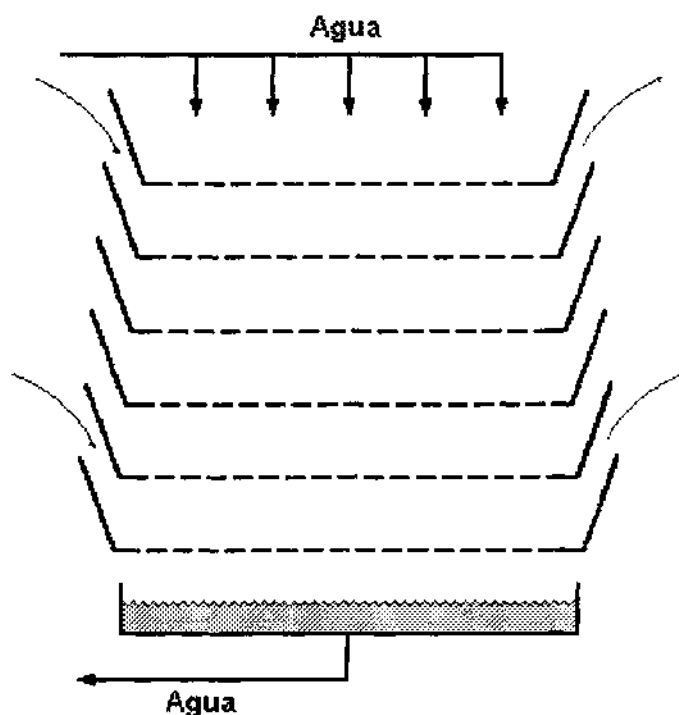


Fig. 2.4 Sección transversal de una Torre Atmosférica de Enfriamiento.

Continuamente nuevas superficies de enfriamiento al aire que encuentra se descubren (pasa horizontalmente por la torre). La distribución asegura una concentración

uniforme del agua por la torre durante toda su caída. Aunque el costo total de una torre Atmosférica de enfriamiento (diseñada aproximadamente para una velocidad del viento de 4.83 Km/h) es casi el mismo costo que para una de tiro mecánico, ciertas limitaciones importantes rigen sus resultados de funcionamiento. Debe tener expuesta cierta área orientando su costado ancho hacia el viento. Las estructuras, colinas u otros obstáculos a su alrededor la bloquearán y separarán el viento.

La principal objeción hacia las torres atmosféricas es la excesiva pérdida del agua rociada durante los períodos de vientos fuertes. Esta pérdida era causada por la falta de un procedimiento para separar del aire el agua arrastrada en la torre, como sucede en el caso del tipo de torre con persianas de ventilación. En consecuencia, la mayoría de los fabricantes resuelven este problema incorporando a las persianas eliminadores mecánicos del agua arrastrada. En las Figuras que aparecen en los diagramas se indica el procedimiento para determinar el tamaño y los resultados de una torre atmosférica. El objeto de estas gráficas es mostrar el método para calcular el tamaño aproximado de una torre atmosférica de enfriamiento para que cumpla con una ciertas condiciones. La capacidad de enfriamiento de una torre, a una temperatura de bulbo húmedo y a una velocidad de viento dadas, varía con la concentración del agua, así, el problema de calcular el tamaño de una torre se convierte en obtener la concentración correcta del agua para una altura elegida, que funcione bajo determinadas velocidades del viento y temperatura de bulbo húmedo. Una vez obtenido este factor de la concentración, se calcula el área de la sección de la torre de altura dada, dividiendo los litros por minuto circulados entre el factor de concentración. La concentración para el enfriamiento deseado depende de las siguientes condiciones:

1. Intervalo de Temperatura ($T_1 - T_2$)
2. Cercanía a la temperatura de la bulbo húmedo ($T_2 - T_w$)
3. Altura de la torre
4. Velocidad de viento.
5. Temperatura del bulbo húmedo (T_w)

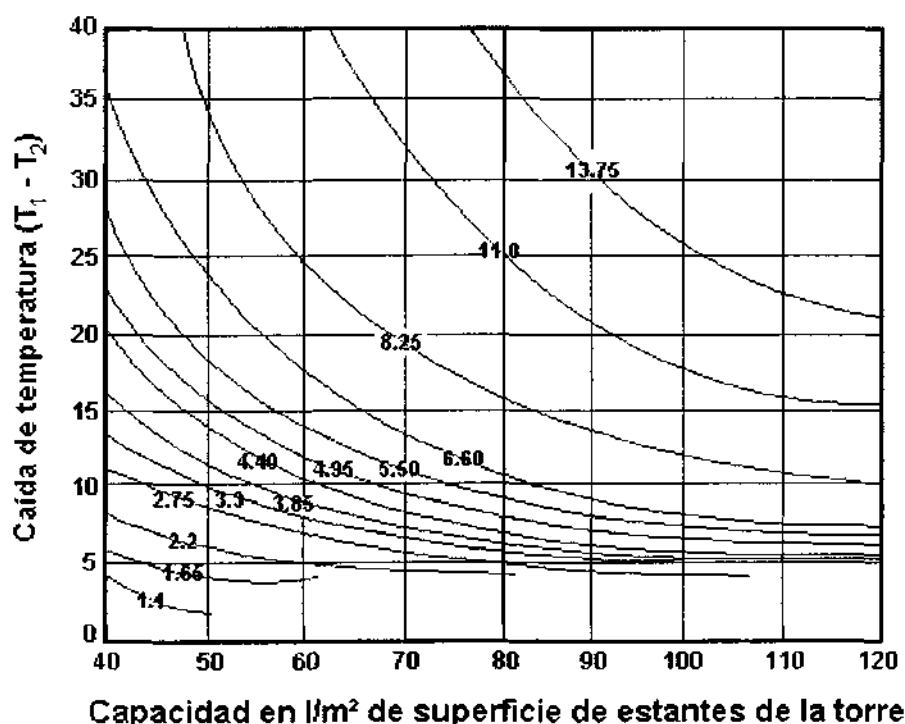


Fig. 2.5

Como se puede observar debido al infinito número de combinaciones de estos valores, es casi si no es que imposible, hallar una curva universal para calcular el factor correcto de concentración.

La Fig. 2.5 da la concentración necesaria del agua de enfriamiento a través de un cierto intervalo y con una determinada cercanía a la temperatura de bulbo húmedo; en el ejemplo para esta gráfica se supone una temperatura de 21°C, una torre de 10.7 m. y una velocidad del viento de 4.83 Km/hr. Si se cambiase cualquiera de estos tres valores, habría de corregirse la concentración para las nuevas condiciones, utilizando uno o varios de los factores de corrección que se indican en las Figs. 2.6, 2.7, 2.8.

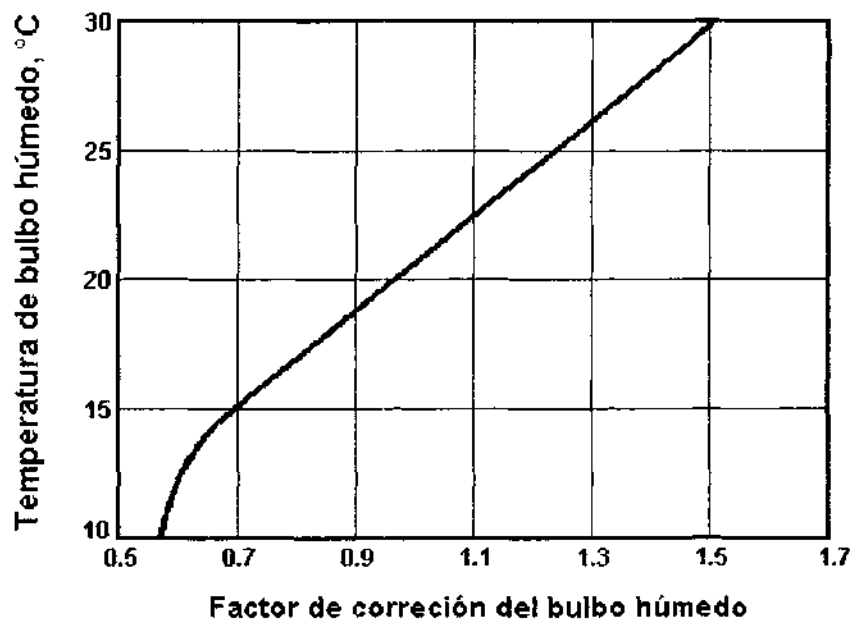


Fig. 2.6

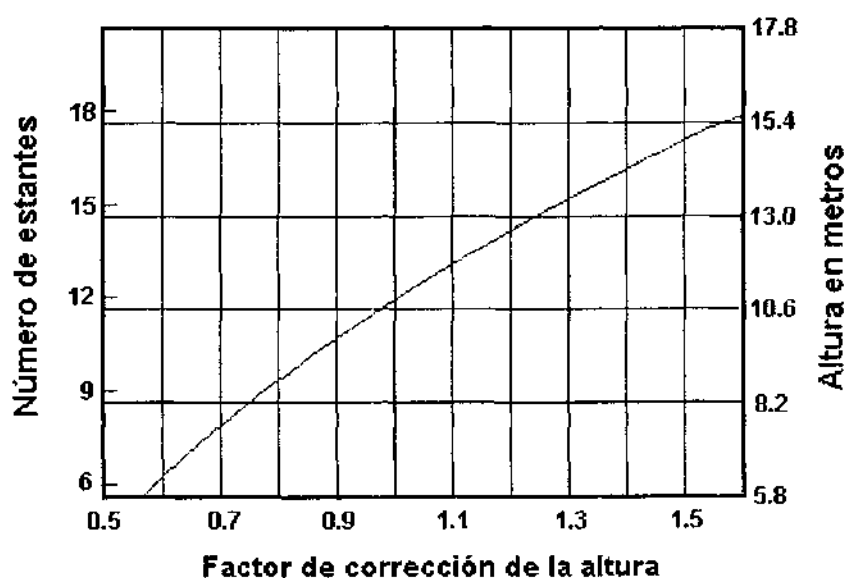


Fig. 2.7

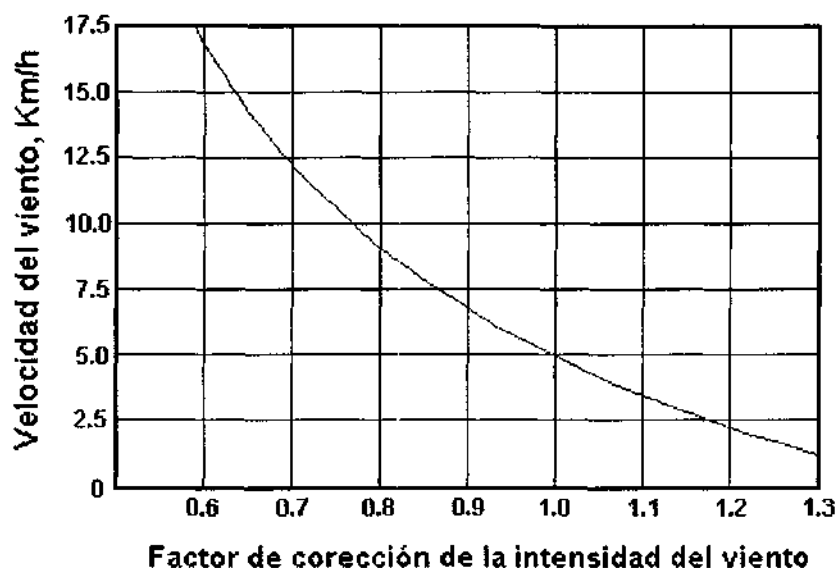


Fig. 2.8

La concentración del agua afectará la variación de una de las tres condiciones mencionadas a continuación:

1. VELOCIDAD DEL VIENTO: entre más alta sea la velocidad del viento, mayor será la cantidad de aire que atraviesa la torre. Esto conduce a un mayor enfriamiento. Sin embargo, cuando aumenta la velocidad del viento, puede aumentarse la concentración y obtenerse todavía igual enfriamiento.

2. ALTURA DE LA TORRE: en general resulta, tanto en las torres atmosféricas como en las de tiro mecánico, que cuando mayor es el intervalo de enfriamiento y más pequeña la cercanía a la temperatura de bulbo húmedo, más alta es la torre necesaria para que haya tiempo de contacto suficiente entre el agua y el aire, para alcanzar el enfriamiento deseado. En las torres atmosféricas, el resultado está limitado por las concentraciones máximas y mínimas del agua.

Si la concentración cayera por debajo del 41 L/(min)(m² de área de la torre), habría que emplear una torre de mayor altura. Esto se debe a que, para concentraciones extremadamente ligeras, el agua no se distribuirá uniformemente y los resultados predichos por las curvas adjuntas no se alcanzarán. Si la concentración excediera 122 L/(min)(m² de área de la torre), habría que elegir entonces la próxima torre de tamaño o altura inferior. Las concentraciones altas del agua entorpecen la circulación por la torre y no permiten el paso del aire suficiente para alcanzar el enfriamiento indicado en las curvas.

3. TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO: teóricamente, una torre no puede enfriar el agua a temperatura inferior a la de bulbo húmedo que prevalezca. Debido a esta limitación, se convierte en un factor importante la economía de la temperatura del agua fría a la temperatura de la bulbo húmedo. El aire tiene mayor capacidad para absorber calor a temperaturas más altas de las del bulbo húmedo. A temperatura más baja de bulbo húmedo, el aire al pasar por la torre tiene una mayor elevación de temperatura para realizar el mismo enfriamiento. Por lo tanto, para obtener la misma cercanía a la temperatura de bulbo húmedo, es necesario reducir la concentración.

Por ejemplo: para calcular el tamaño de una torre atmosférica con un ancho efectivo de 3.66 m, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{altura} = \frac{L (W)}{(3.66) (fcW) (fcz) (c)}$$

donde:

- altura** : Longitud de la torre en m
- fcviento** : Factor de corrección por el viento
- c** : Concentración del agua, litros/m² del área de la sección de la torre
- fcW** : Factor de corrección por temperatura de bulbo húmedo
- fcz** : Factor de corrección por altura de torre
- T1** : Temperatura de entrada °C
- T2** : Temperatura de salida °C
- TW** : Temperatura de bulbo húmedo °C
- (T2-TW)** : Cercanía a la temperatura de bulbo húmedo °C
- L** : Caudal de agua en l/min

2.3.3 Lista de variables y constantes empleadas en el programa, su significado y las unidades en que se encuentran dadas.

VARIABLES.. DESCRIPCIÓN Y UNIDADES

altura	Longitud de la torre en m
fcviento	Factor de corrección por el viento
c	Concentración del agua, l/m ² del área de la sección
fcW	Factor de corrección por temperatura de bulbo húmedo
fcz	Factor de corrección por altura de torre
T1	Temperatura de entrada °C
T2	Temperatura de salida °C
TW	Temperatura de bulbo húmedo °C
(T2-TW)	Cercanía a la temperatura de bulbo húmedo °C

Referencias Bibliográficas

- 2.1 Métodos de cálculos en los procesos de transferencia de materia.**
H. Sawistowski y W. Smith
Editorial Alhambra 1964
- 2.2 Introducción a la Ingeniería Química**
W.L. Badger y J.T. Banchero
Editorial Mc Graw Hill 1964
- 2.3 Stoichiometry for chemical engineers**
Edwin Williams/Curtis Johnson
Mc Graw Hill
- 2.4 Métodos Numéricos Aplicados a la Computación Digital con FORTRAN**
Merlin L. James/Gerald H. Smith/James C. Wolford
Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A. 1973
- 2.5 Problemas de Ingeniería Química**
J. Ocon G. y G. Tojo B.
Editorial Aguilar 1971
- 2.6 Operaciones de transferencia de masa**
Robert E. Treybal
Editorial Mc Graw Hill 1988
- 2.7 Transferencia de Momento calor y masa**
James R. Welty, Charles E. Wicks/Robert E. Wilson
Editorial LIMUSA 1989
- 2.8 Visual Basic**
Francisco J. Ceballos Sierra
Addison-Wesley Iberoamericana
- 2.9 Fortran 77**
M.Z. Smith (IBM Corporation)
Houghton Mifflin Company Boston 1985

CAPÍTULO 3

AUMENTO DE LA EFECTIVIDAD DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO EXISTENTE

EN UNA TORRE EL OBJETIVO ES MAXIMIZAR EL EMPLEO DEL AGUA, SE PRUEBAN ALGUNAS ALTERNATIVAS PARA PREVENIR LA INCRUSTACIÓN Y EL SUMINISTRO DE AGUA FRESCA

3.1 PROCESOS FÍSICO-QUÍMICOS

A pesar del interés creciente en el uso del aire como un medio de enfriamiento [3.1.1], muchas investigaciones en los procesos industriales intentan encontrar maneras de preservar el agua. **Con la mira de incrementar el número de ciclos en las torres de enfriamiento, se intentan varias técnicas:** algunas actualizan el agua (p.ej., tratada con osmosis inversa, filtración); otras aumentan el volumen de agua de enfriamiento con desechos de agua industrial o tratan los afluentes del alcantarillado municipal.

Se tienen muchas tecnologías tales como las torres de enfriamiento, el tratamiento biológico y la clarificación para manejar los recursos del agua. Pero los problemas en años recientes han estimulado el crecimiento de las tecnologías, que casi no se están aplicando porque tienden a ser costosas. En este capítulo se explican ocho de tales tecnologías:

- Evaporación compresión-evaporación
- Calor desprendido en la evaporación
- Osmosis Inversa y ultrafiltración
- Electrodialisis
- Remoción de vapor
- Combinación mojado/secado en torres de enfriamiento
- Persianas
- Ablandamiento de la corriente lateral de una torre de enfriamiento

3.1.1 CICLO DEL AGUA

Las Industrias obtienen este suministro de **tres fuentes: pozos, depósitos, y arroyos o ríos**. Después de que el agua se usa, una porción vuelve a la tierra, alguna se evapora, y el equilibrio ecológico la devuelve a un arroyo o río, con o sin ser tratada.

Los suministros de agua de calidad son lo más difícil del asunto. Algunos mantos acuíferos formados en tiempos prehistóricos no se recargan pronto, y se consumen a tales niveles que se predice en futuro no muy distante, su agotamiento. Otros acuíferos declinan en calidad cuando suben los sólidos disueltos con recargo salino o agua salobre. Y la calidad del arroyo y del agua decaen todavía más cuando van de usuario en usuario hacia el mar. El manejo del agua en las plantas es de ciclo cerrado para el control de la contaminación, factores ambientales, diseño y funcionamiento.

La Tabla 3.1 Resume las tecnologías aquí mencionadas.

Técnica	Aplicaciones	Limitaciones	Costos Relativos	
			Capital	Operación
Vapor-Condensación Evaporación	Concentración del agua de desecho o del arrastre de la torre de enfriamiento Producción de agua de alta pureza	No para orgánicos que formen azeótropos o vapor destilado La obstrucción debe ser controlable	Alto	Alto
Calor perdido en Evaporación	Concentración del agua de desecho Recobrado del condensado	No para orgánicos que formen azeótropos o vapor destilado	Medio	Medio
Osmosis Inversa y Ultrafiltración	Remoción de sales ionizables más orgánicos Recobre metales pesados materia coloidal Producción de agua ultrapura	Obstrucción sensitiva El vapor no debe degradar las membranas El calor rechazado debe ser en gran volumen	Medio	Medio
Electrodialisis	Agua potable de afluentes salinos	Limitado a sales ionizables	Medio-Alto	Medio
Remoción de Vapor	Recobrado de procesos de condensado y otros contaminantes del agua Remoción de H_2S , NH_3 más algunos orgánicos ligeros	Condensados removidos pueden necesitar más proceso	Medio	Medio-Alto
Comb. húmedo/seco en Torres de E.	Pone parte de la carga de la torre sobre las persianas	Costos comparables con Torres de E. húmedas	Medio	Medio
Persianas	Aplicación en numerosos procesos	Para altos niveles de transferencia de calor Se puede usar para un mezclado libre	Medio	Medio
Corriente Lateral de Ablandamiento	Reducción en el arrastre de la torre de enfriamiento	Los sólidos disueltos deben ser removidos Control dificultoso	Medio-Bajo	Medio-Bajo

3.1.2 EVAPORACIÓN DEL VAPOR CONDENSADO

Cuando un vapor es mecánicamente comprimido, su temperatura de saturación sube, y así su calor latente es utilizable a un nivel de temperatura más alto. Aplicando este calor a una corriente de agua, evapora algo de agua, dejando a la corriente concentrada y produciendo un destilado de alta pureza. En un ciclo de agua esto reduce el afluente y produce alta calidad en el agua que se puede usar en otra parte de la planta.

La condensación del vapor disfruta de amplias **aplicaciones**: la recuperación del calor de una torre de destilación, la desalación del agua de mar, las corrientes procesadas y la concentración del arrastre [3.1.2,3.1.3].

En el Proceso de diseño se optimiza la cantidad de vapor comprimido y las condiciones de evaporación. Incrementando la proporción de la condensación, aumenta la temperatura de saturación en la descarga, la cual elimina los requerimientos de vapor para el área de contacto porque el manejo forzado de la temperatura es más alto. Sin embargo, un aumento en la proporción de condensación, aumenta los costos del compresor y del motor porque se requiere mayor energía.

Se usa vapor comprimido en la destilación para conservar la energía. La Fig. 3.2a muestra una columna de destilación convencional, con vapor condensado (también llamada bomba de calor fraccionado) aplicado en la cabeza de la torre para rehornir.

Una alternativa para un mejor enfriado se muestra en la Fig. 3.2b sería una destilación flash, en la que el vapor se une arriba del compresor.

Otra alternativa es usar un refrigerante externo, que se expanda para condensar el vapor en el domo, comprimiéndolo, y condensándolo para rehornirlo en la torre.

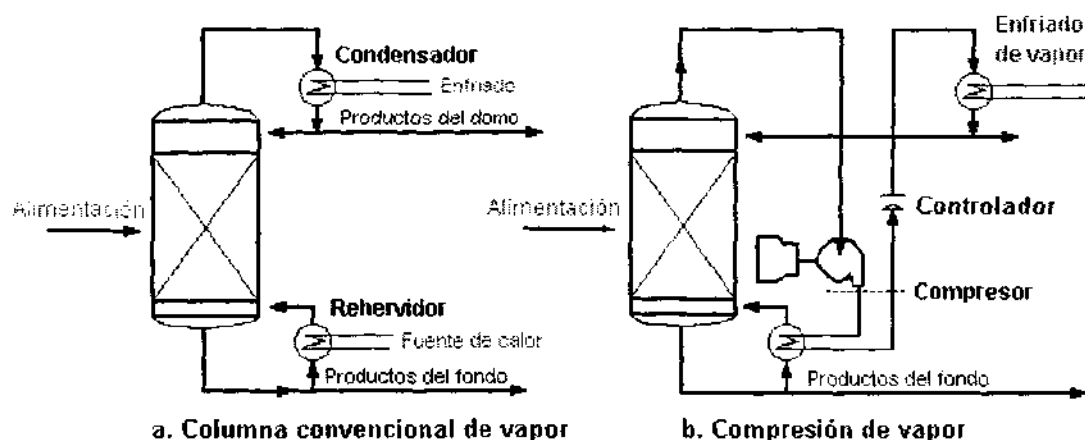


Fig. 3.2 Compresión de vapor para la obtención de calor en la columna de destilación.

En el proceso de concentración o reducción del afluente, se aplica el vapor condensado como se muestra en la Fig. 3.3.

La corriente usualmente es pretratada, y precalentada por intercambio de calor con la destilación del condensador. Se usa Deaeración también si los gases disueltos están presentes a niveles altos. La Fig. 3.3 muestra un rehornidor usado como un evaporador/condensador; otra de las muchas alternativas es una coraza vertical y un tubo intercambiador de calor operado similarmente a un evaporador de película descendente.

El calor de evaporación es suministrado por la condensación del vapor comprimido. Para asegurar un destilado de alta calidad, los líquidos que entran deben por supuesto ser removidos del vapor cuando salen de las zonas de concentración.

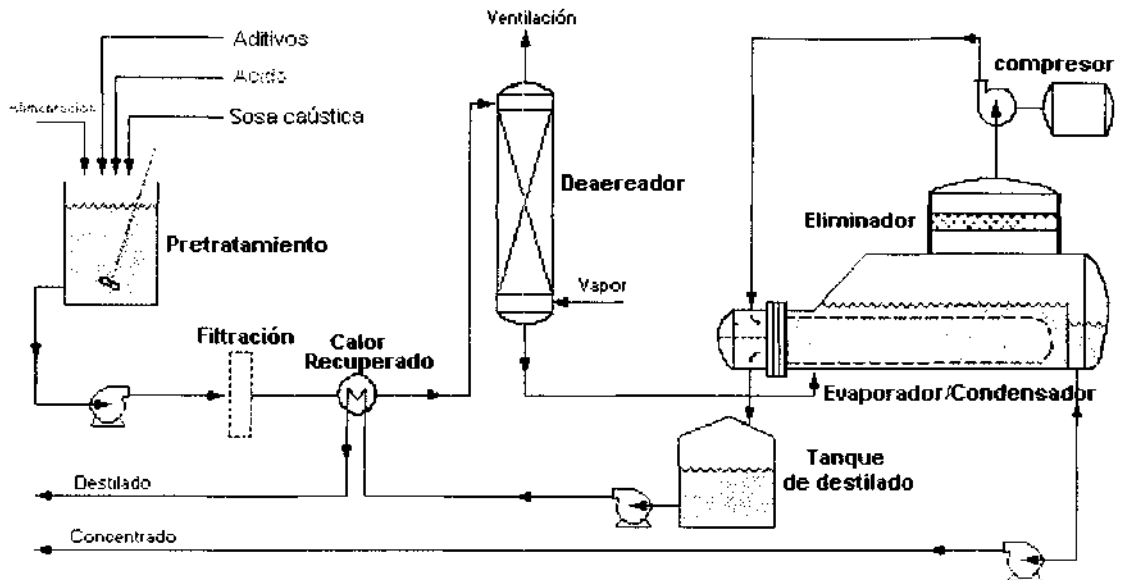


Fig. 3.3 Compresión de vapor aplicado a la evaporación del agua.

3.1.2.1 COSTOS DE CONDENSACIÓN

El principal costo de operación es el costo de la energía para el condensador. En aplicaciones del agua concentrada tales como la desalación o la evaporación arrastre, se pueden usar condensadores de lóbulo rotatorio para proporciones arriba de 25,000 ft³/min (condiciones de entrada), que son equivalentes a 110 gal/min de agua evaporada a 1 atm de presión [3.1.4]. Para aplicaciones de esta magnitud o mayores, se usan condensadores centrífugos de fase simple, con proporciones de condensación de 1.7 como máximo.

3.1.3 CALOR DESPRENDIDO EN LA EVAPORACION

El calor desprendido es descargado a una torre de enfriamiento, este calor se puede aplicar a la conservación del agua disminuyendo así la contaminación coexistente. Si la fuente de calor es grande o enteramente vapor de agua, se puede recuperar un condensado útil. Si la fuente de calor proviene de un proceso con un intercambiador de calor se puede usar como agua de enfriamiento, la carga de enfriamiento puede ser transferida a un sistema de evaporación de agua sucia, simultáneamente conservando el agua fría y reduciendo el afluente del agua sucia.

Los Sistemas que utilizan el calor desechado de la evaporación requieren menos inversión y energía que algunas de las otras tecnologías aquí mencionadas, son menos complicadas y relativamente de un mantenimiento barato. Se limitan en que requieren una fuente de calor desechado o una corriente de agua sucia que se pueda evaporar sin incrementar la succión del agua.[3.1.5]

3.1.3.1 CONCENTRACIÓN DEL NITRATO DE AMONIO PERDIDO

En un estudio se aplicó el calor desechado en la evaporación a un fertilizante de plantas nitrogenado para controlar la contaminación y la conservación del agua. El objetivo primario era concentrar una cantidad grande de agua de desecho; reduciendo los requerimientos de agua cruda (con costos del tratamiento de aguas) que era un objetivo secundario.

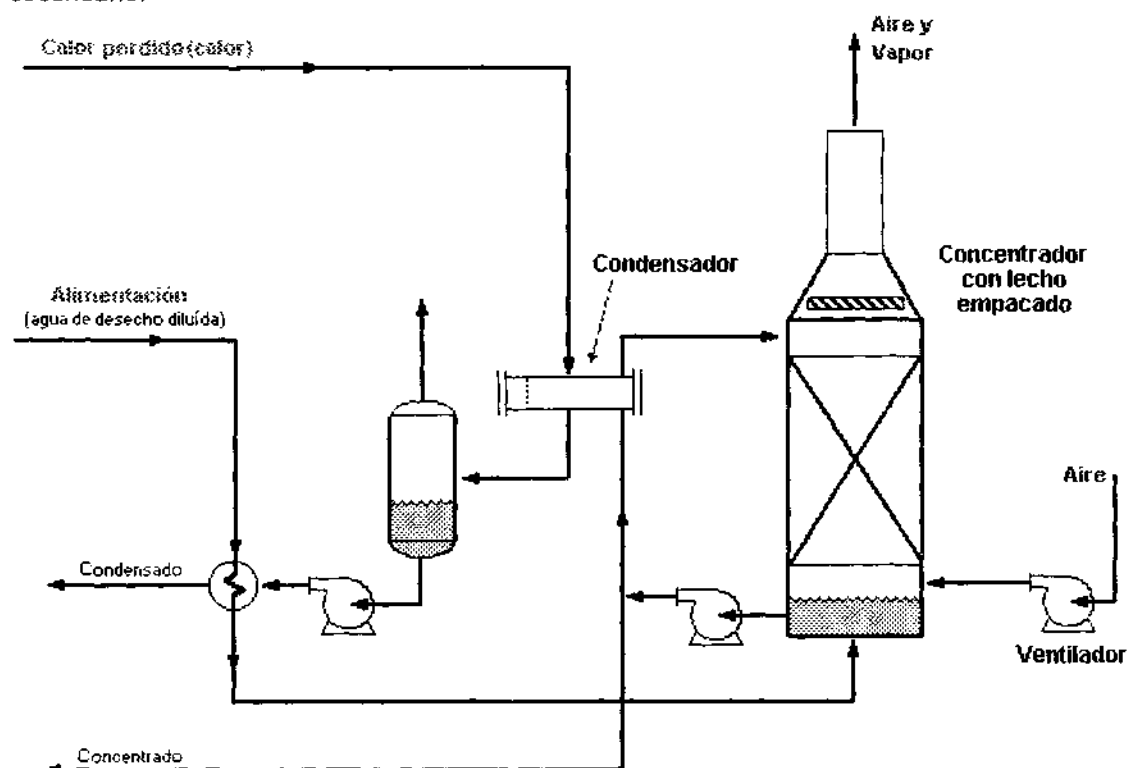


Fig. 3.4 El calor perdido en el evaporador se recupera en el condensador.

Esta aplicación ilustra el calor desechado en la evaporación en el diagrama total de la planta de agua. Se usará este estudio como un ejemplo, en el diseño mostrado a continuación y los aspectos del costo para esta tecnología.

La Fig. 3.4 es un diagrama de flujo de la instalación de un concentrador de calor desechado. La fuente de calor está a la presión atmosférica del vapor, con 5 mol% de CO_2 en una planta de nitrato neutralizado. El concentrador produce un 40% de solución de nitrato de amonio con 1-5% de nitrato de amonio alimentado, y también produce un condensado útil. La Tabla 3.2 describe el funcionamiento y diseño de este concentrador en detalle, también muestra otros datos, tales como los que produce una solución de 10% de nitrato de amonio de la misma alimentación. En este caso la fuente de calor es el vapor y el CO_2 de un removedor de CO_2 (22.1 psia, 25.2 mol% CO_2 , 218°F).

Datos de diseño de un concentrador		
Torre y condensador		
Tabla 3.2		
Diseño de la Torre	Concentrador #1	Concentrador #2
% de Nitrato de amonio concentrado	40	10
Torre día, ft	12	20
Empaque, ft	18	12
Tipo de empaque, Pall rings	3½ in	3½ in
Deflectores, 4 in (std)	10 ft/día	17 ft/día
Torre de calor libre, 10E6 Btu/h	43.4	124
Proporción de líquido, lb/h	830,000	2,274,000
Proporción de aire, ft³/min	28,800	67,850
Razón L/G	6.85	7.3
Temperatura líquido dentro, °F	190	190
Temperatura líquido fuera, °F	125	132
Temperatura Aire, °F	60	60
Temperatura de salida del vapor, °F	170	168
Agua evaporada, gal/min	78	232
Proceso de condensado, gal/min	86	250
% de eficiencia	90.7	92.8
Diseño del Condensador	Concentrador #1	Concentrador #2
Calor liberado, 10E6 Btu/h	43.4	143.2*
Area, ft²	4,900	23,470*
Tipo, para TEMA estándar	CHN	CHHN
U, Btu/hft² °F	225	147.4
Log del incremento de Temperatura	39.4	41.4
Pazos por la coraza (paralelo)	2	4
Caída de presión en la coraza, psi	0.5	0.62
Pasos de los Tubos	4	3
Inc. de presión en los tubos, psig	13	15.7

El sistema de concentración de calor desechado tiene el objetivo de controlar la contaminación del nitrógeno en el afluente del agua, y también ofrece los beneficios siguientes:

- Una cantidad significativa de nitrato de amonio, y menos cantidad de urea, que se recupera, se concentra y se vende.
- La carga de calor en una planta con tres torres de enfriamiento se reduce en 12%, mejorando su ejecución.
- El condensado recuperado reemplaza 80 gal/min de agua desmineralizada, eliminando el intercambio de iones de la carga.
- Los requisitos de la planta de agua cruda se reducen en casi 600 gal/min.
- El arrastre de la torre de enfriamiento es reducido, eliminando los costos de remoción del cromo.
- El flujo de nitrato neutralizado por la planta se condensa, reduciendo la emisión de éste a la atmósfera.

Se consideró en el esquema que la concentración completa es el promedio de aguaceros por área (36 plg/año) menos el promedio de evaporación del "lago" (48 plg/año). El equilibrio completo del agua para el sistema determina la capacidad del condensador requerido, permitiéndole amplias variaciones en el tiempo.

Las características del agua desechada y los niveles de concentración son las consideraciones más importantes del diseño. A un 40% en peso de nitrato de amonio, la presión de vapor del agua es sólo 80% de la presión de vapor de agua pura a la misma temperatura. Ésta reduce la tendencia del agua a evaporarse, y se debe considerar cuando se optimiza el diseño.

La Fig. 3.5 muestra la entalpía manejada por el aire en contacto con un 40% de solución de nitrato de amonio.

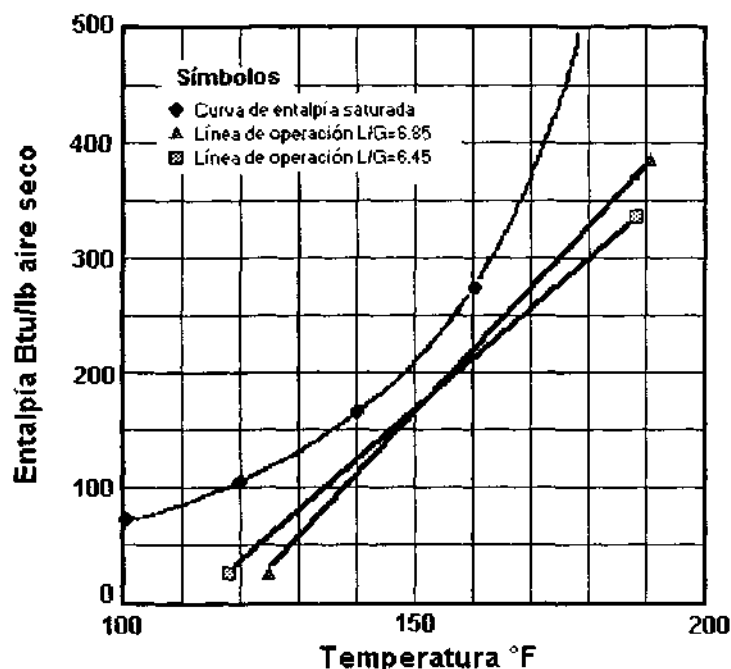


Fig. 3.5 Manejo de la entalpía para evaporación.

Las líneas de operación describen el diseño del concentrador, y muestran una operación a condiciones reales. Note que la pendiente de una línea de operación puede variar por las variaciones de la proporción gas/líquido (L/G). *El diseño de un concentrador como el de la Fig. 3.4 es básicamente el mismo diseño de una torre de torre de enfriamiento [3.1.6], porque ambos aparatos trabajan bajo el mismo principio: el aire es el mecanismo de contacto mientras que los líquidos evaporados se concentran y se enfrían.* De cualquier modo, el enfoque del concentrador es más resaltado en la evaporación que en el enfriado, y su diseño refleja una optimización basada: en fuentes de calores diferentes, en el uso de la energía, en las características del agua y en sus requisitos metalúrgicos. *Así, las condiciones de diseño del concentrador son probablemente para diferenciarlo de una torre de enfriamiento.*

3.1.3.2 DISEÑO DE PARÁMETROS

El objetivo primario de diseño para este ejemplo es llevar al máximo la evaporación de agua diluida que contenía nitrato de amonio. Los parámetros que se consideraron para optimizarlo fueron: la concentración, la calefacción y el rango de enfriamiento, así como la relación L/G de la torre. Analizando en mayor detalle:

Como la fuerza de concentración aumenta, la presión parcial del agua encima de la solución desciende, y exige una torre más grande para la capacidad de evaporación dada. Además, el calor específico de las soluciones cae y su densidad aumenta el capital y costos de operación para bombeo. A concentraciones altas la posibilidad de desalación del soluto también necesita considerarse.

Una temperatura más alta para el líquido reciclado a la torre habilita una razón de flujo de aire más baja, y así menos inversión para la torre y el ventilador. También aumenta la eficiencia del evaporador y reduce los costos de bombeo. De cualquier modo, una temperatura mayor del agua requiere una aproximación más estrecha a la temperatura de evaporación en el condensador, incrementando el tamaño del condensador y su costo.

Una gran proporción de líquido gasificado, en relación con un líquido de alta temperatura, elimina costos de la torre y del ventilador. Para una relación dada L/G, las fases de contacto adicionales permiten una temperatura más baja al líquido y aparece menos condensado, pero el capital y costos de operación para el ventilador aumentan debido al aumento de la caída de presión. También influyen en los planes finales de la torre: el material de construcción elegido, el que las soluciones de nitrato de amonio sean corrosivas, por tanto se requiere acero limpio 304 para todas las partes humectadas.

¿Cómo se hace una comparación del concentrador con una torre de enfriamiento?

La torre de enfriamiento induce un flujo cruzado que opera a una relación L/G aproximada de 0.5, tiene un rango de enfriamiento de 25°F. La capacidad de rechazo de calor equivalente a la proporción del agua circulante en tal torre de enfriamiento es pequeña, comparada con la del concentrador que es doble, y la proporción del aire es de quince tiempos como máximo- aunque a menor caída de presión. **El costo de la energía para la torre de enfriamiento es casi dos veces la del concentrador.** Por supuesto, la torre es diseñada para una temperatura de agua mucho más fría y una aproximación más estrecha a la temperatura de bulbo húmedo del aire.

3.1.4 OSMOSIS INVERSA

La **ósmosis inversa** (RO) es la presión invertida inducida del fenómeno de flujo osmótico natural. La ósmosis inversa recientemente ha ganado importancia comercial. Hoy, sus aplicaciones son numerosas, incluyendo: la purificación de aguas de desecho que contienen metales y sales; la producción de agua potable a partir de agua de mar; la purificación de químicos; la disminución de contaminación del agua. Los **parámetros importantes que gobiernan su aplicación son la presión osmótica, las características de la membrana, la tendencia a la obstrucción, más la temperatura de la solución y la concentración.**

La ósmosis es el pasaje espontáneo de líquido por una membrana semipermeable de una solución diluida a una solución más concentrada, vea la Fig. 3.6.

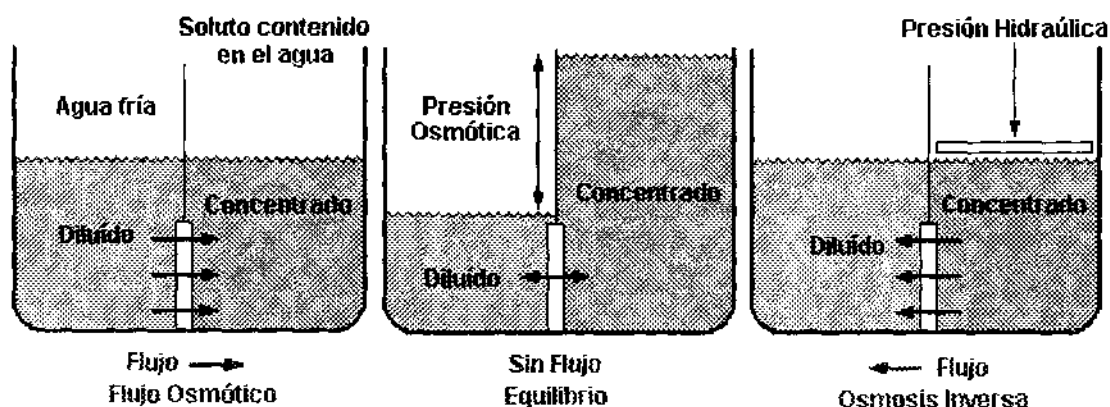


Fig. 3.6 Presión hidráulica / Presión Osmótica

La fuerza impulsora es la presión osmótica, que es una función del solvente, del soluto y de la concentración. Cuando se **compensa la presión osmótica**, como se ilustra en la Fig. 3.6, **los resultados son:** el equilibrio osmótico - el flujo neto a través de la membrana es cero - más la presión en los concentrados laterales resultantes en la osmosis inversa, donde el flujo va del lado concentrado al diluido.

La presión osmótica puede ser aproximada por la correlación de Vant-Hoff, similar a la ley de los gases ideales [3.1.7]:

$$\Pi = (n/v) RT$$

donde Π es presión osmótica (atm), n/v es la concentración iónica de la solución (mols/l), T es la temperatura ($^{\circ}\text{K}$), y R es la constante de los gases ideales (0.083 L-atm/mol- $^{\circ}\text{K}$).

La **ultrafiltración** se compara a la RO como una *tecnología de purificación de la membrana*, y no hay ninguna distinción afilada entre las dos. La aplicaciones de la ultrafiltración son gobernadas por el tamaño de las moléculas del soluto, de 2 a 10,000 nm (nanómetros) que es el rango usual. La **ósmosis inversa** no depende solamente tamaño del soluto, pero se aplica generalmente a tamaños entre 0.04 y 600 nm [3.1.8].

Una tendencia en el tratamiento del arrastre de la torre de enfriamiento es el uso de osmosis inversa en combinación con la destilación del vapor recondensado (se usa como un intermediario RO en la fase de desalación para reducir el tamaño del sistema de vapor recondensado que concentra la salmuera).

El proceso, llamado "sembrado de osmosis inversa," (Ver Fig. 3.7) es en el que se agregan semillas de cristales de sulfato de calcio al arrastre o al agua de la corriente lateral, luego se filtra por membranas RO que concentran la salmuera. Disuelve sólidos que precipitan adhiriéndose a las semillas de los cristales en lugar de en la superficie de la membrana, minimizando el problema de la incrustación. El pretratamiento se necesita para remover los sólidos. Después de la siembra inicial, se reciclan los sólidos a la caldera de alimentación.

Penetra por el sistema RO, se pone a través de un hidroclón, donde se recobran los sólidos (se reciclan algunos al tanque de alimentación), y el líquido se va al concentrador de la salmuera para más adelante recuperar el agua.

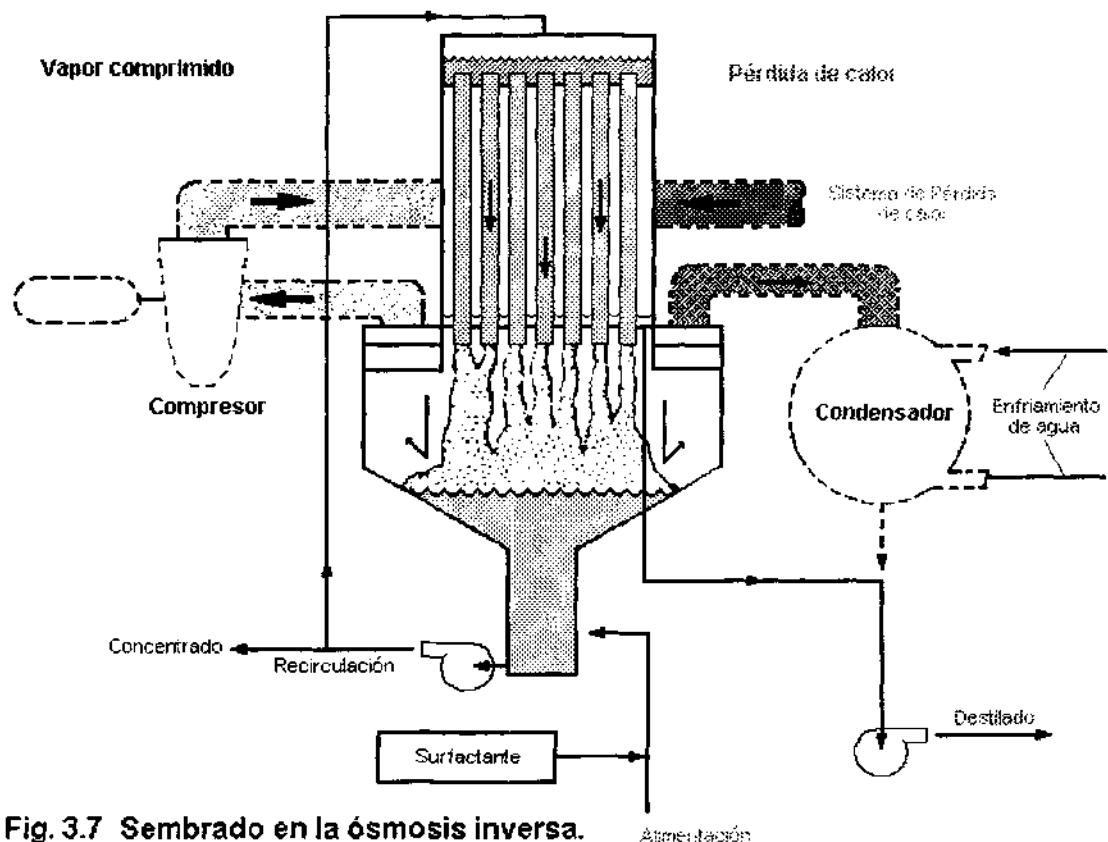


Fig. 3.7 Sembrado en la ósmosis inversa.

La recuperación del agua es aproximadamente 90% en el sistema RO, y 10% de agua en la pureza del vapor recondensado. El 10% de la pureza del agua se puede usar para el rehedidor, y normalmente requiere mucho más.[3.1.9]

El convencional RO es demasiado costoso para usarse en el arrastre de la torre de enfriamiento. Es más barato tratar el afluente y descargarlo en arroyos.

3.1.4.1 MEMBRANAS Y MODULOS

El desarrollo comercial de la RO se ha paragonado estrechamente con las mejoras en la tecnología de la membrana y el diseño del módulo. Los materiales de la membrana más comúnmente usados hoy en día son el nylon, el acetato celulosa, y las poliamidas aromáticas. Las configuraciones predominantes del módulo son elementos envueltos en espirales y finas fibras cóncavas [3.1.10].

El elemento envuelto en espiral (Fig. 3.8) fue desarrollado por la Div. de Sistemas de Fluido de UOP Inc. consta de un producto para permear el agua, un canal de colección formado entre dos membranas por un tejido.

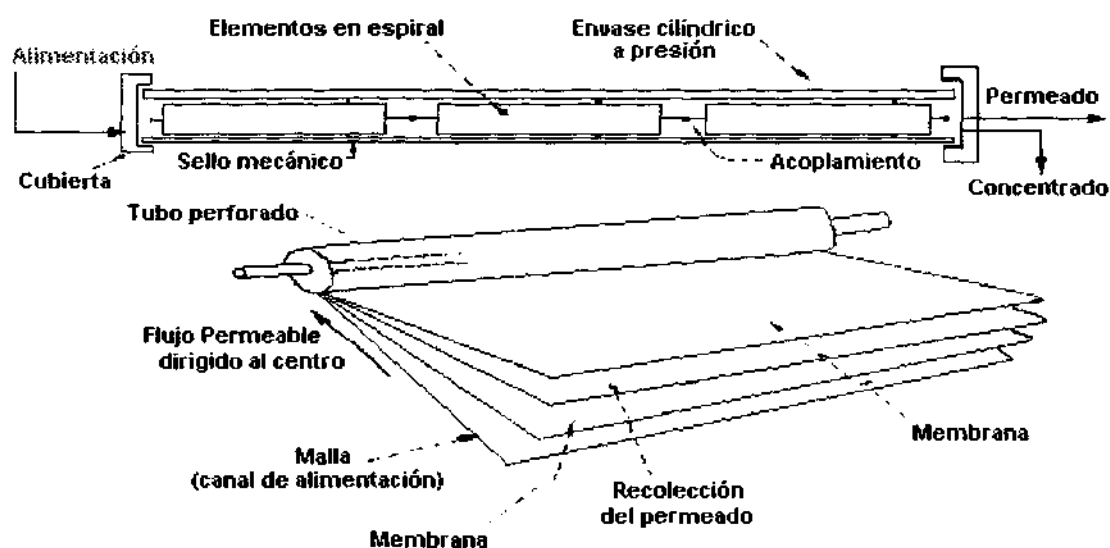


Fig. 3.8 Módulo de ósmosis inversa.

La membrana laminada se adhiere alrededor del tubo central, formando muchas capas. Este elemento, o serie de elementos acoplados, se instala en un contenedor a presión; tal módulo con tres elementos es ilustrado también en la Fig. 3.8. En el diseño se usan fibras cóncavas iguales a cabellos con un diámetro exterior de aproximadamente 85-100 μm . El agua alimentada entra al contenedor, y entonces fluye a lo largo de la superficie exterior de las fibras; algo de agua penetra en las paredes de la fibra. Éstos flujos penetran por las fibras huecas y se retiran al final del contenedor, mientras el concentrado (corriente de desecho) se retira por la coraza lateral del contenedor.

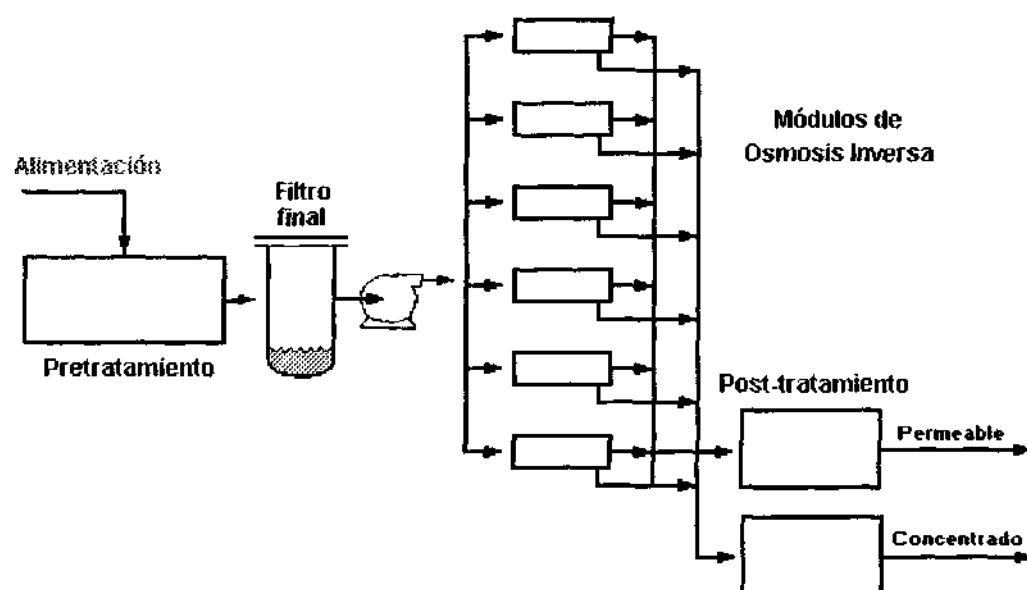


Fig. 3.9 Sistema típico de Osmosis Inversa.

La Fig. 3.9 ilustra un sistema típico de RO, que incluye cinco funcionamientos:

El **pretratamiento** refuerza la RO y protege la membrana. Los pasos seguidos para remover los obstruyentes de la membrana potencial incluyen: coagulación, precipitación, o ajuste del pH para prevenir la precipitación. También, los biocidas se aumentan para prevenir el crecimiento de microorganismos en módulo de RO.

La **filtración** remueve los sólidos suspendidos de las unidades RO. La partícula rechazada clasificada según el tamaño es colectada por un filtro de 10 μm o menos.

El **bombeado** opera a presiones de 400-600 psi para osmosis inversa, y aproximadamente a 100 psi para ultrafiltración. Las dos bombas frecuentemente usadas son centrífugas convencionales de multietapas, de fase simple de alta velocidad.

El diseño de la unidad para **osmosis inversa** y la configuración dependen de la composición de la alimentación, la pureza de penetración y recuperación de la membrana, el módulo diseñado y la capacidad. Si no se desarrolla la aplicación y se prueba, se requiere una prueba a escala o un trabajo piloto.

El **post-tratamiento** depende del uso de lo penetrado y lo concentrado. En la limpieza del agua sucia, se puede disponer del concentrado como está, pero requeriría un tratamiento más amplio. El volumen concentrado es usualmente 10-40% correspondiente al volumen penetrado de 60-90%. La corriente penetrada se usa como una fuente de agua directamente, o se sujeta a un tratamiento más amplio.

3.1.4.2 APLICACIONES

Las aplicaciones comerciales para la ósmosis inversa incluyen el tratamiento de aguas de desecho, la recuperación del agua por reuso, y la recuperación de elementos y compuestos de las corrientes del proceso. Algunas aplicaciones aparecen en la Tabla 3.3 [3.1.11].

Aplicaciones de la ósmosis inversa	
Tabla 3.3	
Industria Metalúrgica	
Recobre de oro, plata, platino, níquel, cromo, zinc, aluminio y cadmio de las pérdidas	
Reuso de agua enjuagadas	
Recobre de desperdicios de níquel, sulfamato de níquel, sulfato de cobre, pirofosfato de cobre, fluorinamato de níquel, cloruro de zinc	
Recobre de detergentes para el reuso en operaciones de lavado en metales fosfatados; concentración de aceite	
Remoción de sulfatos de los drenajes	
Industria Textil	
Recobre de alcoholes polivinílicos y aceites minerales	
Remoción de teñidos	
Papel y pulpa	
Remoción de color	
Concentración de sólidos de licores blancos	
Usos Varios	
Desalación	
Remoción de cromatos del arrastre de la torre de enfriamiento	
Concentración de desperdicios radioactivos	
Tratamiento del agua de alimentación de las calderas	
Recobre de pinturas en el agua para agua de drenaje con proceso de electrodeposición	
Remoción de aceites emulsificados	

Los contaminantes removidos del agua en una prueba de más de 50 elementos [3.1.11] y compuestos del agua son los siguientes:

- Ácidos: acético, crómico, tricloroacético.
- Alcoholes: metanol, etanol, isopropanol.
- Aldehídos: furaldehído.
- Aromáticos: clorobenceno, dinitrobenceno, hexaclorobenceno.
- Eteres: etílico, dietílico, bis (2-cloroisopropílico).
- Metales: cadmio, cromo, cobre, fierro, plomo, níquel, zinc.
- Pesticidas: aldrin, DDT (dicloro-difenil-tricloro-etano), DDE (dicloro-difenil-dicloroetileno), heptacloro, lindano, malation, diazinón.
- Otros orgánicos: anilina., glicerol, DMSO (dimetil-sulfóxido), acetato de metilo, acetona.

3.1.4.3 FACTORES DE DISEÑO

La ósmosis inversa maneja concentraciones de sólidos disueltos tanto de unos miligramos por litro como de 35,000 mg/l en el caso de desalar agua de mar. Si la obstrucción es un factor, entonces es necesario que se elimina por un vaciado rápido o limpieza. La temperatura del agua es importante porque afecta la relación de flujo (galones por ft^2) y la vida de la membrana. Para los flujos de la membrana generalmente se especifican una presión neta de 400 psig (presión real menos presión osmótica) y una temperatura de 77°F, y se recomienda una temperatura máxima de 110°F. El flujo real para la presión neta dada depende de la temperatura del agua: *el agua más caliente es menos viscosa, y así fluye por la membrana más rápido.*

La Fig. 3.10 muestra el por ciento de relación de la presión neta requerida para alcanzar la razón de flujo para temperaturas diferentes.

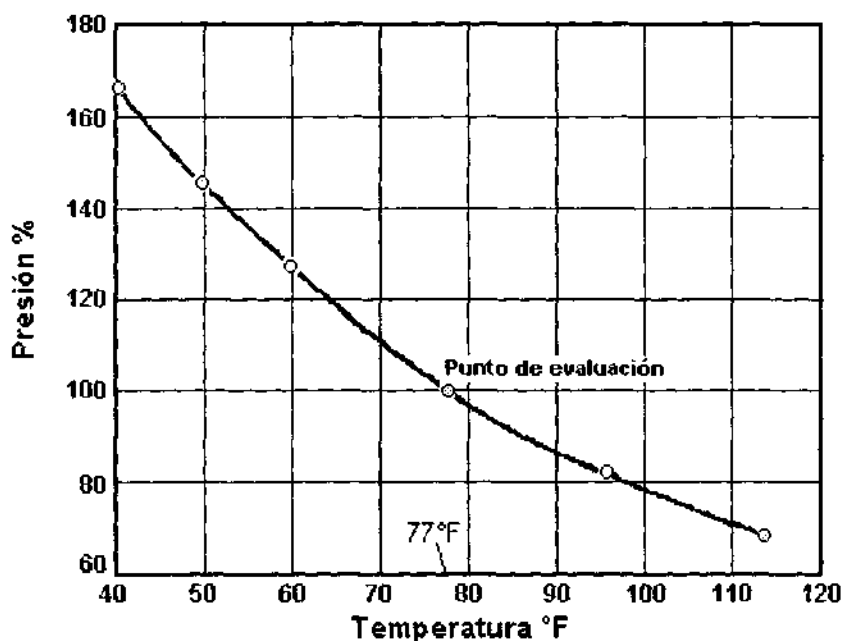


Fig. 3.10 Presión afectada por la temperatura del agua.

Los costos para los sistemas de RO varían extensamente, depende del pretratamiento, los requisitos de la pureza, la metalurgia, la capacidad y los factores específicos del sitio. El costo de energía mayor es el bombeado, que podría tener cierto alcance de 5 a 8 kWh por 1,000 gal alimentados, dependiendo del nivel de presión y eficiencia de la bomba. **El total de costos de operación incluiría también:** el proceso de pretratamiento y los químicos, las unidades de reemplazo de RO, el mantenimiento y la labor de operación. Los **parámetros de diseño y especificaciones necesarias incluyen:** porcentaje de rechazo, calidad de penetración y recuperación, frecuencia de reemplazo de la membrana, pasos del pretratamiento, e irregularidades en las propiedades. La prueba piloto determinará si una técnica es viable, el capital requerido y los costos de operación.

3.1.5 ELECTRODIÁLISIS

Al igual que la ósmosis inversa, la **electrodiálisis purifica o concentra un flujo a través de una membrana**. Pero la similitud acaba allí: ni la fuerza electromotiva, ni la presión hidráulica, manejan transferencia de masa. Las especies iónicas, no el solvente, penetran la membrana.

La electrodiálisis sólo separa las especies iónicas, mientras la RO y la ultrafiltración son aplicables tanto a especies iónicas como a las no iónicas. El tipo de ión que penetra la membrana depende del tipo de membrana: un catión permeable a una membrana deja que sólo cationes, especies de cargas positivas pasen a través de ella.

Además la electrodiálisis puede ser considerada para quitar el material iónico de mezclas que también contienen orgánicos, para procesar el gasto del licor encurtido, y para la recuperación de ácidos minerales tales como el ácido clorhídrico o el ácido sulfúrico.

3.1.5.1 COMO TRABAJA LA ELECTRODIÁLISIS

Una celda de electrodiálisis consta de numerosos cationes y membranas aniónicas, alternando como en la Fig. 3.11. Un cátodo se localiza al final de la celda, el ánodo al otro, y el voltaje d.s. se aplica a través de ellos.

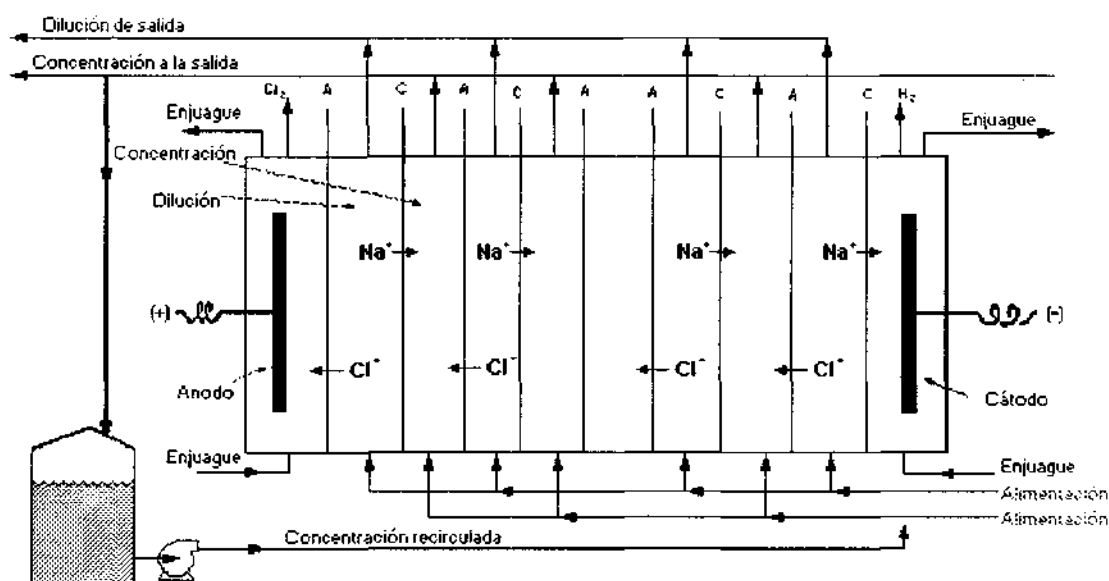


Fig. 3.11 Electrodiálisis

Como la Fig. 3.11 muestra, los aniones fluyen por una membrana aniónica permeable hacia el ánodo. Habiendo pasado a través de una membrana, se impide que emigren más allá de la próxima membrana, que es un catión permeable. De una manera similar, los flujos de cationes hacia el cátodo, penetran las membranas catiónicas pero no las aniónicas.

Dos flujos de corriente dentro la celda, y dos flujos fuera. Una corriente fuera, es la corriente diluida, de la cual los aniones y los cationes son removidos. En la Fig. 3.11, esta corriente contiene NaCl, y pierde iones de Na^+ y Cl^- a través de las membranas. El otro flujo de corriente pasa a través de los cauces entre las superficies de las membranas. En el caso del flujo del anión (Cl^- en la Fig. 3.11), se vacía la concentración en el lado diluido de la membrana aniónica, y aumenta la concentración de dicho lado.

Estos gradientes- también llamados **efectos de polarización** - trabajan contra el deseo de penetración, y se incrementan con la densidad más alta presente (o voltaje aplicado). Así, los **parámetros importantes de diseño** para un sistema de **electrodialisis** son: *los espacios entre las membranas, el voltaje aplicado, y el flujo condicionado entre las membranas*.

La incrustación puede formarse si los límites de solubilidad exceden a los de la superficie de la membrana. Para evitar la incrustación, los gradientes de concentración y las relaciones de flujo, se controlan. En algunos casos es necesario recircular las corrientes concentradas o diluirlas para conservar las velocidades suficientemente altas entre las membranas. En la Fig. 3.11. la corriente concentrada es recirculada.

3.1.5.2 TRATAMIENTO EN UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO

Una aplicación potencial para la conservación del agua y reducción del afluente es el quitar la sal de la corriente lateral de la torre de enfriamiento. *Esto reduciría o eliminaría el arrastre, el cual es importante porque las torres de enfriamiento son las que más requieren agua en el arrastre.* [3.1.12]

La Fig. 3.12 es un circuito hipotético de agua de enfriamiento, con la electrodiálisis usada para quitar la sal de la corriente lateral. Las condiciones de proceso y flujos son:

- Relación del rechazo del calor en la torre: 500 millones de Btu/h.
- Rango de enfriamiento del Agua: 25°F.
- Velocidad de circulación del agua : 40,000 gal/min.
- Composición de sal en el agua: 1,000 mg/l.
- Ciclo de circulación de la sal: 10,000 mg/l.
- Sal concentrada en electrodiálisis: 150,000 mg/l.
- Velocidad de evaporación: 1,000 gal/min.
- Reducción en los requisitos de composición del agua: aproximadamente 100 gal/min.

En este caso, la electrodiálisis reduce la composición en 100 gal/min, y el afluente para la misma cantidad.

La electrodiálisis parece tener un fuerte potencial para el manejo del agua y su conservación, sobre todo cuando se requiere quitar de sal. Aquí están algunas de las capacidades y limitaciones a considerar cuando se evalúa la electrodiálisis como una herramienta de manejo del agua:

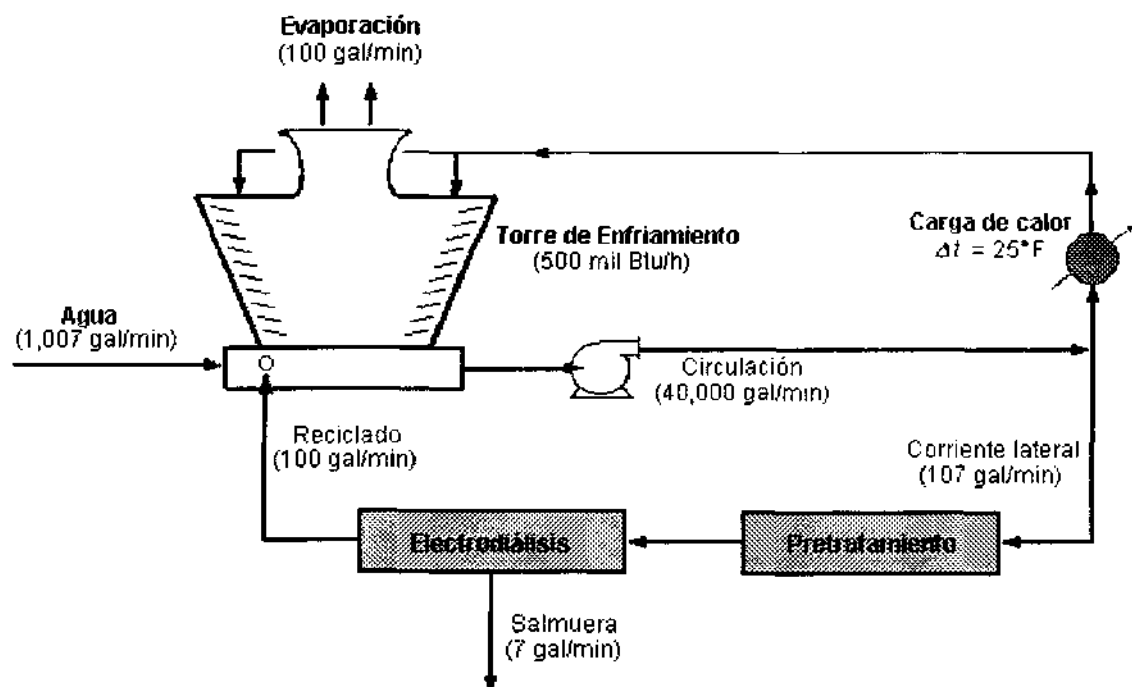


Fig. 3.12 La electrodiálisis concentra la salmuera en la corriente lateral.

Ventajas: la electrodiálisis puede obtener altas concentraciones de especies iónicas, si la solubilidad lo permite. El costo de la energía es bajo, similar al de la osmosis inversa. Se puede aplicar o para concentrar un soluto o para producir una agua de calidad (solvente).

Desventajas: Se limita la electrodiálisis a sales ionizables. Las condiciones deben ser compatibles con la química de la membrana, y se debe evitar la incrustación- así requiere pretratamiento frecuente. Las aplicaciones industriales no son extensas.

3.1.6 REMOCIÓN DE VAPOR

Con el vapor se remueven los contaminantes tales como el ácido sulfhídrico (H_2S) y el amonio (NH_3) para luego dirigir la descarga a un tratamiento más amplio a alta presión de las corrientes de agua, produciendo agua que podría reusarse en la planta. La técnica ha sido muy usada en agua ácida y en procesos de condensado.

3.1.6.1 CÓMO Y DONDE SE USA

El proceso de remoción en la corriente es bastante simple. La Fig. 3.13 muestra el equipo y cómo trabaja: se alimenta vapor al fondo de un condensador o torre empacada, la

alimentación de agua ácida va al domo, y se ponen en contacto en flujo a contracorriente. El calor transferido del vapor quita los contaminantes a alta presión en el agua, los cuales se van al domo con el vapor que queda. La cabeza es tratada para quitar los componentes que no pueden salir; los fondos descargados se tratan o se reusan.

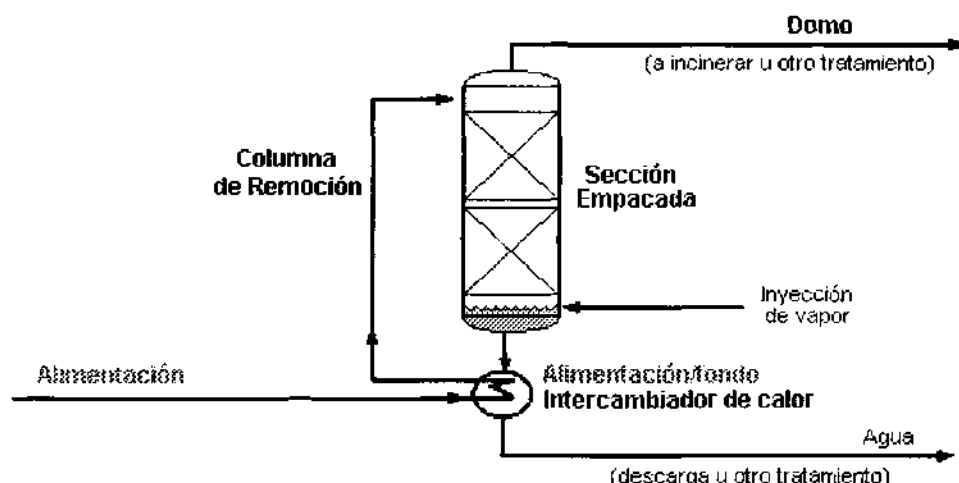


Fig. 3.13 Diseño de un removedor con inyección de vapor.

3.1.6.2 DISEÑO DE UN SISTEMA DE REMOCIÓN DE AMONIO

La determinación del diseño de proceso abarca un número de fases, requeridas para alcanzar la separación deseada, usando los cálculos de la fase y del equilibrio vapor-líquido.

El grado de disociación de los contaminantes iónicos tales como el NH_3 o el H_2S afectan la facilidad con que se pueden desprender.

La Fig. 3.14 ilustra los efectos del pH, con la temperatura como un parámetro.

Cuando el agua ácida contiene H_2S y se acidifica con NH_3 a un pH de 6.5 o menos, se remueve el H_2S preferencialmente, por encima del NH_3 . Todos los diseños del removedor consideran los efectos iónicos tanto como el equilibrio vapor/líquido. Estos diseños dependen de consideraciones empíricas.

El diseño del sistema de remoción es realizado para precisar factores específicos para la separación. La torre es empacada (10-30 ft de empaque). El vapor quitado se inyecta directamente, se provee vía un rehervidor. La recuperación del calor incluye el calor de intercambio en alimentación/fondos. En algunos casos la torre podría incluir una sección de rectificación como una sección de remoción.

La alimentación se acidifica para liberar el H_2S en preferencia al NH_3 , o se puede hacer más alcalina para facilitar la remoción del NH_3 . Al ajustar del pH surge un inconveniente: al agregar sólidos a la alimentación se vierten a los fondos. Se puede dar salida al vapor, o condensarlo y reducir la cantidad de agua que sale con H_2S , en este caso, la torre sería refluja con el condensado. La presión de operación es usualmente de 50 psig o menos, dependiendo de la presión de la corriente del removedor.

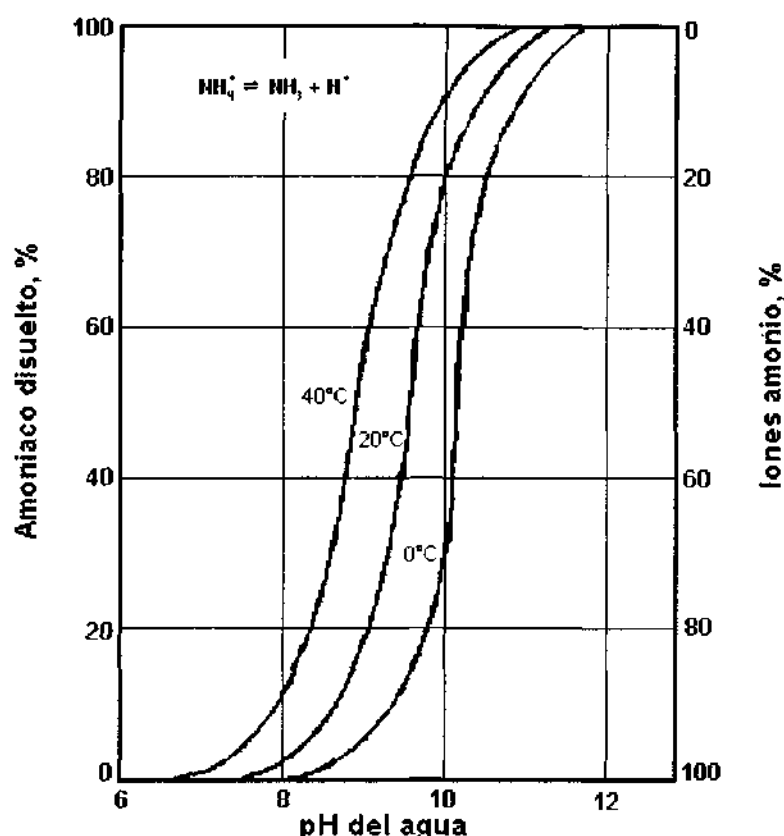


Fig. 3.14 Remoción del amonio afectado por la temperatura y el pH del agua.

La Fig. 3.13 muestra el diseño del removedor más simple: recuperación de calor en los fondos; inyección directa de vapor; aireado por encima del domo o dirigido al incinerador u otro proceso. Las Fig. 3.15-16 ilustran algunos de los diseños que se pueden usar:

- La Fig. 3.15 muestra un diseño del removedor de agua ácida con fondos que rehieren, reflujo por la cabeza, recuperación de calor de los fondos, y remoción de H₂S del agua antes del tratamiento en una unidad de sulfuro o de dietanolamina (DEA) absorbente.
- La Fig. 3.16 muestra la recuperación secuencial de H₂S y NH₃ del agua ácida, usando dos torres de remoción. El sistema incluye el ajuste del pH, la recuperación de calor de los fondos, el reflujo, el vapor calentado rehervido, y la recuperación del H₂S y NH₃ en la cabeza.

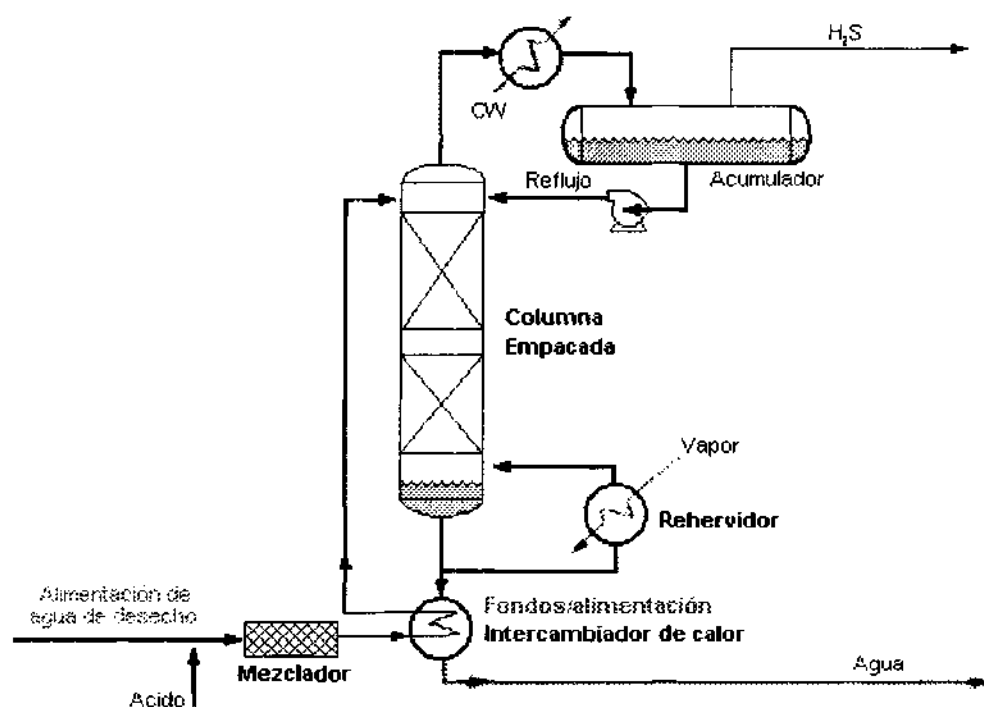


Fig. 3.15 Acidificación de la alimentación para la remoción de ácido sulfhídrico.

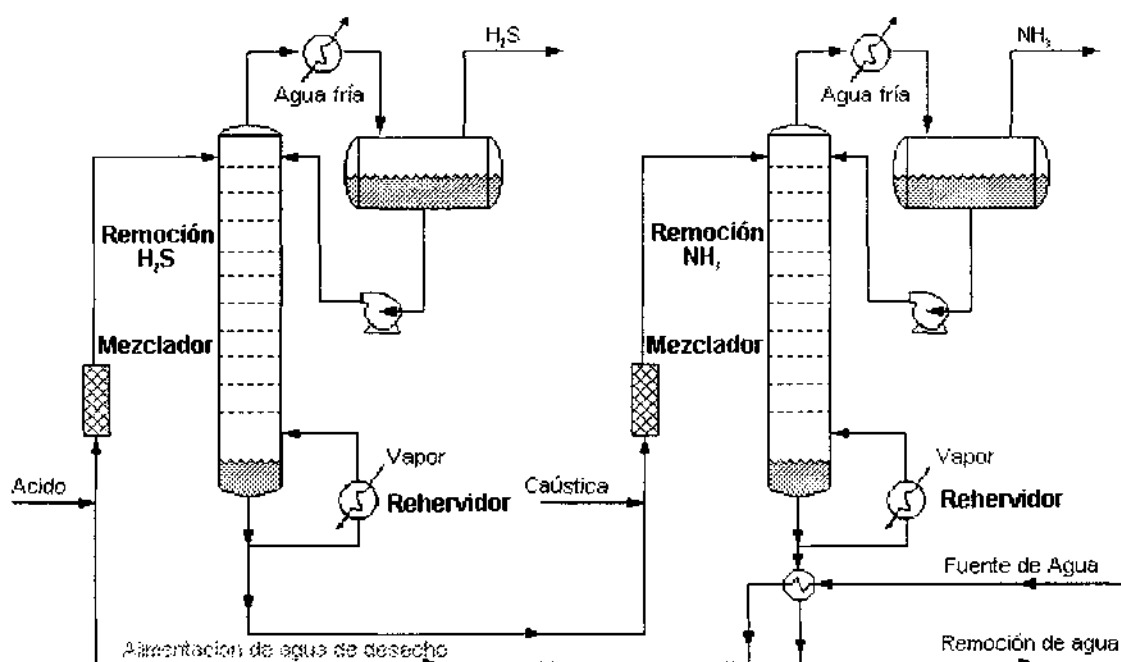


Fig. 3.16 Remoción de amoníaco y ácido sulfhídrico.

3.1.6.3 COSTO

La proporción de vapor depende del nivel de contaminantes, de las especificaciones del agua removida, del diseño de la torre y de otros factores, y varía extensamente de torre a torre. La Tabla 3.4 resume las operaciones de entrada, diseños, y datos de la ejecución de ciertas aplicaciones.

Tabla 3.4 Remoción del ácido sulfúrico y el amonio						
Alimentación	Planta de Amonio	Refinería de agua ácida			Dos etapas remoción	
	Proceso de Condensado	1	2	3	Etapas 1	Etapas 2
Razón, gal/min	300	400	175	283	231	203
H ₂ S, mg/l	0	1,700	2,000	5,250	3,400	375
N ₂ H, mg/l	2,000	1,400	2,100	2,600	2,625	1,425
Fenoles, mg/l	0	975	0	530		
Fondos						
H ₂ S, mg/l	0	200	2-5	8	375	4.5
NH ₃ , mg/l	10-15	400	2,100	200	1,425	10
Fenoles, mg/l	0	600	0	320		
Torre						
Dia interno, ft	5.5	6.5		3.5	5	3.5
Peso del empaque	2x20			15		
Tipo de empaque	Pall ring 1 in			saddle 3 in		
No. de platos		18	15		8	20
Tipo de platos		valve			Bubble cap	Bubble cap
Condiciones						
Reflujo	No	Si	Si	No	No	No
Razón de reflujo, gal/min		50	6			
Presión del domo, psig	25	6	15	8	3	5
Rehervidor	Si					
Vapor						
Inyección de vapor	No					
Vapor alimentado precalentado, lb/h	7,200	6,200	4,800	5,100	4,800	2,000
Vapor removido, lb/h	18,800	22,200	3,200	2,900	900	9,400
Vapor Total removido lb/gal	1.33	1.2	0.76	0.47	0.4	0.9

Comparado con algunos de los otros procesos, el vapor removido requiere una cantidad alta de corriente. Dos factores importantes dan algunas perspectivas:

- El vapor removido está usualmente a 50 psig o menos, y así está limitado el valor para la planta.
- Al remover el agua ácida con otros tratamientos y procesos de condensado es necesario encontrar los límites de la descarga del afluente. El agua recobrada es un crédito contra los costos de tratamiento del afluente.

La corrosión es otra preocupación, sobre todo cuando envuelve H₂S. Los cloruros o cianuros pueden acelerar la corrosión.[3.1.13]

3.1.7 TORRES DE ENFRIAMIENTO MOJADAS/SECAS

Combinando persianas de enfriamiento con un condensador en una torre se puede reducir el consumo de agua y aminorar o eliminar la niebla y problemas de helación. La magnitud de la reducción depende de la distribución de la carga de calor entre las secciones mojadas y secas, más el diseño de la torre y las condiciones del tiempo.

En algunos casos las torres de enfriamiento representan 80% o más del consumo de agua.

Las aplicaciones para estas torres de enfriamiento incluyen:

- Evaporación del vapor condensado para concentrar el arrastre y preservar el reciclado del agua para usarse en otra planta.
- La ósmosis inversa o electrodiálisis, remueve sales y otros sólidos del arrastre para que se puedan reciclar.
- Ablandando una corriente lateral se alcanzan más ciclos de concentración.

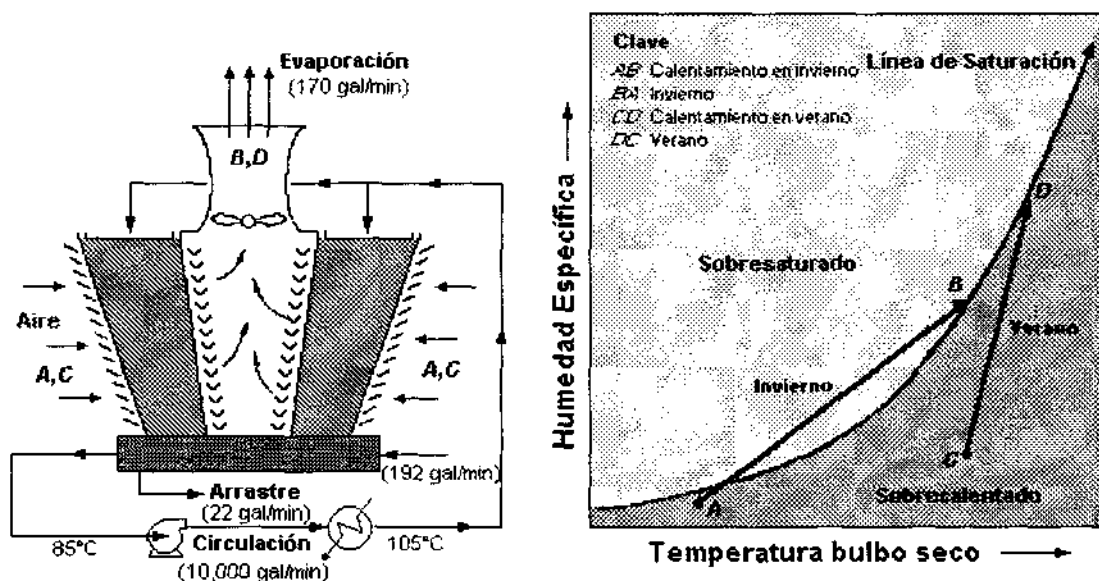


Fig. 3.17 Ejemplo de Torre de enfriamiento de flujo cruzado.

3.1.7.1 TORRES DE ENFRIAMIENTO MOJADAS

La Fig. 3.17 muestra una torre de enfriamiento de flujo cruzado doble (con 20°F de rango de enfriamiento y 100 millones de Btu/h, relación de calor liberado), y el diagrama psicrométrico que describe su funcionamiento en invierno y en verano.

La composición del agua usada en la torre es la suma de la evaporación, el arrastre y la fluctuación (en el agua de entrada).

En la Fig. 3.17 se ilustra la formación de la niebla en la carta psicrométrica. El aire que va a través de la torre en el verano se humedece, pero no es suficiente para formar niebla al final de la torre. En el invierno la línea de humidificación va por la región de sobresaturación. Esto significa que esa niebla se formará cuando la descarga aireada se pone en contacto con el aire frío del ambiente.

Las composiciones dependen de la magnitud (ciclos de concentración) a que se concentra el agua en la torre. El número de ciclos depende de la calidad de composición del agua, en el arrastre, el cual regula la proporción de composición y número de ciclos, también puede depender de la concentración de sólidos disueltos, sílica y de otros contaminantes en la entrada del agua.

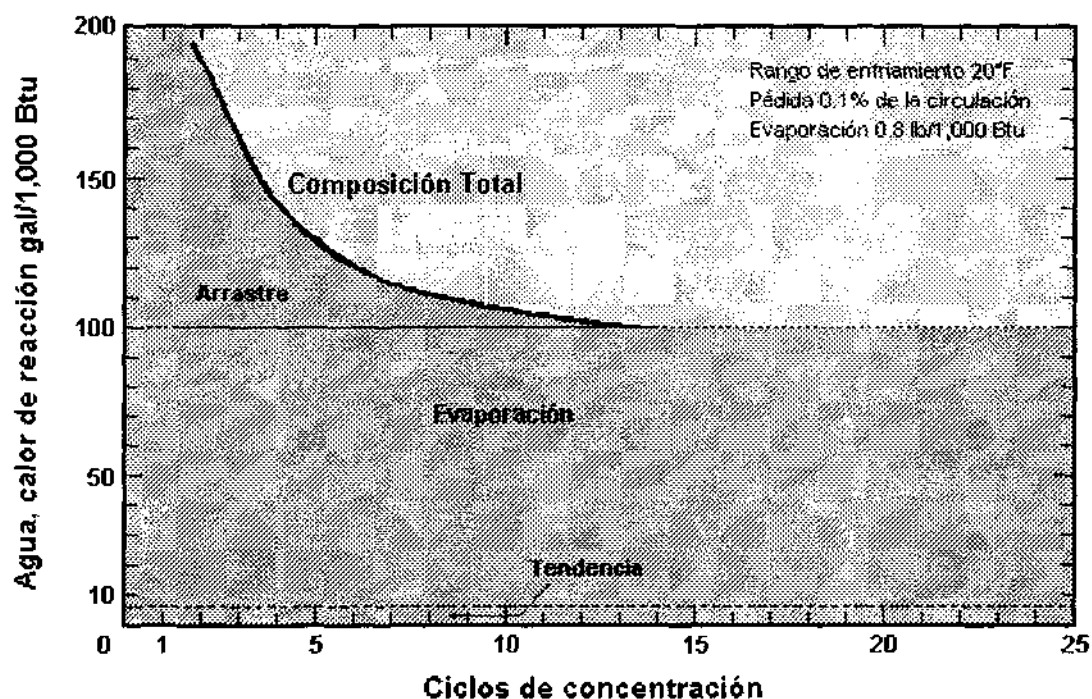


Fig. 3.18 Ciclos de concentración en la Torre de enfriamiento.

La Fig. 3.18 muestra los requisitos de agua para una torre de enfriamiento, note el descenso en los requisitos de composición del agua, a más ciclos de concentración. En la evaporación se da la pérdida mayor de agua, y en el arrastre es secundaria.

La fluctuación es una preocupación en el balance de agua, es menor que 0.1% de la proporción de la circulación, y se puede eliminar con un tipo de eliminador convencional herringbone. [3.1.14, 3.1.15]

La proporción de evaporación varía extensamente, depende del clima, del diseño de la torre de enfriamiento, y de la magnitud a la cual el aire enfría el agua sin evaporación. Las proporciones de aire varían substancialmente por el diseño: Una torre de flujo cruzado tiene una relación líquido/aire (L/G) de 0.5, mientras en una torre a contracorriente la relación sería dos veces más alta. Además, la velocidad del ventilador cambiaría la proporción L/G para una torre dada.

El efecto de la temperatura ambiente del bulbo húmedo y la humedad relativa en la evaporación se muestra en la Fig. 3.19. [3.1.16]

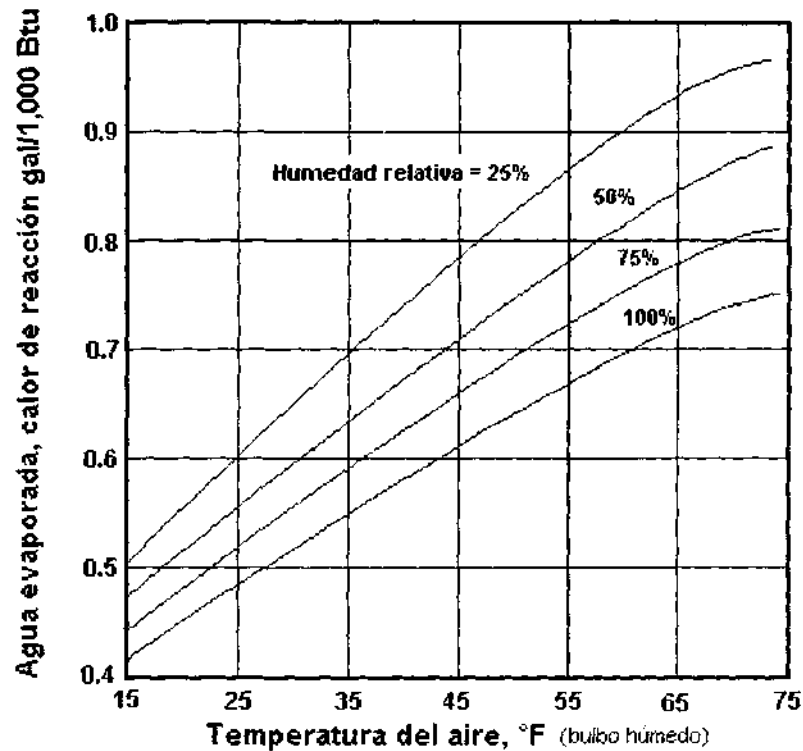


Fig. 3.19 Evaporación del agua en una torre de enfriamiento.

3.1.7.2 COMBINACION DE TORRES DE ENFRIAMIENTO MOJADAS/SECAS

Cuando una sección de secado en frío se adiciona a una torre de enfriamiento, se cambia la carga de calor húmedo a las secciones secas. El agua conserva la carga de calor durante el enfriamiento.

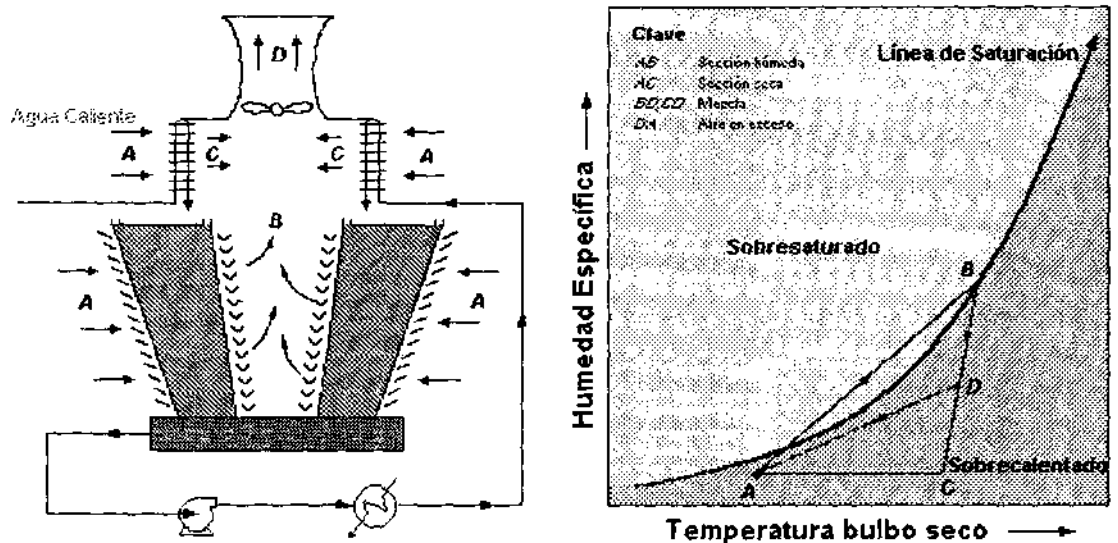


Fig. 3.20 Secciones húmeda y seca de la torre en paralelo.

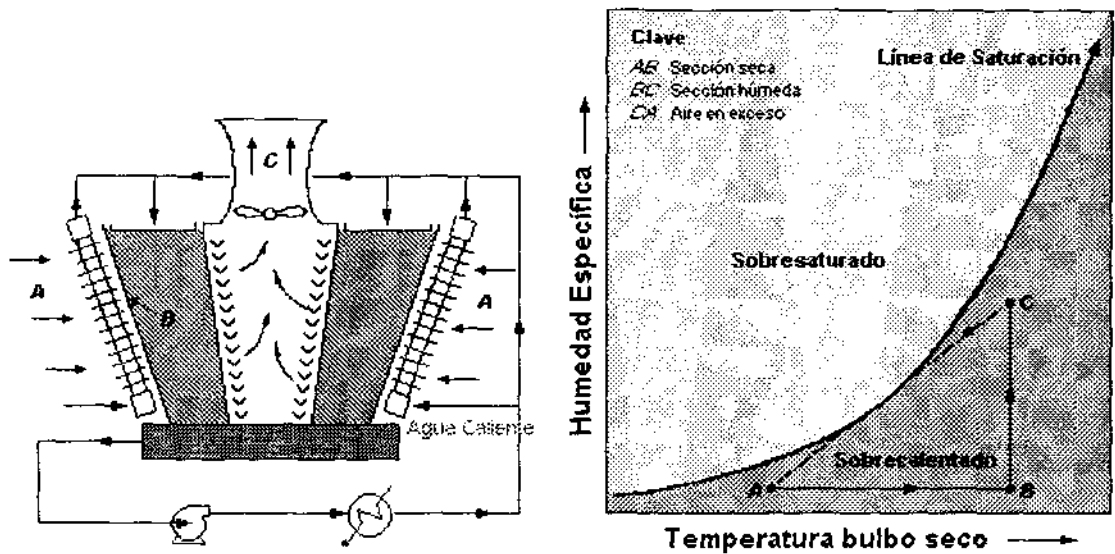


Fig. 3.21 Secciones húmeda y seca de la torre en serie.

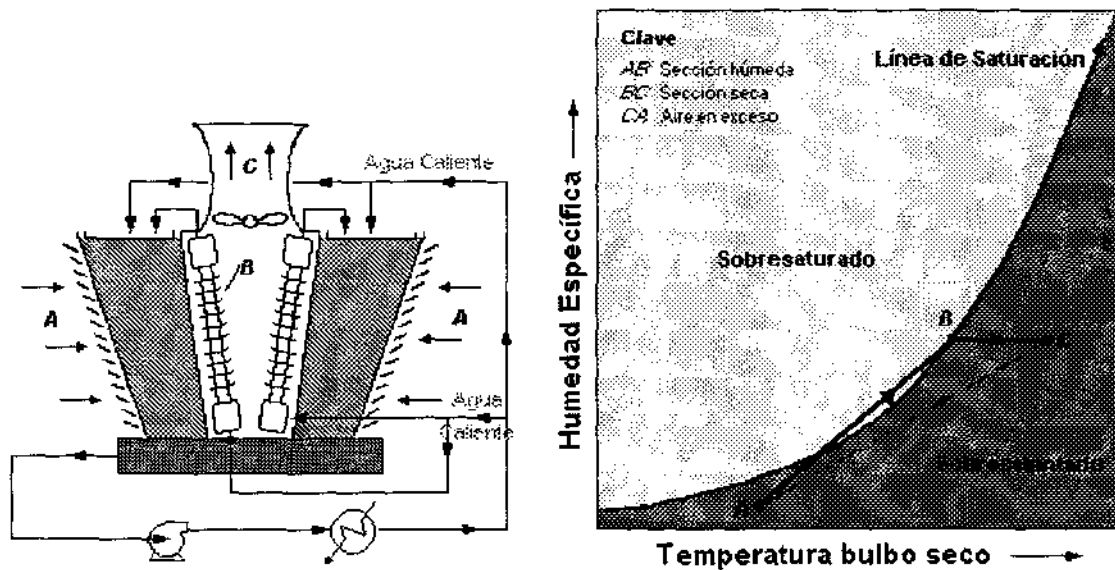


Fig. 3.22 Combinación en serie, primero la sección húmeda.

La Fig. 3.20-22 muestra tres diseños posibles para torres de enfriamiento húmedo/seco, y el psicrométrico para cada una:

- Flujo en paralelo, en la Fig. 3.20
- Flujo en Serie por la sección seca y después por la sección mojada, en la Fig. 3.21.
- Flujo en serie por la sección mojada y después por la sección seca, en la Fig. 3.22.

En la Fig. 3.20, el agua fluye a través la sección de las persianas antes que a la sección húmeda, porque las persianas requieren un diferencial de temperatura más alto. El diagrama psicrométrico muestra que el aire se calienta a través de la sección seca a humedad específica constante, y a través de la sección mojada con aumento de humedad. No se espera formar niebla cuando la dos corrientes de aire se mezclan y se juntan en el aire ambiente. Se considera esta diseño preferible porque disminuye las pérdidas del proyecto (caída de presión) y da más flexibilidad estacional.

El aire ambiente pasa primero por las persianas en el arreglo en serie de la Fig. 3.21, siendo sobrecalentado. El aire pasa entonces por la sección mojada de la torre, creciendo en la humedad específica. La temperatura del bulbo seco varía aquí hacia arriba o hacia abajo. Cuando el aire es desalojado a la atmósfera, no se espera formar niebla.

La Fig. 3.22 también ilustra un flujo en serie; pero en este caso el aire pasa a través de la sección mojada antes que a la seca. Se humedece el aire, entonces es sobrecalentado como cuando pasa por las persianas. No se espera nada de niebla cuando la descarga de aire está en contacto con el medio ambiente. Esta combinación es probablemente la menos deseable de las tres aquí descritas, porque la pérdida del proyecto es relativamente alta y las persianas se pueden obstruir debido al tratamiento de aguas.

3.1.7.3 DISEÑO Y FACTORES DE COSTO

Una combinación húmedo/secado de la torre de enfriamiento puede reducir significativa y fácilmente el consumo de agua y el volumen del afluente, comparado con una torre mojada, pero el problema es el aumento del capital de inversión para el mismo nivel de calor liberado. También, la aproximación húmedo/seco *requiere la optimización de la temperatura del agua fría.*

Respecto al tamaño de la torre, *una temperatura del agua más fría reduce el tamaño y el costo.*

3.1.8 PERSIANAS DE ENFRIAMIENTO

Las persianas tenido gran aceptación como **una alternativa de enfriamiento del agua en aplicaciones donde el calor liberado es relativamente alto.** Cuando el agua se escasea, o es cara se recomienda operar el proceso ciclo cerrado, utilizando las persianas para abaratar los costos.

Aquí, se analizan los procesos aplicados de las persianas.

3.1.8.1 PERSIANAS VS. TORRES ENFRIAMIENTO

En comparación con las torres de enfriamiento, las persianas ofrecen ventajas y desventajas. *El factor importante para decidir su uso es la diferencia de temperatura entre el aire ambiente y la corriente enfriada,* las persianas son una alternativa cuando hay aumento de temperatura, su costo es menor. **En algunas aplicaciones las torres de enfriamiento y las persianas se usan juntas.**

Los persianas absorben el calor liberado, aproximadamente de 2-4 hp Btu/h [3.1.17], dependiendo del espesor del las persianas, de la diferencia de temperatura y de la configuración de la persiana.

En una típica torre de enfriamiento, de 25-33% de la energía es para el funcionamiento del ventilador, y el resto para el bombeo del agua, mientras que toda la energía generada en las persianas va hacia el ventilador.

La Tabla 3.5 resume las ventajas relativas y las desventajas de las persianas empleadas en las de las torres de enfriamiento.

Diseño para persianas y comparación de costos **Tabla 3.5**

Parámetros	Persianas	Torres de Enfriamiento/ Agua Fría para Intercambiadores de calor
Energía	2-4 hp/millón Btu/h	4-6 hp/ millón Btu/h
Requerim del proceso	Intercambio fuera de la temperatura crítica	Intercambio fuera de la temperatura crítica
Función Estacional	Depende del aire ambiental	Menos dependencia
Temperatura de diseño	Del bulbo seco excede sólo 2% de la ambiental	Del bulbo húmedo excede sólo 2% de la ambiental
Factores ambientales	Sin más preocupaciones	Arrastre, afluente permite secado, niebla y congelado
Tratamientos químicos	No necesita	Incluye inhibidor corrosión dispersantes, biocidas
Capital/Costos de operación	Menor para procesos de alta temp. liberada	Menor para procesos de menor temp. liberada

3.1.8.2 CONSIDERACIONES DEL DISEÑO

Las persianas más simples se diseñan con una red de tubos con persianas. Son diseñadas para una temperatura ambiental (bulbo seco).

La Fig. 3.23 ilustra tal arreglo, donde la persiana, se usa para condensar el vapor de una turbina con alta carga de calor en la corriente, que requeriría una gran cantidad de agua de enfriamiento.

La Fig. 3.24 muestra un diseño: el aire caliente es reciclado a la entrada por un sistema de amortiguadores, mezclándolo con el aire frío del ambiente antes de pasar por la unidad. Tal arreglo ajusta fácilmente el control automático de la temperatura. Una aplicación interesante para las persianas es el de la condensación: el líquido condensado se enfría con persianas, entonces se recircula a una torre donde se pone en contacto con el vapor entrante.

Las persianas se pueden usar también para el enfriamiento en un circuito cerrado por la circulación del fluido en un intercambiador de calor. Usando una mezcla de glicol/agua o salmuera como fluido de intercambio de calor se evitan problemas de congelamiento en tiempos fríos. Este tipo de sistema puede ser muy valioso porque es simple y no usa agua.

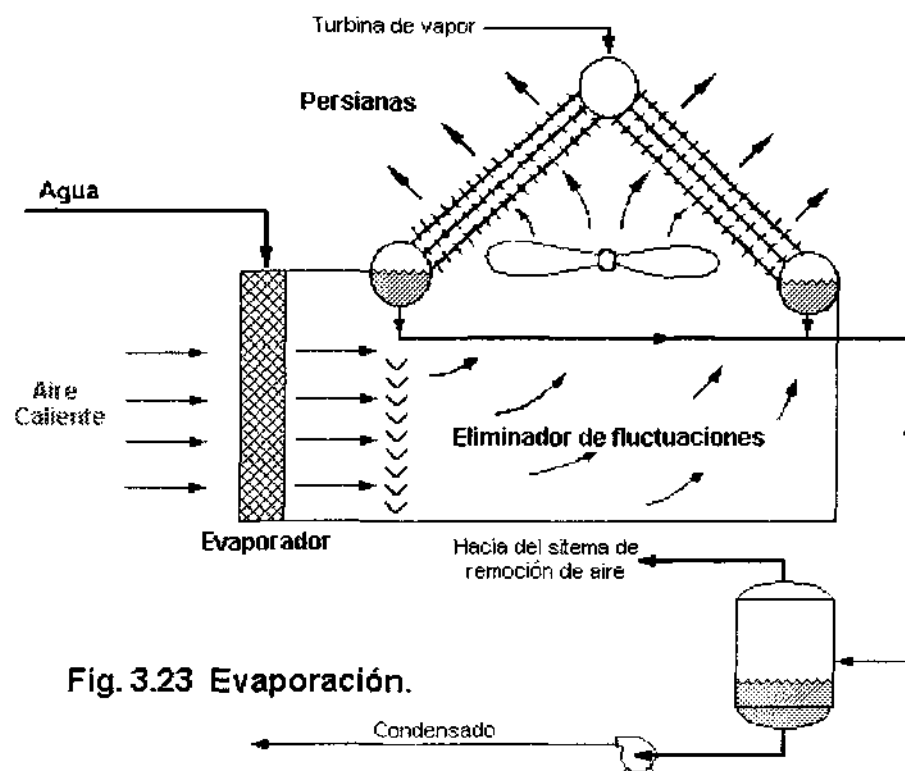


Fig. 3.23 Evaporación.

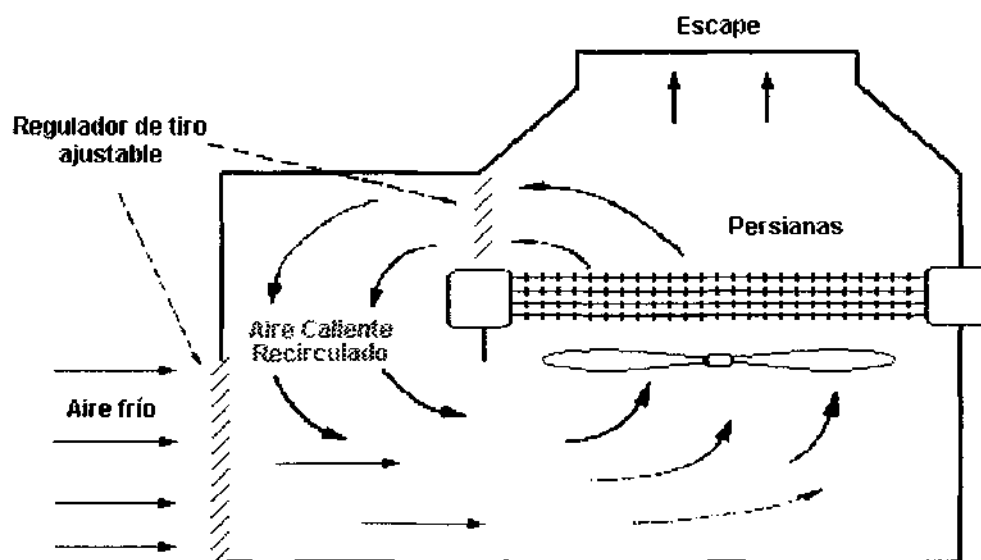


Fig. 3.24 Aire caliente recirculado.

3.1.9 ABLANDAMIENTO DE LA CORRIENTE LATERAL

Ablandando la corriente lateral de una torre de enfriamiento se incrementa la magnitud a la cual el agua puede ser concentrada en una torre. Ésta reduce el arrastre, y por eso los requerimientos del agua.

Al igual que en la Fig. 3.18 la sección de la torre húmedo/seco y la reducción de agua en el arrastre son muy pequeñas cuando el agua de enfriamiento es concentrada a ciclos de nueve o más. La Tabla 3.6 ilustra esta relación para una torre en la que la proporción de evaporación es 0.8 lb de agua por 1,000 Btu.

Ahorro de agua en el ablandado			Tabla 3.6
Ciclos de concentración	Razón de agua requerida en la Torre de Enfriamiento	Reducción requerida en el flujo de agua	
3	114 gal/millón de Btu	Nivel básico	
6	115.2	20%	
9	108	25%	
12	104.7	27.30%	

3.1.9.1 COMO ELIMINAR OBSTRUCCIONES

La Fig. 3.25 muestra una configuración para un tratamiento de ablandamiento con cal sodada en una corriente lateral de una torre de enfriamiento. La corriente tratada debe ser la del agua caliente que vuelve a la torre de enfriamiento, ya que es más reactiva que la del agua fría.

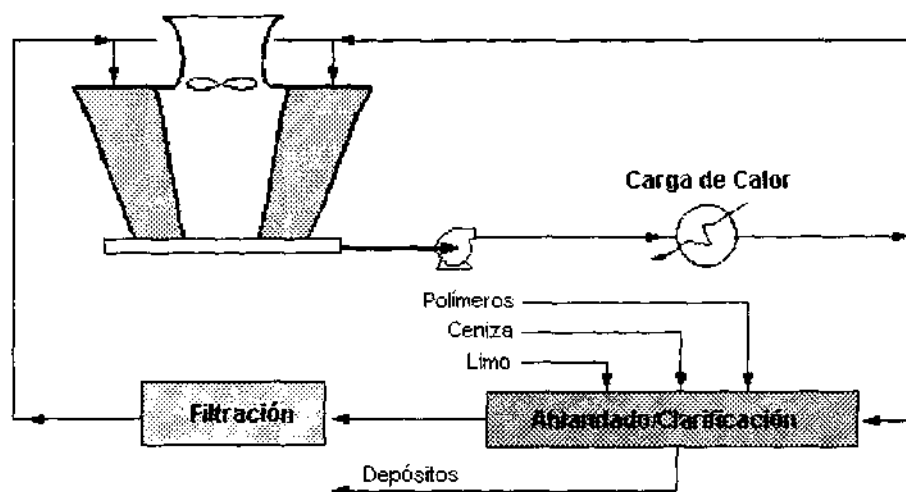
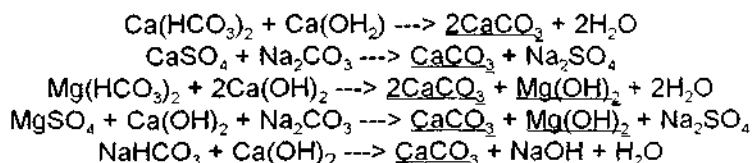


Fig. 3.25 Corriente Lateral de ablandamiento.

Los pasos del proceso son: ablandado o clarificación; ajuste del pH; y del dióxido de carbono o la adición de ácido sulfúrico. Éste remueve sólidos de solubilidad limitada, tales como el calcio y las sales de magnesio, sílica. Las sales más solubles (sales del sodio, por ejemplo) formadas en el sistema a su debido tiempo permiten más ciclos de concentración. El efecto neto es menos en el arrastre y en la composición del agua, y mayor en los sólidos disueltos que circulan.

El calcio, las sales de magnesio, y la sílica son los blancos primeros a ablandar. Se pueden resumir las reacciones que conciernen al calcio y al magnesio como sigue, con compuestos subrayados que indican los precipitados:



El hidróxido de magnesio precipitado absorbe y coprecipita la sílica. Si no hay suficiente magnesio en la corriente tratada, y una cantidad adicional (en la forma de óxido del magnesio) se pueden aumentar en el reactor de ablandamiento.

Generalmente el límite de valores aceptados para el calcio y el sulfato en el agua de enfriamiento se describen por [3.1.18] :

$$[\text{Ca}^{+2}] [\text{SO}_4^{-2}] = 500,000 \text{ mg}^2/\text{L}^2$$

Éste es un control de lineamiento para la operación de un ablandador en un circuito común de la torre de enfriamiento. Se sugiere [3.1.19] que la solubilidad de este producto pueda ser de 1 millón bajo condiciones de cero arrastre, con un límite superior para Ca^{+2} de 400 mg/l.

La presencia de cromo de hexavalente, el inhibidor más común de la corrosión del agua de enfriamiento, necesita considerarse cuando se evalúa la corriente lateral de ablandamiento. La prueba de trabajo en una unidad comercial ha confirmado que ese cromo hexavalente, que es soluble, no se remueve en el ablandamiento, considerando que relativamente se quita el cromo trivalente insoluble.

3.1.9.2 APLICACIONES

La corriente lateral de ablandamiento ha sido estudiada por varios investigadores [3.1.20,3.1.21], pero no se usa hasta la fecha. La Tabla 1.7 muestra el análisis del agua para estos dos medios, note que se disuelve a niveles de 5,000-8,000 mg/l. [3.1.22]

Comparado con algunas de las otras tecnologías de manejo del agua, el ablandamiento de las corrientes laterales es menos costoso (capital y funcionamiento) en base de un galón. Su implementación, viabilidad, condiciones de operación y requisitos químicos dependen, incluso de, las condiciones locales y las características del agua. Los factores positivos y negativos son los siguientes:

Ventajas: capital moderado y costos de operación moderados; reduce el volumen del afluente tratado.

Desventajas: alto nivel de sólidos disueltos; se debe disponer del lodo producido en el ablandamiento; el funcionamiento demanda un tiempo de operación y análisis del laboratorio; el efecto de la tasa de corrosión es incierta.

Se considera el ablandamiento de las corrientes laterales garantizadas como una herramienta de manejo del agua, pero sus méritos necesitan ser ponderados contra los méritos de herramientas alternativas que compiten en la facilidad del esquema del manejo de agua.

Corriente lateral ablandada y adicionada de sólidos por el agua

Tabla 3.1

Parámetros de calidad del agua	Planta A	Planta B
pH	6.5	6.4
Total de sólidos disueltos, mg/l	8,000	4,869
Total de dureza como CaCO_3 , mg/l	480	1,478
Calcio, mg/l	141	384
Magnesio, mg/l	31	126
Cloruros, mg/l	750	647
Sulfatos, mg/l	4,500	2,345
Sílica mg/l	50	111

3.1.10 RESUMEN

Todas las tecnologías discutidas son para la obtención del agua fácilmente, o para el uso de remoción en algunos puntos en la planta, o para reciclar y reusar una corriente desechada y así poder usar el agua en la torre de enfriamiento según las necesidades para su aplicación posterior. En algunos de los ejemplos citados, se alcanza la economía de agua, a costo pequeño porque se maneja controlando la contaminación. La conservación del agua debe pagar por sí misma; la decisión de invertir en ella o no: depende del sitio específico de suministro del agua y de los factores ambientales.

3.2 PROCESOS AUXILIARES

EFFECTO DE LA TEMPERATURA DEL AGUA EN LA EFICIENCIA DE ENFRIAMIENTO

3.2.1 UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO PUEDE AUMENTAR SU EFECTIVIDAD CON EL EMPLEO DE INTERCAMBIADORES, TURBINAS Y COMPRESORES

Para asegurar una restitución económica en la inversión en una torre de enfriamiento, se debe repasar continuamente los procedimientos de operación y costo para mejorar la eficiencia de la torre.

Las torres de enfriamiento se usan en los procesos químicos para rechazar el calor liberado que se absorbe en las corrientes del proceso por el agua de enfriamiento. El agua que lleva dicho calor se puede descargar en un estanque de agua o enfriarse o reciclarse. *Cuando el reciclado va hacia la torre de enfriamiento, el agua se enfría a través de la descarga de calor latente de vaporización y por el intercambio de calor sensible con el aire del ambiente.*

Reciclando se conservan los recursos del agua. Esto es importante porque aproximadamente 500 billones de galones de agua son usados por una sola industria al día. Por supuesto, se debe devolver el calor no deseado del agua al ambiente de una manera ecológica aceptable.

3.2.2 CRITERIO AL INVERTIR EN UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO

El costo total más bajo debe ser el criterio para comprar una torre de enfriamiento. Éste implica analizar ventilador, motor y bomba (de ciertos hp), con un mantenimiento satisfactorio y costos de ciclo de vida. El ahorro en el precio de la compra podría utilizarse en el funcionamiento térmico que puede inducir gastos considerables. Al comprar el equipo algunas veces se adquiere el menos caro sin tener en cuenta los costos de operación. Una torre de enfriamiento adquirida de esta manera puede ser costosa porque disminuiría la eficiencia del funcionamiento de la planta completa. Afortunadamente, se pueden actualizar tales torres.

Una guía para la eficiencia es, por supuesto, cuánta energía consume la torre. Se analiza cuánta energía se necesita para impulsar una torre, y buscar mejorar su eficiencia.

De cualquier modo, el aspecto de costo más importante es cómo se usa el agua de enfriamiento, y cómo el agua más fría podría reforzar la eficiencia del equipo. Por ejemplo el agua más fría para una unidad de refrigeración, requiere menor energía para impulsarla. De manera similar, la función de los condensadores es más eficiente con agua más fría, como lo

hacen las turbinas condensadoras. Por eso, el objetivo primario es hacer la torre de enfriamiento más fría porque hay ganancia en hacerlo así.

Los criterios para medir el **desempeño de la torre de enfriamiento** se denotan en la Figura 3.2.1.

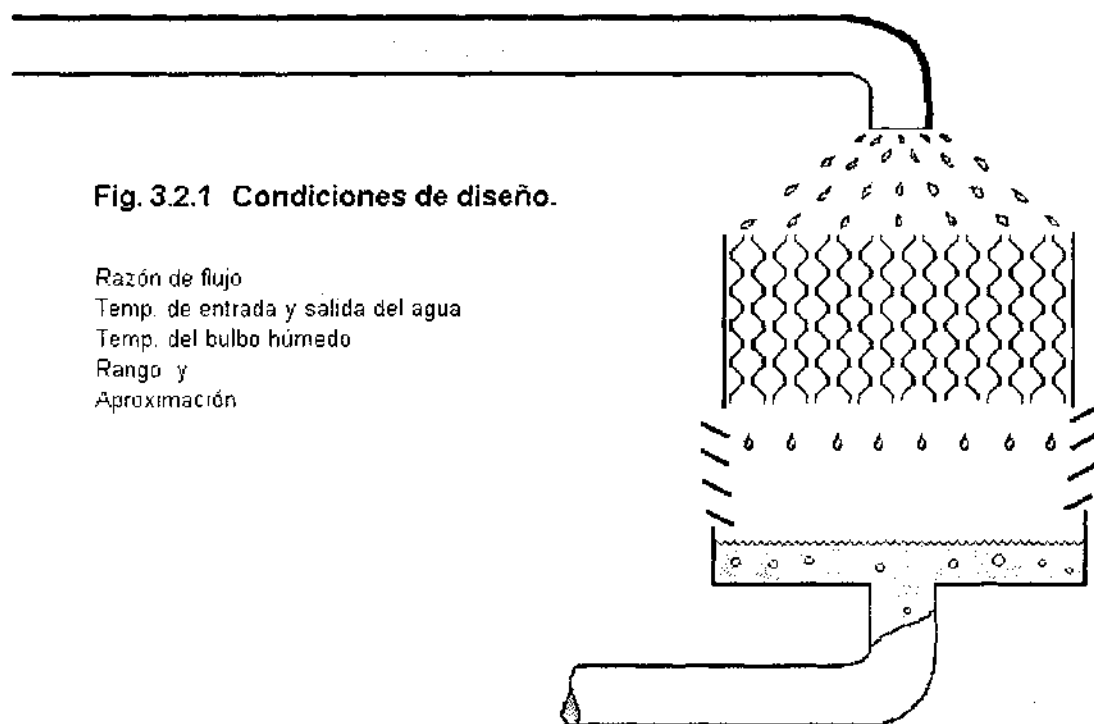


Fig. 3.2.1 Condiciones de diseño.

El rango (también conocido como el ΔT) es la diferencia entre las temperaturas de entrada y de salida del agua. La temperatura de bulbo húmedo, la cual representa la del ambiente y las temperaturas del punto de rocío (o temperatura ambiente y humedad relativa), indican la calidad de evaporación del aire. *Las diferencias entre la temperatura del agua de enfriamiento y la temperatura de bulbo húmedo es llamada "aproximación del bulbo húmedo."*

La base de funcionamiento de la torre de enfriamiento es el evaporador que intercambia de calor sensible. El evaporador cuenta con 75% del calor transferido y con el calor sensible considerándose para el resto.

Un inconveniente en el proceso es que el agua se pierda a la atmósfera como vapor caliente. La pérdida de la evaporación casi del 1% de agua por cada 12.6°F (7°C). [3.2.1]

*Excepto modelos pequeños especiales, las torres de enfriamiento son diseñadas como de costumbre. De acuerdo a su forma, tamaño y configuración varían los parámetros térmicos. **Están disponibles en dos diseños** primarios operacionales basados en el flujo de aire en relación con el flujo de agua: **el flujo a contracorriente y el flujo cruzado** (como en el diagrama de la Fig. 3.2.2).*

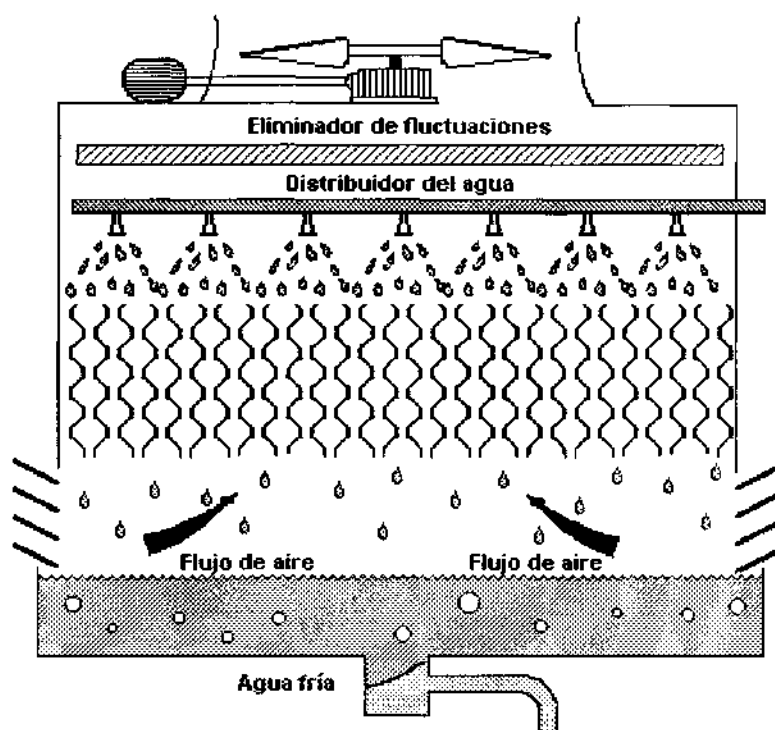
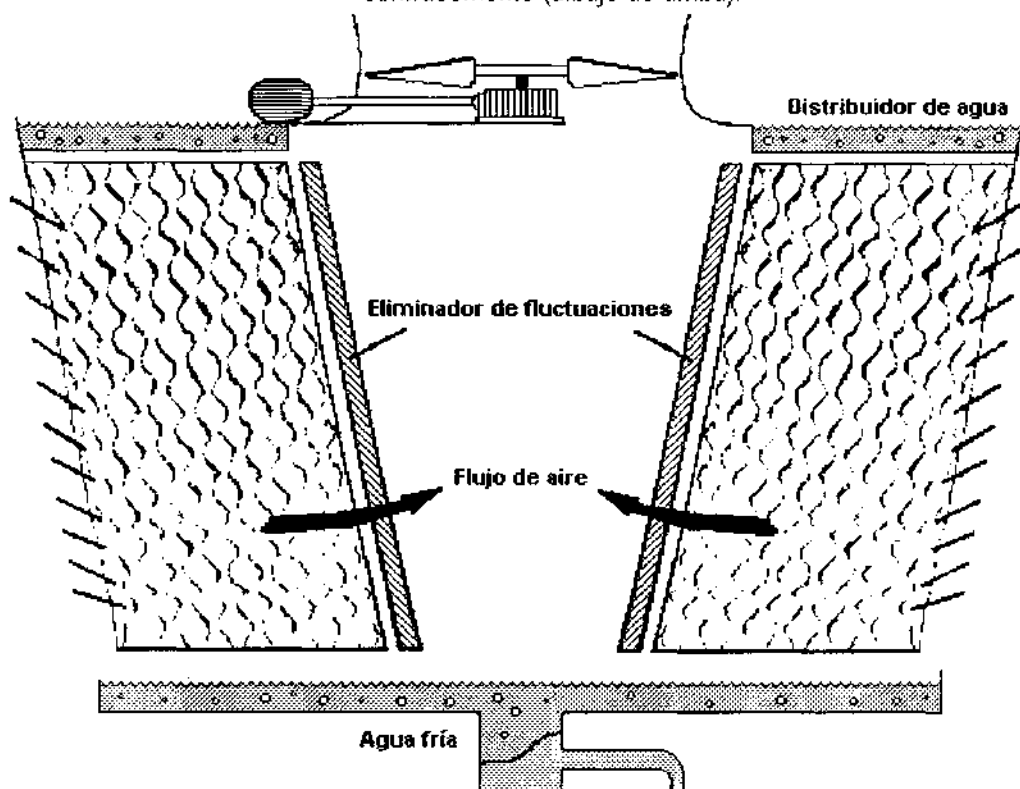


Fig. 3.2.2 La velocidad del aire a través de una torre de flujo cruzado (dibujo de abajo) es mayor que en una torre a contracorriente (dibujo de arriba).



3.2.3 OPTIMIZACIÓN DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO

Hay cuatro componentes prioritarios de una torre para investigar cuando se busca actualizarla:

- *Relleno Wet-decking*, el cual compone la superficie para transferir el calor del agua al aire entrante a la torre (Fig. 3.2.2)
- *Sistema de distribución del agua*, que esparce la uniformidad del agua encima del relleno de la cubierta mojada (Fig. 3.2.2).
- *Eliminador de fluctuaciones*, previene que más agua entrante en el aire de salida sea llevada a la atmósfera (Fig. 3.2.3).
- *Colocar un flotador, controlador de nivel*, para mantener el nivel del agua del estanque, reabasteciéndose de agua, cuando el nivel baje por las pérdidas de agua en los procesos de reciclado.

Frecuentemente, una mejora en la ejecución de la torre se puede hacer cambiando el relleno wet-decking por un moderno relleno de celdas. Es necesario primero evaluar el potencial para el cambio en la transferencia de calor en cuanto a las características del relleno.

Con un rociado en barras las gotas del agua rebotan de una capa a otra (Fig. 3.2.3). El aire a contra corriente simplemente enfría el exterior de las gotas. Con un relleno de celdas en cambio, se esparcen las gotas en una película muy delgada. El aire contacta una superficie mucho más grande para el intercambio del calor. El aire también pasa a través del relleno de celdas a una caída de presión más pequeña.

El agua limpia es esencial porque el agua sucia puede obstaculizar rápidamente el relleno de celdas. Si no se puede evitar el agua sucia y el desarrollo bacteriológico es posible, los pasajes en el relleno deben ser más grandes. Si químicos, tales como solventes, atacaran el relleno, se debe escoger un material resistente. Si la calidad del agua es muy pobre, un relleno de celdas no puede ser la opción en absoluto.

El sistema de distribución del agua debe repartir uniformemente el agua encima del relleno para el máximo contacto entre el aire y el agua.

La distribución del agua debe ser uniforme en las torres dispuestas con relleno de celdas, porque el relleno constituye casi toda la superficie de la torre para transferencia de calor y masa.

Los arreglos de la distribución del agua pueden ser más flexibles para torres de flujo a contracorriente que para las de flujo cruzado.

Si la torre es de flujo a contracorriente o de flujo cruzado, la clave para la ejecución es la distribución interior uniforme del agua, la caída de presión estática, la configuración del relleno, y la velocidad del aire.

Los eliminadores de las fluctuaciones previenen a las gotas de agua de ser sopladadas fuera de la torre. La llovizna o niebla producida por el proceso de evaporación no se puede eliminar, pero un sistema de eliminación de fluctuaciones puede prevenir las gotas salientes con el aire descargado.

El sistema de eliminación constaría de baffles o relleno de celdas. Esto se sitúa entre el sistema de distribución de agua y el punto de descarga del aire para limitar la dispersión de gotas de agua entrante en la atmósfera.

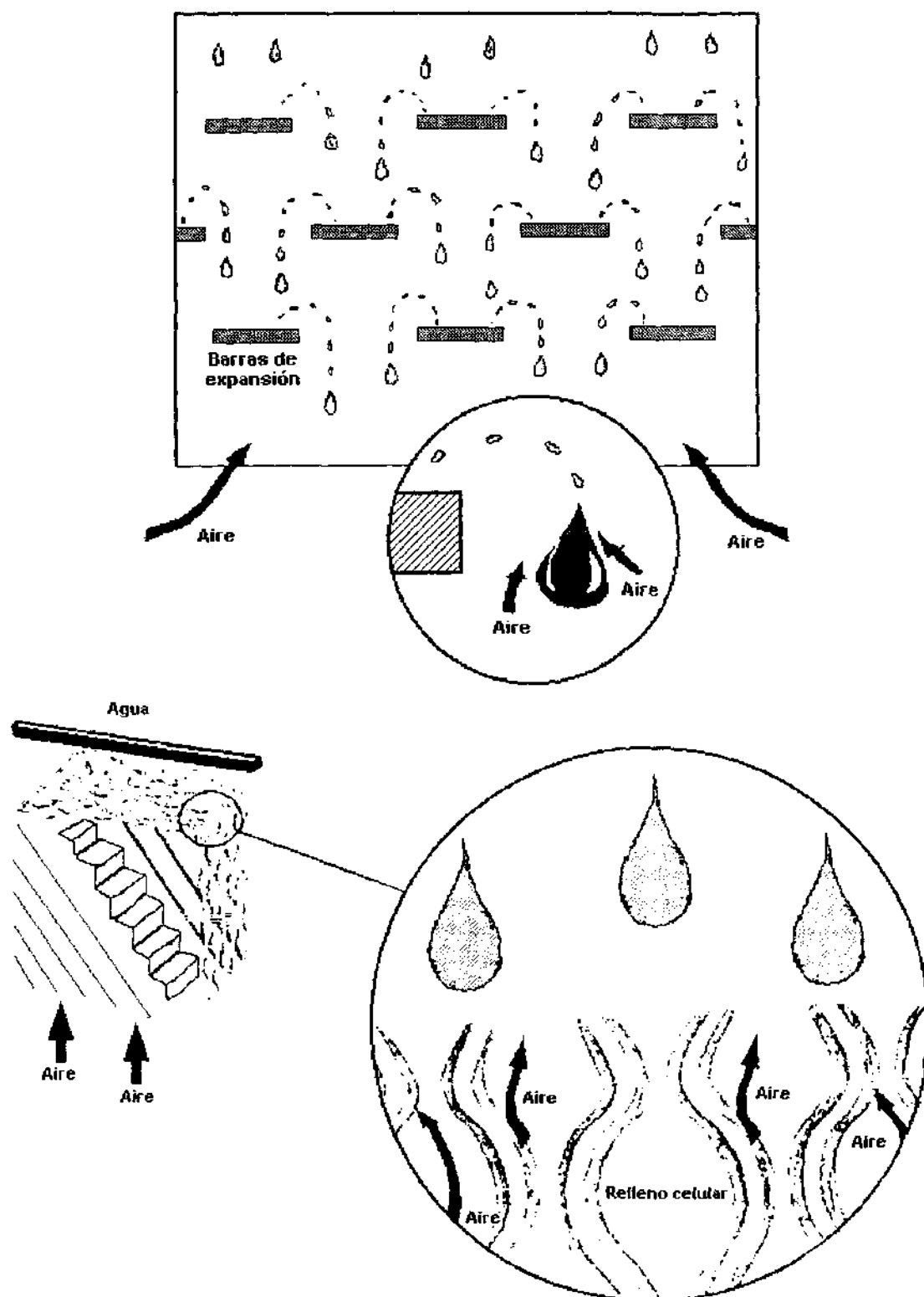


Fig. 3.2.3 El relleno celular favorece la transferencia de calor.

La Fig. 3.2.4 muestra un eliminador de fluctuaciones de tres pasos de baffles, y un nuevo, más eficiente, tipo de eliminador de seis pasos fabricado en celdas de PVC. En el mismo espacio el tipo de celdas mejora el contacto entre agua y el aire.

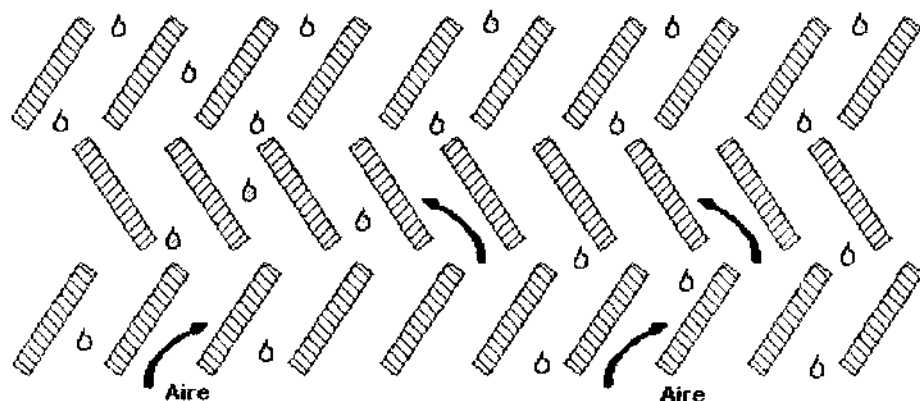
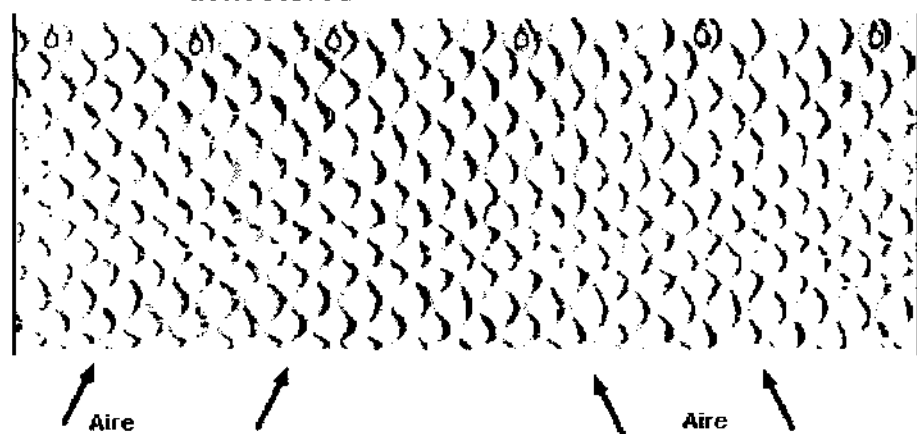


Fig. 3.2.4 Las celdas son más efectivas que los deflectores



La ejecución de una torre de enfriamiento los eliminadores de fluctuaciones son diseñados para ser eficientes a través del rango de velocidades del aire. Un flujo de aire que está demasiado alto podría causar la excesiva fluctuación del agua en la torre. Un flujo de aire que está demasiado bajo, por supuesto, limita la remoción del agua.

Un mal diseño del sistema de eliminación de fluctuaciones aumenta la presión estática a través de la torre, retardando el aire y disminuyendo el enfriamiento. Un buen diseño del sistema puede mejorar la ejecución de la torre por arriba de 0.5°F (0.3°C). La caída de presión menor a través de los eliminadores de fluctuaciones de celdas deja que el aire pase a una velocidad más alta sin costo adicional. La optimización de la ejecución de la torre de enfriamiento se hace llevando a una velocidad excesiva la rotación del ventilador e incrementado el ángulo de las paletas, así aumenta la velocidad del aire. El consumo de energía no se incrementa, porque la caída de presión a través del material de las celdas no aumenta.

La eliminación de la fluctuación podría ser eliminada teóricamente pero no prácticamente. Un nivel aceptable es "no más de 0.002% del agua circulante." **La torres de flujo cruzado son más susceptibles a la pérdida de fluctuaciones que las de flujo a contracorriente** porque la velocidad del aire a través de ellas tiende a ser mayor.

3.2.4 FLUJO A CONTRACORRIENTE V.S. FLUJO CRUZADO

Las torres de flujo a contracorriente con relleno de película de celdas son más eficientes que las torres de flujo cruzado con relleno de rejillas. En la torre de flujo a contracorriente se aumenta el calor y la transferencia de masa, por lo tanto el aire y el agua elevarán su temperatura.

Para el mismo enfriamiento, *una torre de flujo cruzado siempre requiere más flujo de aire o relleno, o ambos.* En el domo se recircula aire caliente porque la velocidad más alta del aire allí, crea una presión más baja en la succión del aire.

La pérdida de venteo a través de las torres de flujo cruzado es más grande porque la velocidad del aire de entrada es más alta y la distribución del aire es menos uniforme.

El hielo invernal en torres de flujo a contracorriente es más controlado por opciones tales como un sistema de rociado auxiliar bajo del relleno wet-decking, la mejor retención de calor se da vía funcionamiento del ventilador inverso, con funcionamiento controlable. Cuando las torres se llegan a helar, la torre de flujo a contracorriente se daña menos. Por otra parte la inspección y el mantenimiento para las torres de flujo a contracorriente son más fáciles que para las de flujo cruzado porque el relleno y los eliminadores de fluctuaciones son más accesibles.

La cabeza de bombeo requerida para elevar el agua a los tanques de distribución de agua caliente de torres de flujo cruzado puede ser dos veces más alta. Esto puede elevar los costos de operación por encima de la vida de servicio de una torre pequeña por cientos de miles de pesos. Aunque muchas torres de flujo cruzado de 60 pies aproximadamente son todavía construidas con madera o rejillas de plástico para el rociado; el relleno de celdas ha ganado predominio a causa de su gran eficiencia de transferencia de calor y menor cabeza de bombeo requerida.

3.2.5 ENFRIAMIENTO POR HUMECTACIÓN

En el enfriamiento por humectación, muchas compañías han reducido el agua a unos 20 ciclos de concentración antes del arrastre.

En 5-10 ciclos se pierde aproximadamente 5% del agua circulante con el arrastre y la evaporación.

A cero arrastre en la corriente lateral de la torre de enfriamiento se da un tratamiento de ablandamiento, usualmente con cal caliente, para remover el calcio y la sílica y para prevenir la incrustación.

Un problema con el cero arrastre es que se pueden formar cloruros corrosivos. El sistema de ablandado reduce la necesidad de biocidas porque actúa como un filtro, por lo tanto, se usa un surfactante para desalojar los microorganismos por filtración, y se sustituye el peróxido de hidrógeno por cloro. [3.2.2]

Se necesitan agregar dispersantes para asistir en el mantenimiento de las superficies del intercambiador de calor.

Este proceso puede ser empleado para el poliestireno sulfonado y para los polimaleicos, que dejan la incrustación para formar lodo, en lugar de una corteza dura que se adhiera a superficies. En cuanto a los inhibidores de la corrosión se pueden utilizar cromatos, pero en cantidades más pequeñas porque no hay arrastre.

3.3 USO DEL AGUA DE DESECHO COMO SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

PARA ADAPTAR LAS CORRIENTES DE AGUA SUCIA COMO COMPONENTE DE TORRES DE ENFRIAMIENTO LO QUE SE REQUIERE ES UNA INVESTIGACION EN PROFUNDIDAD Y LA APLICACION DE UNA BUENA TECNOLOGIA DE TRATAMIENTO DE AGUAS.

Los contaminantes son el factor importante en la determinación la conveniencia del uso del agua para torres de enfriamiento.

El microorganismo en el afluente de una torre de enfriamiento, por ejemplo, quitaría 90% o más de los fenoles y reduciría el carbono orgánico, pero esta habilidad mengua con el aumento de la cantidad de sulfuro, porque el sulfuro al da muerte al microorganismo oxidador del fenol [3.3.1]. También, el sulfuro de hidrógeno es corrosivo para el equipo de enfriamiento del agua, reduce los inhibidores de cromato a lodo de óxido de cromo ineficaz, y causa mal olor. Por eso, cuando los niveles de sulfuro exceden 2 ppm en el agua de desecho, se debe desviar el agua del sistema de enfriamiento.

El primer paso para evaluar una corriente de desecho para enfriamiento es un análisis completo de esa corriente. Si la corriente pasa el análisis de prueba, **el próximo paso es usualmente un estudio de la viabilidad;** a través de varias pruebas se determina el potencial de la corriente para la corrosión, como: la obstrucción general, la formación de la incrustación, la obstrucción biológica y la espuma, y qué tratamientos se necesitarían para controlar tales problemas. Obviamente, la naturaleza de la contaminación es ocasionada por la planta de proceso que genera el agua de desecho.

Se deben extender los análisis por periodos tan largos como sea posible. Esto definirá la composición del afluente, y al mismo tiempo proveerá información útil hacia la planificación de un tratamiento adicional. Si se considera el agua reusada parte de una planta, el costo de mejor calidad del agua se compara al ahorro que proporcionan los costos de intercambiadores de calor u otro equipo.

En algunos casos el aumento de ciclos significa la adición de un sistema de tratamiento externo, tal como la cal ablanda **para quitar el fosfato y reducir la dureza.** En casos como el aumento de ciclos se exige la aplicación de un método de tratamiento de agua interior apropiado como las biocidas, los agentes de control de la deposición, los antiespumantes e incluso el arrastre y control del pH.

Las variables inherentes en el agua, las condiciones de operación de la planta, la presencia de metales, y el ambiente de la torre de enfriamiento, se combinan para hacer imposible la generalización extensiva. Ejemplos de corrientes de desecho usadas como abastecedoras de una torre de enfriamiento son: afluente del alcantarillado doméstico, afluente de la planta de un fertilizante nitrogenado, el arrastre de la caldera y proceso de condensado, una planta de afluentes químicos, los fondos del removedor de una refinería de agua ácida, y sistemas de afluentes de disolución del aire que flota.

Se puede mejorar el agua desechada llevando al máximo el número de ciclos de la torre de enfriamiento.

De aproximadamente 20-25 millones de gal/d de agua de río que una empresa usa en la refinería, 15-20 millones se descargan como afluentes.

Los flujos del proceso que tienen bajo nivel de compuestos orgánicos se tratan con una destilación adicional o etapas de evaporación antes de reciclarlos.

Un sistema de agua de desecho concentrada tiene doble eficiencia comparada con los sistemas de la evaporación normales y cuatro veces el coeficiente de evaporación normal.

En una prueba, el sistema de reducción de volumen (de más de 90%) del arrastre de la torre de enfriamiento produjo agua destilada con 3-5-ppm en volumen de los sólidos.

En el sistema llamado "evaporador vertical de tubo vertical con espuma," los surfactantes (usualmente compuestos de parafina sulfatada) son agregados a la corriente de alimentación, que se deja caer externamente a los tubos calentados. Los surfactantes forman una capa espumante en las paredes internas, incrementando el coeficiente de evaporación. (Fig. 3.3.1)

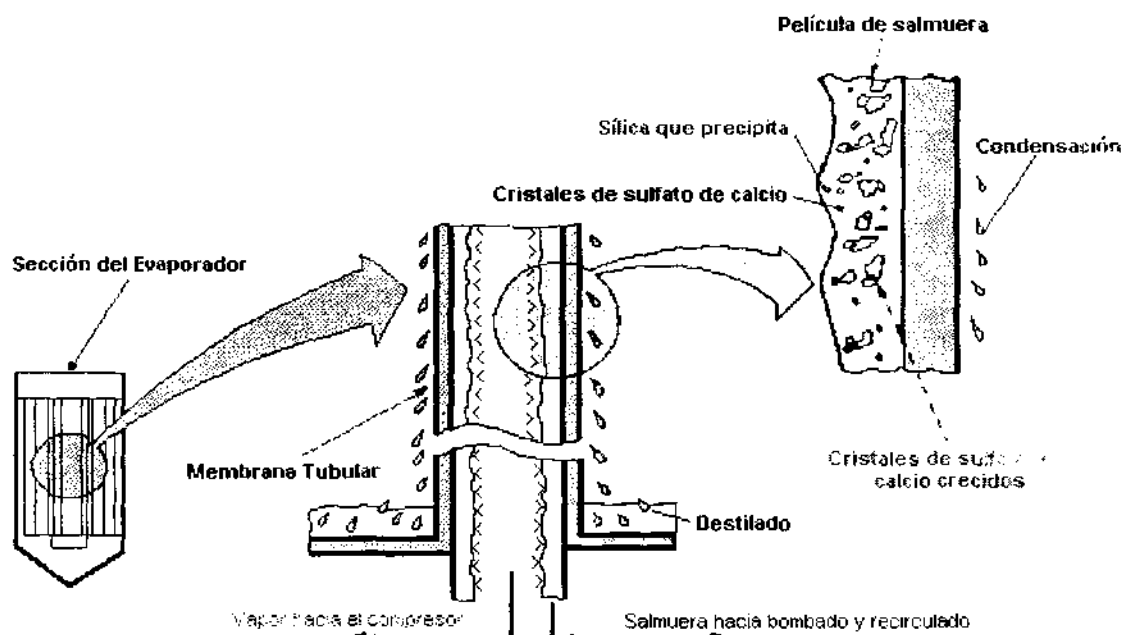


Fig. 3.3.1 Unidad de tubo vertical.

Aproximadamente se aumentan de 5-30 ppm de surfactante en el evaporador. El exceso del surfactante puede ser recuperado por el aire esparcido en el arrastre. En la operación unitaria de 50,000 gal/d a varias temperaturas por arriba de 220°F, el agua de desecho de una turbina de vapor. Este arreglo aumentó la energía eficiente incrementando el calor liberado. [3.3.2]

Una torre de enfriamiento binaria puede operar como una torre de enfriamiento binaria emplea el agua desechada para aumentar el enfriamiento en días calientes. El agua de enfriamiento es recirculada en ciclo cerrado a la torre, donde se enfría con un intercambiador de calor. A causa de la escasez del agua, el uso del afluente del alcantarillado ha ganado aceptación para usarlos en torres de enfriamiento y otros procesos varios. Los efluentes pueden ser empleados.

3.3.1 AFLUENTE DEL AGUA DE DESECHOS DOMÉSTICOS

Entre las corrientes del agua de desecho, los afluentes de aguas sucias proveen volúmenes grandes de agua que sirven como una sola fuente para abastecer una torre de enfriamiento. Tal reuso ofrece dos beneficios: ecológico y un costo muy reducido, comparado con el agua fría.

La calidad de un tratamiento requerido por aguas sucias varía dependiendo del porcentaje industrial de desperdicio, del porcentaje de desperdicio doméstico.

La corrosión es menor en el afluente de aguas sucias que en el de agua fría. Aunque tal afluente contiene altas concentraciones de ortofosfato, se inhibe su tendencia por la incrustación del fosfato de calcio y por el efecto de estabilización de la materia orgánica que está también presente a altas concentraciones. Así, el control apropiado de ciclos de concentración y del pH, con la adición de agentes de control de depósito, usualmente permite cargas de fosfato de calcio más altas que las que se llevan en los sistemas de agua fría.

El agua sucia presenta un problema severo de obstrucción microbiológica cuando se usa como componente de la torre de enfriamiento. Se puede controlar éste, pero se incrementan los costos por el uso del biocida. Un programa combinado de cloro y de biocida no-oxidante es típico para mantener un buen control.

Se representa en la Tabla 3.3.1 un análisis representativo de un afluente de aguas sucias secundario. Un repaso del análisis indica una fluctuación por: obstrucción biológica (indicado por el nivel BOD), deposición del fosfato de calcio (indicado por el calcio y concentraciones de ortofosfato), y espuma (indicado por los sólidos suspendidos y concentraciones MBAS).

Análisis de agua de desecho, agua fría, grado 95	
Dureza total como CaCO_3 , ppm	192
Calcio como CaCO_3 , ppm	128
M-Alcalinidad como CaCO_3 , ppm	210
Bílica como SiO_2 , ppm	22
Ortostatos como PO_4 , ppm	8
pH	7.3
Cloro como Cl, ppm	172
Sulfato como SO_4 , ppm	160
Conductancia específica, micro-ohms a 18°	900
Amonio como N, ppm	10
Hierro como Fe, ppm	0.5
Zinc como Zn, ppm	0.2
Cobre como Cu, ppm	0.04
Sólidos suspendidos, ppm	8
BOD, mg/l	15
COD, mg/l	40
Níquel como Ni, ppm	0.18
Turbidez	5
Nitratos como N, ppm	0.3
Nitritos como N, ppm	3.1
Cloroformo extractable	2

Se presenta una evaluación de laboratorio del afluente de agua sucia en la Tabla 3.3.2. Éste indica una necesidad para el control de corrosión con un programa cromato/zinc/fosfonato/polímero. Los problemas de la dureza contenida en la espuma en la mayoría de los sistemas se pueden controlar con una cantidad pequeña de antiespumante. Los datos en Tabla 3.3.3 apoyan éstos resultados.

Análisis del ciclo del agua	
Calcio (CaCO_3)	615 ppm
Magnesio (CaCO_3)	240 ppm
pH	7.2
Cromatos (CrO_4)	13.5 ppm
Cloro	920 ppm
Ortofosfatos	20 ppm
Tratamiento	
Cromato-zinc-ortofosfato-polímero	
Datos de corrosión	
No pretratada y pretratada	
Alto acero al carbón	1
No pretratada y pretratada	
Bajo acero al carbón	1
Acero inoxidable 304	0
Alto acero al carbón	1

Afluentes secundarios y biocida		
Programa Cromato-zinc-ortofosfato-polímero-biocida		
Antiespumantes	Nivel de Antiespumantes ppm	Espesor de la espuma (mm)
Nada	0	175
A	1	0
B	1	0
C	1	0
D	1	55
D	5	15
D	7	0
Programa Fosfato-fosfonado-polímero-orgánico-biocida		
Antiespumantes	Nivel de Antiespumantes ppm	Espesor de la espuma (mm)
Nada	0	175
A	1	0
B	1	0
C	1	0
D	1	0

3.3.2 REUSO DEL AFLUENTE EN UNA PLANTA DE FERTILIZANTE

Muchas plantas tienen corrientes de desecho tratadas para mejorar la calidad de la descarga subsecuente- pero ¿porqué tirar estas aguas tratadas lejos?. En las plantas de fertilizantes, las aguas del proceso contaminadas con un alto nivel de amoníaco y nitrato se tratan por intercambio iónico para reducir este tipo de contaminación. Se presenta un análisis de la muestra en la Tabla 3.3.4.

Dureza Total como CaCO_3 , ppm	2
M-Alcalinidad como CaCO_3 , ppm	60
Sulfato como SO_4 , ppm	10
Cloruros como Cl, ppm	5
Sílica como SiO_2 , ppm	18
Total de fosfatos como PO_4 , ppm	0.5
Ortofosfatos como PO_4 , ppm	0.5
pH	7
Conductancia específica, micro-ohms a 18°	200
Nitratos como NO_3 , ppm	80
Amonio como N, ppm	20

No hay ninguna razón para desechar esta agua; **se puede usar como abastecimiento de la torre de enfriamiento**. Dependiendo de la planta, esta cantidad de agua sería sólo aproximadamente 30% de la composición de la vertiente; por otra parte, el porcentaje dependería de la calidad del agua tratada. Los nutrientes en forma de amoníaco, nitrato y urea presentan un potencial substancial para el crecimiento microbiológico, requiriendo una supervisión más cerrada de la obstrucción biológica, y un programa más intenso para minimizar el programa para disminución de las erupciones del limo.

3.3.3 REUSO DEL AFLUENTE DE UN HERVIDOR Y DEL PROCESO DE CONDENSADO

La Tabla 3.3.5 presenta las características de la corriente de **un hervidor de arrastre que se adiciona a la torre de enfriamiento de una planta de amoníaco**, el agua circula a 45,000 gpm.

M-Alcalinidad como CaCO_3 , ppm	32
Sílica como SiO_2 , ppm	0.1
pH	9.7
Hierro como Fe, ppm	0.05
Sodio como Na, ppm	17.5
Conductancia específica, micro-ohms a 18°	80
Fosfato como PO_4 , ppm	15

Se usa agua des-ionizada para la composición del hervidor, con un programa coordinado de fosfato/tratamiento del pH. La preocupación mayor es la concentración de fosfato, a causa de su potencial por la deposición de dicho fosfato. Se diluye en el arrastre al 1% como abastecimiento a la torre de enfriamiento. Las corrientes de condensado son candidatas primarias para agua de reuso. Las sales minerales no están presentes para crear problemas, como se muestra en la Tabla 3.3.6.

	Planta del Golfo	Planta de Alaska
Amoníaco como N, ppm	350	824
Dióxido de Carbono como CO ₂ , ppm	360	2,200
pH	6.7	7.1
Conductancia específica, micro-ohms a 18°	1,600	5,000
Hierro como Fe, ppm	0	0.7

Las concentraciones de amoníaco y dióxido de carbono en este condensado proveen nutrientes para el crecimiento biológico y crean un aumento en el biocida. Además, la concentración del amoníaco presentaría una corrosión potencial para aleaciones del cobre. El aumento del requerimiento del biocida eleva los costos aproximadamente de 25-75% por encima del costo del agua fría, pero la obstrucción microbiológica se puede controlar.

3.3.4 REUSO DE AFLUENTES QUIMICOS

La posibilidad de reusar una corriente de agua en particular no puede ser fácil de establecer, al igual que el trabajo en el laboratorio. La Tabla 3.3.7 presenta un análisis de una corriente de desecho de una planta que tiene buena calidad mineral pero que tiene alto en contenido aromático.

	ppm
Dureza total como CaCO ₃ , ppm	32
Calcio como CaCO ₃ , ppm	24
Magnesio como CaCO ₃ , ppm	8
M-Alcalinidad como CaCO ₃ , ppm	24
Sulfato como SO ₄ , ppm	3
Cloro como Cl, ppm	8
Silica como SiO ₂ , ppm	3
Total de fosfatos como PO ₄ , ppm	0.4
Ortofosfatos como PO ₄ , ppm	0.2
pH	7.2
Conductancia específica, micro-ohms a 18°	80
Cobre como Cu, ppm	0.05
Hierro como Fe, ppm	0.05
COD, mg/l	450
BOD, mg/l	150
TOD, mg/l	135
Aromáticos, ppm	125
Total de hidrocarburos, ppm	200

Mucha de la contaminación aromática es volatilizada encima de la torre de enfriamiento. Un estudio de laboratorio, usando agua de desecho ciclada a tres y seis tiempos confirmados, indicó que un tratamiento de cromo proveería la protección a la corrosión satisfactoriamente. Estos resultados son ilustrados en la Tabla 3.3.8.

Ciclos	Aceró dulce (mpy)	Cobre (mpy)	Admiralty (mpy)	304 SS (mpy)
3	0.5	0.4	0.4	0
6	0.8	0.4	0.5	0

Esas pruebas de laboratorio también indicaron problemas de un depósito de tipo gomoso, y se requirieron más estudios y pruebas de la torre para establecer que su presencia no traería serios problemas.

La Tabla 3.3.9 presenta los resultados de otro estudio en una planta que contuvo cantidades significantes de admiralty en la tubería.

Tratamiento	Corrosión, ppm	
	Aceró	Admiralty
Cromo-Fosfato-Zn (pH 6.5)	1	5
Fosfato-Fosfonato (pH 7.5)	17	10
Análisis del Ciclo de Agua		
Calcio como CaCO_3 , ppm	480	
Magnesio como CaCO_3 , ppm	430	
Silica como SiO_2 , ppm	130	
Cloro como Cl, ppm	135	
Sulfato como SO_4 , ppm	20	
Carbono, ppm	150	

La proporción de corrosión indicó a través de este estudio que era prohibitivamente alto, debido al volumen orgánico del agua, ácido fórmico principalmente. Estudios adicionales indicaron que una porción de los orgánicos son volatilizados encima de la torre de enfriamiento.

El próximo paso fue experimentar reusando el agua en la torre de enfriamiento, comenzando con un bajo porcentaje de composición, y aumentando hacia el porcentaje final deseado, con constante supervisión de la corrosión y la obstrucción. La corrosividad predicha del agua no se materializó, y el agua fue reusada en su integridad, en cantidades de 10-20% en el afluente de la torre de enfriamiento.

La Tabla 3.3.10 presenta el análisis del afluente de un estanque de bio-oxidación. Los rasgos significantes de este análisis incluyen alta alcalinidad, alta demanda química de oxígeno y alto nivel fosfatos. Después se agregó el ácido fosfórico como un nutriente a los tanques de lodos activados.

Amonio como N, ppm	10
Dureza total como CaCO_3 , ppm	212
Calcio como CaCO_3 , ppm	160
Magnesio como CaCO_3 , ppm	52
M-Alcalinidad como CaCO_3 , ppm	1540
Sulfato como SO_4 , ppm	112
Cloro como Cl, ppm	152
Silica como SiO_2 , ppm	17
Total de fosfatos como PO_4 , ppm	29
Ortófostatos como PO_4 , ppm	28
pH	8.2
Cobre como Cu, ppm	0.03
Hierro como Fe, ppm	0.05
Sólidos suspendidos, ppm	18
COD, mg/l	306
Demanda de cloro, ppm	108
BOD, mg/l	17
Trietilamina, ppm	1
Sodio (Na), ppm	790
Cromo (Cr), ppm	0

Los inhibidores de Cromatos proveen la mejor protección contra la corrosión. La comprobación preliminar indicó en este caso que el agua tenía una demanda de cromatos alta. Se requiere definir la corrosión en estudios adicionales, la obstrucción y el potencial de crecimiento biológico para el sistema. Estos estudios incluyen evaluaciones del laboratorio y una aproximación gradual al uso de esta agua en el sistema real para el incremento de la proporción en el agua reusada, con una constante supervisión.

3.3.5 REUSO DEL AGUA ACIDA REMOCIONADA DE LOS FONDOS [3.3.3]

Las refinерías normalmente usan un removedor de agua ácida para quitar los gases disueltos de las aguas del proceso. Estos removedores quitan el 99% de los sulfuros, 80-95% del amoníaco, y 30-60% del fenol. Salvo el fenol y los contaminantes del amoníaco, con sus contribuciones resultantes para COD, BPD y TOC, se destilan esencialmente del agua de los fondos de estas torres. Se muestra en la Tabla 3.3.11 un análisis para seis de tales fondos.

Esta agua de desecho es normalmente reusada para conservar el agua fría y quitar por arriba del 98% del fenol del afluente de la refinería. **Las aplicaciones alternativas para el reuso son:** *desalación del aceite crudo, lavar el agua del proceso, y abastecer la torre de enfriamiento. La torre de enfriamiento provee una bio-oxidación efectiva del fenol, pero se obstruye por la presencia de sulfuros, la eficiencia de los sulfuros, amoníaco y fenol se elimina con el removedor.*

Esta agua debe desviarse del sistema de enfriamiento cuando el nivel de sulfuros excede 2 ppm. También, el amoníaco tiene tres efectos importantes: fluctuación a causa del cambio de pH, es bastante corrosivo para el cobre y aleaciones del cobre y es un nutriente para la obstrucción de organismos.

	1	2	3	4	5	6
Demanda de cloro, ppm				400		
Amonio como N, ppm	26	30	30	12	50	50
BOD, ppm			288	121		
COD, ppm			387	203		
Dureza total como CaCO_3 , ppm	14	1.2	92	5	6	2
Calcio como CaCO_3 , ppm	12	0.8	32	5	2	2
Magnesio como CaCO_3 , ppm	2	0.4	60	0	0	0
Fenoltaleína como CaCO_3 , ppm	0	0	16	51	0	42
Naranja de metilo como CaCO_3 , ppm	68	140	68	100	46	94
Sulfato como SO_4 , ppm	13	37	125		32	34
Cloro como Cl, ppm	38	1.5	260	26	142	93
Silica como SiO_2 , ppm	<2.0	1.3	4.4			
Total de fosfatos como PO_4 , ppm	3	0.4	2.1			
T. de fosfatos inorgánicos como PO_4 , ppm		0.2	0.5			
Ortofostatos como PO_4 , ppm		0.1	0.5	0.06		
pH	6.8	7.7	8.7	9.6	6.8	9
Conductancia específica, micro-ohms a 18°	250	500	1,200	280		425
Total carbon, ppm			130			
Carbon inorgánico, ppm			11			
Carbon orgánico, ppm			119	32		
Cloroformo, ppm	13		71			
Fenol, ppm	110,000	33,000	79,800	50,000		
Total Cobre como Cu, ppm	0.05	0.02	0.12		0.1	
Total Hierro como Fe, ppm	1.8	0.6	0.5		9.4	32
Zinc soluble como Zn, ppm	0	0	0		0	
Nitritos como NO_2 , ppm	0	253	276			
Nitatos como NO_3 , ppm	<1	<1	<1			
H_2S , ppm	0.01	0.1	0.1	0.1	0	0.6
Sólidos suspendidos, ppm	28			6		

La obstrucción microbiológica ocurre como un resultado de la bio-oxidación de fenoles, las biocidas son necesarias para prevenir el crecimiento masivo de limo. Se debe controlar cualquier programa de biocida de la torre cuidadosamente, de modo que el alcance de la bio-oxidación para el fenol sea el apropiado. Se puede inyectar intermitentemente cloro para prevenir el crecimiento del limo pero esto sólo puede dar resultados en fenoles clorados y cloroaminas. Por consiguiente, la no-oxidación de las biocidas se prefiere por encima de la del cloro para prevenir la formación de compuestos tóxicos.

3.3.6 DISOLUCIÓN DEL AIRE QUE FLOTA EN EL AFLUENTE

La unidad de disolución del aire que flota (DAF), que normalmente sigue a un separador API, sirve principalmente para quitar las grasas y los sólidos suspendidos. Esta unidad quita del 50-90% de estos contaminantes, pero esa remoción puede mejorarse con concentraciones bajas de polielectrolitos.

En la torre de enfriamiento se remueve el fenol y se reducirá la demanda de oxígeno del afluente DAF; en este afluente es usual un volumen grande de agua. **La desventaja mayor de este uso es la obstrucción.** El aceite que queda en el agua tiende a aglomerar otros sólidos en masas que restringen el flujo y retardan la transferencia de calor. Éste puede ser minimizado por detectores de aceite para desviar esta agua durante condiciones por encima de las establecidas. Los agentes de control de la deposición y los agente de humectación deben ser continuamente usados en el agua de enfriamiento.

En el caso del sistema que se muestra en la Fig. 3.3.2, **el arrastre de la torre de enfriamiento también va a la unidad DAF**, para que una cantidad correspondiente de DAF se desvíe del afluente lejos de la torre. Se deben controlar las torres, limitando los niveles de dureza, sólidos disueltos, sólidos suspendidos, y aceite, **para minimizar la obstrucción y la corrosión.**

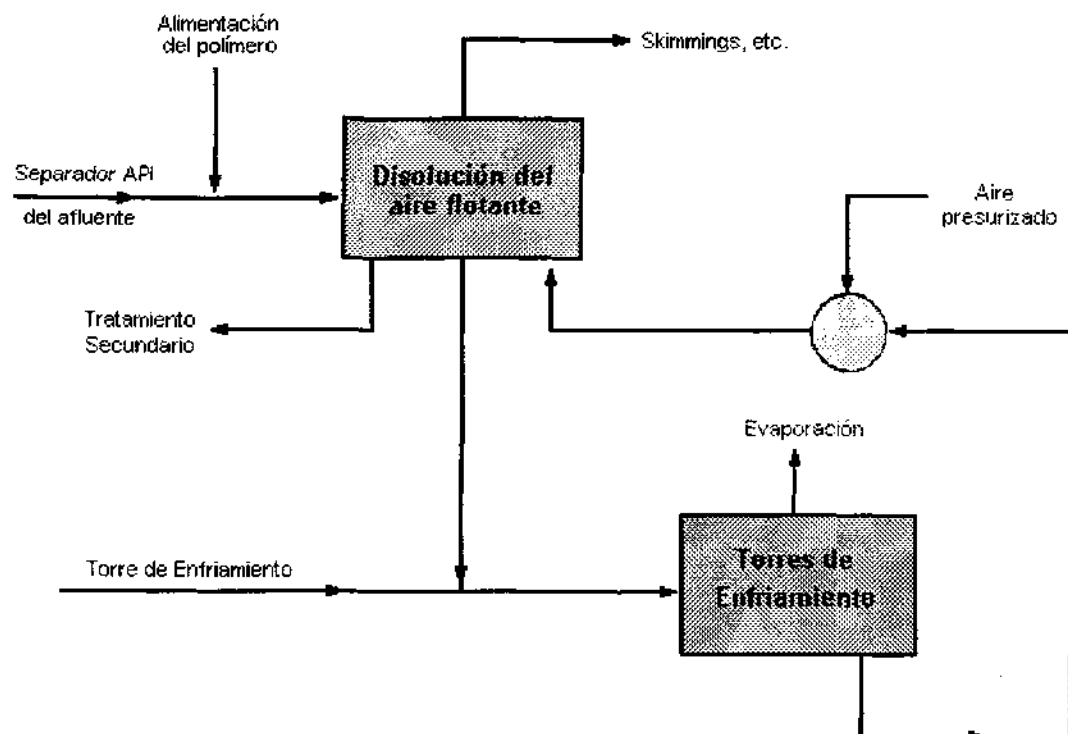


Fig. 3.3.2 Reuso del afluente en torres de enfriamiento.

Con la proporción más apropiada, más plantas hallarán el uso de corrientes de agua de desecho para el abastecimiento de la torre, obteniendo resultados muy satisfactorios.

3.3.7 PREVENCIÓN DE LA OBSTRUCCIÓN

El agua se puede reciclar si hay una construcción química, usada para un tratamiento como suplente para el control del cloro que ocasiona obstrucción, tiene la ventaja de que no genera ningún otro producto, pero es caro. De cualquier modo, U.S. Ozonair S.A. (San Francisco, Calif. Sur) comercializa un sistema que dice disminuye los costos de 30-40% menos que el tratamiento de cloro.

La unidad Ozonair es menos costosa que la generación de ozono convencional, a la usual frecuencia baja (60 Hz) y voltajes altos (16,000-19,000 V), usa electrodos de dióxido de titanio que tienen frecuencias altas (aproximadamente 10,000 Hz) y voltajes bajos (6,000 V). Las condiciones indican que se genera menos calor (el ozono es destruido por el calor alto), así las necesidades del equipo de enfriamiento son menores. Se requieren sólo 4.2 kW/h para producir 1 lb de ozono.

La restitución económica para una instalación de agua de enfriamiento puede tener cierto alcance, de sólo tres meses a un año y medio. Se ha consumido ozono con buen éxito para el control de la bio-obstrucción. Se estima cerca de 0.4-0.6 mg/L en el agua reciclada.

Los ferratos también se usan para controlar la bio-obstrucción. Varias clases de ferratos se emplean, una de ellas es el ferrato de potasio (K_2FeO_4), que se obtiene por cloración de una solución férrica en una base fuerte.

Los Ferratos son oxidantes poderosos, inestables, lo cual es un beneficio porque no producen residuos de larga duración. Se descomponen en hierro férrico y liberan la energía para la oxidación orgánica, pero la forma férrica es también un coagulante que puede co-precipitar metales pesados o fosfatos que se usen para el control de la incrustación.

El tratamiento magnético del agua, para prevención de la incrustación, es un proceso que no agrega cualquier cosa al agua. Se insertan magnetos permanentes en una sección de la corriente superior de la cañería de un intercambiador de calor (según estudios de Kenneth Bush, del . de Química en la Universidad de Baylor, Waco, Tex.). Esto es para inhibir la incrustación; los minerales se precipitan, pero quedan en suspensión y se remueven o se eliminan después.

3.4 TRATAMIENTO DEL AGUA

3.4.1 MANERA FÁCIL DE AGREGAR ÁCIDO AL AGUA DE ABASTECIMIENTO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO

La torre de enfriamiento opera frecuentemente acidulando el agua con ácido sulfúrico, para reducir la alcalinidad del calcio, o dureza temporal, controlando así la formación de la incrustación en el agua reciclada y aumentando la concentración.

La dosificación del ácido sulfúrico necesita ajustarse para compensar los cambios en la razón de flujo. En lugares donde el afluente tiene una dureza alta, queda casi constante. En lugares donde se utiliza agua de un lago o de un río, cambia sólo gradualmente, semana con semana o mes con mes. Así muchos cambios en la dosificación se explican por las variaciones en la proporción de flujo. Usualmente éstos cambios se hacen manualmente a través de bombas dosificadoras.

El sistema mostrado en la Fig. 3.4.1, permite el ajuste de la dosificación con un mínimo control manual, y elimina la necesidad de las bombas dosificadoras. Además dosifica el agua de la torre de enfriamiento.

La permanente caída de presión por un orificio en la línea de agua permite el control manual y el control automático del sistema. Esta caída de presión es proporcional al flujo de agua, se ajusta la dosificación del ácido automáticamente con los cambios en la razón del flujo de agua.

También, el sistema emplea la fluctuación de agua fresca para quedar separado en una fase menos densa sobre una capa de solución de 20-30% de H_2SO_4 , entonces la corriente lateral de agua entra por la cima de un tanque que desplaza fuera el flujo ácido llevándolo hacia el fondo para juntarlo con la corriente principal.

El desplazamiento es muy uniforme y ocurre como la acción de un pistón. Se han probado dosificadores proporcionales con diafragmas plegables en los tanques ácidos en

sistemas similares, pero las variaciones en la tensión a través del diafragma alteraron la respuesta proporcional al flujo del agua.

Se usan dos tanques ácidos alternándolos. Mientras se llena un tanque con ácido, el otro está online; el agua de la corriente lateral fluye a través de un rotámetro y una válvula B (ver ilustración Fig. 3.4.1) hacia un distribuidor en la cima del tanque para establecer gradualmente en dicha cima la salida del flujo ácido (a través de la válvula C) hacia la corriente principal. Entretanto, el ácido sulfúrico que ha sido prediluido por lo menos a 40-45%, se adiciona al tanque apartado de la línea, donde se diluye todavía más de 20-30%, para evitar problemas de generación de calor en una dilución más amplia.

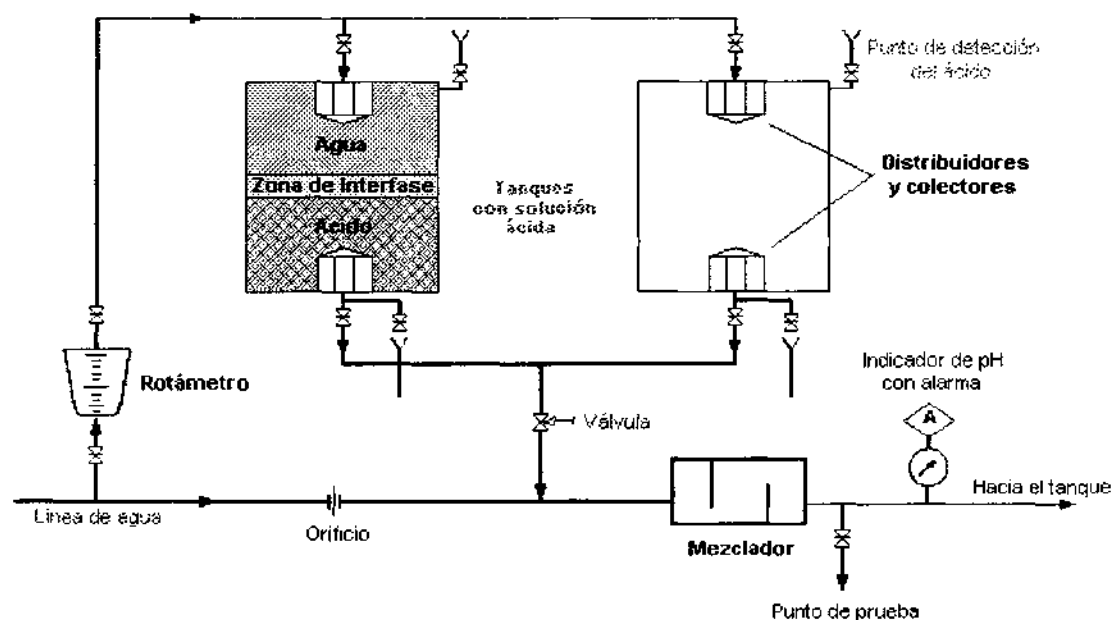


Fig. 3.4.1 Adición de ácido al agua.

Se mezcla el ácido del tanque con la corriente principal del agua en una cámara de mezclado; la composición acidulada del agua fluye entonces por un indicador del pH con una alarma. Cuando todo el ácido en un tanque ha sido reemplazado por agua, el pH se eleva; la alarma suena; y un tanque de ácido fresco se vierte sobre la corriente. [3.4.1].

3.4.2 CÁLCULO RÁPIDO DEL ARRASTRE Y CAUDAL DE ABASTECIMIENTO PARA DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO

El arrastre de la torre de enfriamiento es importante para los balances, para el control de la incrustación en el equipo de enfriamiento, y para el funcionamiento de torres de enfriamiento. Además, la aproximación usada para el cálculo se puede aplicar a una variedad de procesos funcionales donde se remueve un componente puro (por reacción, separación física, etc.) de una corriente reciclada y se reemplaza por una corriente de alimentación que

contiene impurezas. En cada caso un arrastre o un sangrado se usa para eliminar impurezas, que pueden llegar a concentrarse en la corriente recirculada.

Cuando el sistema está en equilibrio el caudal de circulación debe igualar las pérdidas, así para torres de enfriamiento:

$$M = E + B + W \quad (3.4.1)$$

donde:

M : caudal, % de circulación

E : pérdida en la evaporación, % de circulación

B : arrastre, % de circulación

W : pérdida de venteo y pérdida por goteo, % de circulación

La evaporación del agua estará libre esencialmente de sólidos disueltos, introducidos en la composición del agua se deben remover por pérdidas en el venteo más las del arrastre, o:

$$Mp_m = (B + W) p_c \quad (3.4.2)$$

donde:

p_m : concentración en la composición, ppm.

p_c : concentración en el agua circulante, ppm.

Para torres de enfriamiento la concentración en el agua reciclada es arbitrariamente definida como ciclos de concentración, **C**, como:

$$C = \frac{\text{concentración en el agua de enfriamiento}}{\text{concentración en la composición del agua}}$$

entonces:

$$M = (B + W) p_c / p_m = (B + W) C \quad (3.4.3)$$

La experiencia ha mostrado que las pérdidas del venteo tienen cierto alcance: 1.0-5.0% para estanques de rociado, 0.3-1.0% para torres de enfriamiento atmosféricas, y 0.1% se puede asumir para torres modernas de tiro forzado. También, un balance de calor más experimentado muestra que las pérdidas de la evaporación son 0.85-1.25% de la circulación por cada 10°F de caída de temperatura a través de la torre, y que la pérdida de evaporación de 1.0% por cada caída en 10°F puede asumirse para la mayoría de los cálculos, entonces: $E = \Delta T / 10$. Así:

$$M = \Delta T / 10 + B + 0.1 \quad (3.4.4)$$

Combinando Ec. (3.4.3) y (3.4.4):

$$\Delta T / 10 + B + 0.1 = (B + 0.1) C$$

$$\Delta T / 10 - 0.1 (C - 1) = B (C - 1)$$

Luego Entonces:

$$B = \frac{\Delta T}{10 (C - 1)} \quad (3.4.5)$$

La monografía permite una rápida solución simultánea de las ecuaciones (3.4.1) y (3.4.5). Por ejemplo: una torre de enfriamiento maneja 1,000 gpm de agua en circulación, que se enfría de 110°F a 80°F. ¿Qué arrastre y qué composición se requiere si la concentración de sólidos disueltos se permite agrandar para alcanzar 3 veces la composición? En el monograma se puede ajustar $C=3$ con $\Delta T=30$, y se lee $b=1.4\%$ o 14 gpm, y $M=45\%$ o 45gpm.

Por analogía, este tipo de monograma se puede adaptar para calcular el sangrado de la síntesis del ciclo de la planta de amoníaco. En ese caso M sería la composición de la síntesis del gas como % del gas reciclado, $E + W$ la conversión por paso, B el sangrado del gas reciclado, p_m y p_c la concentración de metano en el reciclado y la composición de los gases, respectivamente, y C la proporción de metano en el gas reciclado en la composición del gas.

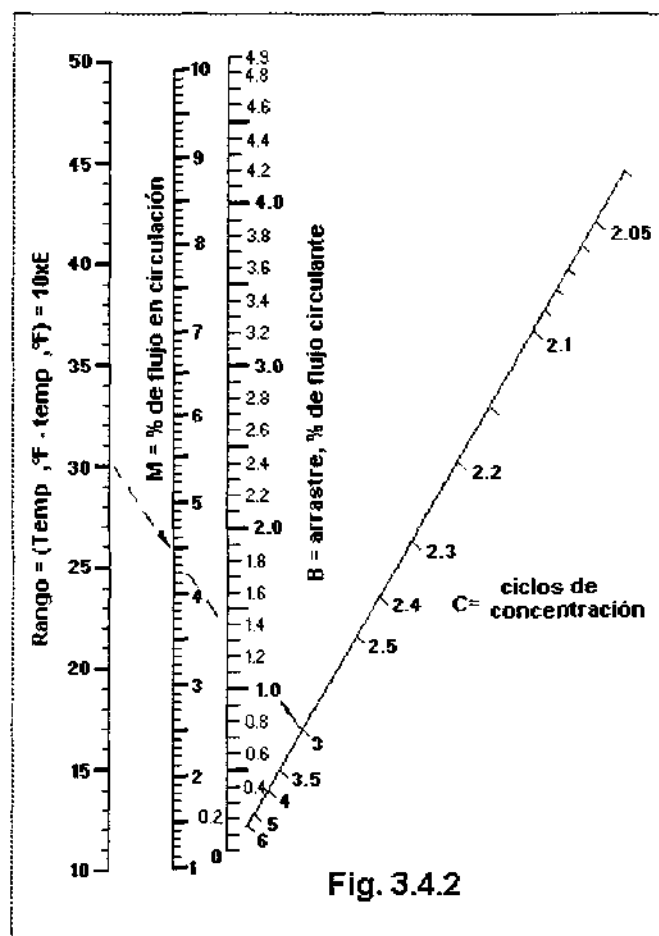


Fig. 3.4.2

Cuando el ascenso de la evaporación y las pérdidas del venteo son transpuestas para la conversión por paso, y cuando los rangos de las diferentes líneas se extienden, el monograma se puede ajustar de acuerdo con dichos rangos. [3.4.2]

Referencias Bibliográficas

- 3.1.1 *Chem. Eng.* Diciembre 26, 1986, p 18-20.
- 3.1.2 Guffey, C.G., New Systems Save Gas Plant Energy, Oil and Gas J., Agosto 3, 1981.
- 3.1.3 O'Brien, N. G., Reducing Column Steam Consumption, *Chem. Eng. Prog.*, 72, Julio 1976.
- 3.1.4 Beesley, A. H., and Rhinesmith, R. D., Energy Conservation by Vapor Compression Evaporation, *Chem Eng. Prog.*, 76, Agosto 1980, Le Martret, J.P., Desalination Through the Vapor Compression Process, Desalination, 19, 1976, pp. 337-348, Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, Stickney, W. y Fosberg, T.M., Treating Chemical Wastes by Evaporation, *Chem. Eng. Prog.* 72, Abril, 1976.
- 3.1.5 Holiday, A.D., System nitrogen in plant effluents streams, *Chem. Eng.* Agosto 14, 1978.
- 3.1.6 Kern, D.Q., "Procesos de Transferencia de Calor", McGraw-Hill, 1980.
- 3.1.7 Kaup, Edgar C., Design factors in reverse osmosis, *Chem. Eng.*, Abril 3, 1973.
- 3.1.8 Mulligan, T. J. y Fox, R.D., Treatment of industrial wastewaters, *Chem. Eng.*, Oct. 18, 1976.
- 3.1.9 *Chem. Eng.*, Octubre 31, 1983 p. 9.
- 3.1.10 Buckley, John D. Reverse Osmosis: Moving from Theory to Practice, *Consulting Engineer*, 45, Noviembre 1975.
- 3.1.11 Shuckrow, A.J. y la "Concentration Technologies for Hazardous Aqueous Waste Treatment", Prepared for EPA, Contract 68-03-2766, Report No. EPA-600/2-81-019, 1981.
- 3.1.12 Jordan, D.R. Blowdown Concentration by Electrodialysis, *Chem. Eng. Prog.*, 71, Julio 1975.
- 3.1.13 Castorina, E., Current Water Treating Practices in an Ammonia Plant, *Hydrocarbon Proc.*, Septiembre 1978.
- 3.1.14 Wilber, J. R. "Measurement and Characterization of Cooling Tower Drift", Presentado por La División de Transferencia de calor del ASME, Noviembre 17-22, 1974.
- 3.1.15 Martin, A. y Barber, F.R. "Measurement of Precipitation Downwind of Cooling Towers", Atmospheric Environment, 8, 1974, pp. 373-382, Pergamon Press.
- 3.1.16 Landon, R.D. y Houx, J.R., "Plume Abatement and Water Conservation with the Wet-Dry Cooling Tower", American Power Conference, Mayo 8, 1973.
- 3.1.17 Dehne, M.F. Economical Design of Air-Cooled Heat Exchangers, Cooling Towers, a manual by *Chem. Eng. Prog.*, 1972.
- 3.1.18 Brooke, J.M., Zero-Blowdown-Is it Feasible?, *Hydrocarbon Proc.*, Julio 1979.
- 3.1.19 Denman, W. L. Maximum Re-Use of Cooling Water Based on Gypsum Content and Solubility, Industrial and Engineering Chemistry, 53, Octubre 1961.
- 3.1.20 Perry, M. I., y Matson, J.V., Complete Reuse of Cooling Tower Blowdown, Cooling Tower Institute Technical Paper No. 145, Abril 1975.
- 3.1.21 Fowlkes, C., Corrosion Rates to be Expected at Zero Blowdown of Recirculating Water, Materials Performance, Octubre, 1974.
- 3.1.22 Matson, J.V. Harris T.G., III, Zero Discharge of Cooling Water by Sidestream Softening, J. WPCF, 51, Noviembre 1979.
- 3.1.23 Allan D. Holiday "Conserving and Reusing water", *Chemical Engineering*, Abril 19, 1982.
- 3.2.1 Burger, Robert, "Colder Cooling water", *Chemical Engineering*, Marzo 1991
- 3.2.2 Control de microorganismos, *Chem. Eng.*, Oct. 31, 1983, p. 75, y Dic. 13, 1982, p. 103.
- 3.3.1 Maguire, W.F., Reuse Sour Water Stripper Bottoms. *Hyd. Proc.*, Sept., 1975.
- 3.3.2 *Chem. Eng.*, Octubre 3, 1983, p. 18.
- 3.3.3 William L. Harper/Edwin W. James/Maguire F. Williams., Using wastewater as cooling-system makeup water. *Chemical Engineering*, Agosto 30, 1976.
- 3.4.1 *Chem Eng.*, Agosto 2, 1976.
- 3.4.2 F. Kaplan, Pe, Okland, Calif., *Chem Eng.*, Julio 7, 1975.

CAPÍTULO 4

AUMENTO DE LA VIDA DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO

4.1 TRATAMIENTOS FÍSICO-QUÍMICOS MANERA EFECTIVA PARA PROTEGER LA INVERSIÓN Y MAXIMIZAR LA EFICIENCIA

Tratar el agua en torres de enfriamiento industriales es una tarea compleja, impactada por factores tales como la calidad del agua de la corriente de alimentación, condiciones de operación, requisitos de la ejecución, preocupación por la seguridad del obrero y reglamentación satisfactoria. La presencia de la formación de la incrustación, la obstrucción por el total de sólidos disueltos, la corrosión, y la contaminación por bacterias y virus son problemas comunes asociados con los sistemas de agua reciclada.

Las acumulaciones de estos contaminantes impide que el calor interior sea transferido a las superficies y a los tubos del intercambiador de calor, reduciendo la capacidad de transferencia de calor, pueden verse los resultados de tal hecho en las especificaciones de los productos, productividad más baja, pérdidas de energía, fuera de tiempo el sistema de servicio y aumento de los costos de mantenimiento.

Muchos sistemas químicos se usan en la torre de enfriamiento normalmente para reducir la biomasa y para oxidar las moléculas inorgánicas. El precipitado resultante puede quitarse fácilmente del sistema. La filtración, por cedazo, membrana y camas graduadas son métodos no químicos disponibles para la separación de materia coloidal y para la sedimentación de una corriente.

Los métodos de tratamiento alternativos incluyen: inyección del ozono, el uso del bromo como donador químico y gran variedad de biocidas no cromadas.

El bromo y cloro donan sólidos que forman ácidos hipobromosos que se pueden usar además de, o en lugar de, cloro gaseoso, **el soporte del biocida es disponible para la torre de enfriamiento**. Estas alternativas reducirán la presencia de corrosión por productos asociados con el uso de cloro, mientras se minimizan los riesgos a la salud, asociados con el almacenamiento de cloro gaseoso.

El ozono, como una alternativa efectiva del biocida alguicida combate bacterias y virus, reduce la incrustación existente e inhibe su formación subsecuente. Por una excitación eléctrica del aire, se convierte el oxígeno (O_2) fácilmente a ozono (O_3). Como agente oxidante, incluso a temperaturas ambiente, el ozono es 150% más eficiente que el cloro, aunque este produce alteraciones en el medio ambiente.

Según la nueva legislación, cualquier descarga industrial que contenga 10 lb de dicromato de sodio se considera una cantidad reportable; anteriormente, una descarga podía contener hasta 1,000 lb de dicromato de sodio sólo que se tenía que informar a la EPA.

Los filtros mecánicos previenen la formación de lodos; los filtros de carbón activado quitan el cloro libre corrosivo y disuelven los orgánicos que contaminan el agua suministrada y causan espuma; y la ósmosis inversa reduce los sólidos disueltos. Por reemplazo de iones duros (calcio y magnesio) con iones de sodio en una unidad de intercambio iónico de sodio-zeolitas, se puede ablandar el agua para combatir la incrustación.

Además para varios tratamientos químicos y mecánicos destacados a continuación, hay varios productos que se dirigen hacia la necesidad de supervisión automática y control del dosificado para eliminar las fluctuaciones del sistema.

4.2 EQUIPO Y SERVICIOS

A continuación se describen los tratamientos químicos y mecánicos para optimizar el mantenimiento de una torre de enfriamiento.

4.2.1 TRATAMIENTO NO QUÍMICO DEL AGUA PARA TORRES DE ENFRIAMIENTO

Este sistema de circulación se automatiza totalmente, se equipa con generadores de ozono y aparatos de inyección, filtros, bombas y controladores electrónicos. A causa del uso de ozono para neutralizar el pH, baja el total de sólidos disueltos y la conductibilidad, la corrosión de la torre de enfriamiento se puede reducir más de el 50% por encima de los métodos químicos tradicionales.

4.2.2 CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN BIOLÓGICA SIN QUÍMICOS

El oxígeno en el aire se convierte a ozono, que se inyecta entonces en el suministro de agua de la torre de enfriamiento empleando un ciclo cerrado. Se matan las bacterias, los virus y las algas, y la formación de la incrustación mineral es polarizada y separada a lo largo con el sedimento en la vertiente de agua. Con la remoción de materia no deseada a través de una cama multi-media, se preserva el agua de ser contaminada microbiológicamente.

4.2.3 FILTRACIÓN EN LA CORRIENTE LATERAL DE LA TORRE

Un sistema de filtración en la corriente lateral de la torre de enfriamiento reduce los contaminantes. La partículas que lleva el aire más grandes que 10 micrómetros de diámetro se eliminan del afluente. Los minerales solubles, los químicos, las algas y la suciedad acumulada se remueven también por la evaporación del agua en la torre de enfriamiento. Se recomienda para flujos de 33-100 gal/min, con unidades múltiples que se pueden unir a sistemas de más capacidad.

4.2.4 ELECTRODESIONIZACIÓN

La electrodesionización da agua de alta pureza. Estos sistemas de Desionización continua emplean una combinación de resinas de intercambio iónico y membranas, y corriente eléctrica directa. La corriente se usa para el manejo continuo de iones apartados coleccionados en las camas de resina de intercambio iónico. El uso de la electricidad elimina la necesidad de la regeneración de químicos, la cual reduce la corrosión, la polución y el riesgo de la seguridad, preocupación asociada con la regeneración del químico. En la práctica se maneja para flujos de 100 gpm.

El agua desionizada es ideal para usarse en aplicaciones tan críticas como la manufactura de productos de la computadora, farmacéuticas y químicos clínicos, así como en biotecnología y laboratorios de investigación.

4.2.5 MÉTODO DE REMOCIÓN DE METALES EN EL AGUA

Este tratamiento químico es diseñado para aguas de alimentación que contienen hierro o contaminantes de cobre. Con una aleación cobre-hierro y fosfonatos, se forma un complejo insoluble. La partículas resultantes se remueven a través del arrastre. La continua supervisión de las impurezas a la salida y a la entrada de la torre indican la proporción de acumulación o la remoción de la incrustación y la deposición.

4.2.6 DETECCIÓN DEL NIVEL BAJO DE HIDRAZINA

La hidrazina es un agente reductor potente usado para recoger el oxígeno disuelto en el agua. A bajos niveles, la hidrazina actúa como un inhibidor de la corrosión.

La presencia de hidrazina en el agua, a niveles tan bajos como 0-50 partes por billón, se puede detectar con el ULR (rango ultra bajo), un equipo utilizado para este fin es el Chemets, que consta de 30 empaques, ampollas selladas al vacío, cada una conteniendo un reactivo colorimétrico para ejecutar una prueba.

4.2.7 ALGUNOS PRODUCTOS QUÍMICOS QUE INHIBEN LA CORROSIÓN

En la línea de condensado de vapor se presenta corrosión, para eliminar este problema se emplean inhibidores de la corrosión que mantienen una alcalinidad constante en la solución que hierve, en el vapor y en el condensado, son ejemplo de tales: la morfina, la ciclohexamina, y la amina volátil, que resultan de bajo costo. Existen otros inhibidores de corrosión más costosos como la DEEA (Dietiletanolamina) y DMEA (Dimetiletanolamina).

4.2.8 CONTROL DE LA CORROSIÓN Y LA DEPOSICIÓN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO CON FOSFATO

Eso se logra con un premezclado, fosfato básico e inhibidores catiónicos. El uso de esto, como una alternativa para el tratamiento tradicional de metales pesados, reduce el impacto hacia el ambiente.

4.2.9 AUTOMATIZACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS QUÍMICOS POR COMPUTADORA

En el tratamiento de una torre de enfriamiento se puede automatizar el sistema de alimentación, también se puede supervisar el rendimiento de la bomba, haciendo una corrección inmediata a los flujos para evitar las fluctuaciones en el sistema.

Todas las condiciones de operación, incluyendo el proceso de diseño, la proporción de la alimentación y los inventarios pueden ser desplegados mediante gráficas, tablas o resultados.

4.2.10 LA SOLUBILIDAD QUÍMICA MINIMIZA LA FORMACIÓN DE SÓLIDOS

Esto se logra mediante una solución soluble, parcialmente neutralizada por un terpolímero acrilado, que funciona como dispersante. Esta sustancia minimiza la deposición de partículas de materia tales como el óxido de hierro y la hidroxipatita en las superficies del equipo de transferencia de calor.

4.2.11 BIOCIDAS

Para eliminar microorganismos y algas se emplean soluciones de glutaraldehído que contienen 4, 15 o 45% en peso de ingredientes activos, son efectivas controlando el sulfato, reduciendo bacterias y algas, que a menudo son corrosivas y causan enfermedades cuando los sistemas son de agua reciclada.

Químicamente son efectivas estas formulaciones en un amplio rango de pH y de temperatura.

4.2.12 LOS TRAZADORES AYUDAN A CONTROLAR LAS DOSIFICACIONES

Los trazadores pueden ayudar controlando las dosificaciones del tratamiento de la torre de enfriamiento, un trazador (una sal de ácido orgánico fluorescente) se sangra con todos los productos del tratamiento a concentraciones precisas. Entonces, una señal creada por la detección de la excitación óptica se usa para controlar las adiciones del químico en una base real de tiempo.

En estos sistemas una unidad funciona como un supervisor y controlador del producto, y se calibra manualmente, otra incluye una computadora personal y un microprocesador con un equipo de calibración interior. Funcionan sólo como controladores de posición, o se integran totalmente en otro sistema de control.

4.2.13 FILTRACIÓN COMPATIBLE CON EL TRATAMIENTO QUÍMICO DE AGUAS

Esta línea de filtros permanentes es diseñada para remover los contaminantes que vienen en el aire en las torres de enfriamiento. Las partículas tan pequeñas como 10 micrómetros son atrapadas, y a un tiempo predefinido pueden ser sacadas fuera del sistema. Comercialmente existen filtros para proporciones de corrientes de 10-1,000 gpm, y se pueden usar para sistemas de enfriamiento abiertos o cerrados. La filtración no interfiere con la adición de tratamientos químicos al agua.

4.2.14 BIOCIDA CAPTURADO POR CLORO

Para este fin se utiliza un activador cloruro-bromuro, que es una alternativa para controlar el crecimiento de microorganismos y bio-obstrucción en torres de enfriamiento. El uso de esta solución reduce el nivel de tóxicos para los productos asociados con el uso de cloro. Un biodispersante elimina el limo, para maximizar el contacto entre las superficie de intercambio de calor y el tratamiento. Se usa para introducir la solución de sal al principio del sistema, una bomba dosificadora, reduciendo las consideraciones de manipulación especiales normalmente asociadas con químicos cáusticos.

4.2.15 TRATAMIENTO DE AGUAS DE LA PLANTA

Cuando el mantenimiento planeado o los cierres de emergencia reducen sus capacidades del proceso de agua permanente, el Sistema de Tratamiento del flujo de Agua puede ser configurado para purificar con variedad de filtración, desmineralización, ablandamiento y unidades de desoxigenación.

4.2.16 DISTRIBUCIÓN AUTOMÁTICA DE CLORO Y BROMO

El control de la dosificación exacta de cloro o bromo en la torre de enfriamiento de agua, tiene ventajas como: reducir las pruebas manuales y dosificar la cantidad de químicos requeridos para el tratamiento de (0.2 ppm a 250 ppm). Se puede también aumentar el pH o controlar la conductibilidad al sistema. Un destello rojo LED (luz que emite el diodo) indica que el nivel del cloro-bromo está fuera del aceptable, por encima del rango del setpoint deseado, que puede alertar al operador de un posible mal funcionamiento de la bomba o de un químico suministrado derramado.

Referencia Bibliográfica

4.1 "Extending the life of boilers and cooling towers", Chem. Eng., Abril 1990.

CAPÍTULO 5

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO

5.1 EVALUACIÓN ECONÓMICA PARA UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO

El costo anual de la torre está integrado por el monto anual del capital invertido y el costo anual de operación, siendo este último la suma del costo de la energía requerida para hacer circular el aire a través de la torre (costo de la energía del ventilador), el costo del bombeo del agua hasta la parte superior del relleno y el costo del tratamiento químico y biológico del agua que se utiliza en el sistema.

El monto anual del capital invertido se toma como un porcentaje del capital total invertido, e incluye factores de depreciación de los diversos equipos involucrados (son frecuentes los periodos de depreciación de 10 años o menores), seguros, impuestos (este factor es muy variable en los diferentes países), mantenimiento e intereses. para los fines de cálculo, se pueden dividir en dos partes: [5.1]

- (a) aquellas cuyo costo es una función del área de la torre, pero independientemente de la altura del relleno.

(b) Aquellas cuyo costo depende de la altura del relleno.

El grupo

(a) comprenderá las estructuras externas, estanque, ventiladores, motores, distribuidores de líquidos, etc.; y para una torre de sección transversal determinada, su costo será independiente de la razón aire-agua, es decir, permanecerá constante durante el cálculo de la razón óptima aire-agua.

El grupo

(b) comprende sólo el relleno de la torre. Puesto que el relleno, distribuidores, ventiladores, motores y motores de arranque requieren más atención que la estructura externa, estante, etc., la carga de mantenimiento de los primeros será más elevada y esto se traducirá como un monto anual del capital invertido relativamente más elevado.

A continuación se presentan los diferentes costos involucrados y su evaluación usando el programa tutor.

5.1.1 MONTO ANUAL DEL CAPITAL INVERTIDO

Jackson, Smith y Williamson dieron costos unitarios, es decir, costos por metro cuadrado de la sección transversal para los diferentes elementos de una torre de enfriamiento. Estos costos unitarios se han resumido en la Tabla 5.1, junto con los valores adoptados para el problema en estudio. [5.2]

Evaluación Económica				Tabla 5.1		
ELEMENTOS	COSTO UNITARIO			% DEL MONTO DEL CAPITAL INVERTIDO		
	Jackson	Smith y Williamson	Adoptado	Jackson	Smith y Williamson	Adoptado
Estructura, estanque, etc.	43.02	58.05	64.58	15		15
Equipo de instalación e Instalación Eléctrica	1.39	6.46	7.52	15		15
Distribuidores y Soportes	7.21	8.07	8.61	25	20	20
Ventiladores, motores y motores de arranque	14.85	27.42	32.3		20	20
Relleno de rejas e instalación	14.34xZ	15.23xZ	15.45xZ		20	20

Capital Invertido = (Estructura y estanque + equipo de instalación e instalaciones eléctricas + distribuidores y soportes + ventiladores, motores, motores de arranque + relleno de rejas y su instalación x altura del relleno) x área de la sección transversal.

en el programa el relleno de rejas y su instalación multiplicado por la altura del relleno reciben el nombre de:

$$\text{rell} = \text{rell}o * z$$

quedando la proporción del capital invertido como:

$$\text{Capital} = (\text{est} + \text{equi} + \text{dist} + \text{vent} + \text{rell}) \times \text{areatrans}$$

La siguiente proposición calcula el monto anual del capital invertido, en base a la Tabla 5.1 y los porcentajes correspondientes:

$$\text{Monto anual del capital invertido} = (0.15(\text{est} + \text{equi}) + 0.2(\text{dist} + \text{vent} + \text{rell})) \times \text{areatrans}$$

Quedando en el programa como:

$$\text{CCapital} = ((\text{est} * \text{cest}) + (\text{equi} * \text{cequi}) + (\text{dist} * \text{cdist}) + (\text{vent} * \text{cvent}) + (\text{rell} * \text{crell})) * \text{areatrans}$$

5.1.2 COSTO ANUAL DE OPERACIÓN

El costo anual de operación se basa en un año de 350 días de trabajo y un costo de la energía eléctrica de un penique el kWh (kilowatt-hora).

5.1.2.1 COSTO DE LA ENERGÍA DEL VENTILADOR

$$\text{Potencia requerida} = G(\Delta P)/E_v \text{ en Kgm/h}$$

donde:

ΔP es la pérdida de presión a través de la torre en centímetro de agua y

E_v es el rendimiento total del ventilador.

Puesto que un Kgm/h. es igual a 2.72×10^{-6} kWh. La ecuación (5.1.2.1) puede expresarse como:

$$\text{Potencia requerida} = (2.72 \times 10^{-6}) G(\Delta P)/E_v \text{ en kWh} \quad (5.1.2.2)$$

y haciendo

$$\Delta P = \Delta P' \rho_a V_a / 100 \quad (5.1.2.3)$$

y como:

Energía anual consumida por el ventilador = (tiempo de trabajo)(Potencia requerida)

$$\text{Potencia requerida} = (350 \text{ días})(24 \text{ hrs}) 2.72 \times 10^{-6} / 100 (G)(\Delta P') \rho_a (V_a) / E_v$$

expresada en kWh, que llamaremos la ecuación (5.1.2.4)

Puesto que la densidad del agua, ρ_a , es de 1000 Kg/m^3 por la ecuación (5.1.2.4), se convierte en:

$$\text{Energía anual consumida por el ventilador en kWh} = 0.2285 (G) \Delta P' (V_a) / E_v \quad (5.1.2.5)$$

Para fines prácticos la eficiencia total del ventilador se puede considerar como 0.6.

Puesto que el ventilador está situado a la salida del aire, el volumen específico del aire que hay que utilizar en la ecuación (5.1.2.5) se refiere a la parte superior de la torre. Suponiendo que el aire abandona la torre saturado con vapor de agua, su volumen específico puede encontrarse en el diagrama psicrométrico o tomarse de las tablas calculadas.

Habiéndose representado la ecuación (5.1.2.5) por la proposición:

$$\text{Potencia} = (0.2285 * G * \Delta P' * V_{sat} * 3600) / E_v$$

y como:

$$\text{Costo anual de la energía del ventilador} =$$

$$\text{energía anual consumida por el ventilador} \times \text{costo de la energía eléctrica} \quad (5.1.2.6)$$

tenemos que:

$$C_{aevent} = \text{Potencia} * c_{elec}$$

Donde:

G: gasto del aire a través de la torre, Kg/hr.

DP : caída de presión a través de la torre, cm. de agua

E_v: eficiencia del ventilador

Vasat: volumen específico del aire saturado, m³/Kg.

Potencia: energía consumida por el ventilador, Kw-hr.

Caevent: costo anual de la energía del ventilador

celec: costo de la energía eléctrica.

5.1.2.2 COSTO DE BOMBEO DEL AGUA

La potencia requerida por la bomba del agua se calcula con la ecuación (5.1.2.7), en que L representa al caudal del agua, Z es la altura del relleno y E_b representa la eficiencia de la bomba.

$$\text{Potencia requerida} = (L)(Z)/E_b \text{ en Kg/hr} \quad (5.1.2.7)$$

donde:

$$\text{potencia requerida} = 2.72 \times 10^{-6} LZ/E_b \text{ en kWh}$$

y consecuentemente quedará que la:

$$\text{Energía anual consumida en kWh} = (350)(24)(2.72 \times 10^{-6})(L)(Z)/E_b \quad (5.1.2.8)$$

$$\text{Energía anual consumida en kWh} = (22.85)(0.001)(L)(Z)/E_b \quad (5.1.2.8a)$$

Que en el programa se presenta como:

$$\text{PotBomba} = (A_{\max} * Z * 22.85 * 60) / E_b * 10^3$$

donde:

PotBomba: Energía anual consumida por la bomba, kWh

A_{max}: Caudal de agua Kg/hr

E_b: Rendimiento de la bomba, aprox. 70%

El costo de la energía consumida por la bomba se encuentra multiplicando el costo del kWh, por la energía requerida durante el año, quedando en el programa como:

$$\text{CaeBom} = \text{PotBomba} * \text{celec}$$

donde:

CaeBomb: costo de la energía anual consumida por la bomba

5.1.2.3 COSTO ANUAL DE OPERACIÓN

Se encuentra a partir de:

$$\text{Costo anual} = \text{Costo anual de la energía del ventilador} + \text{costo anual del bombeo del agua} \quad (5.1.2.9)$$

Que al representarse en el programa queda:

$$\text{CAO} = \text{Caevent} + \text{CaeBomb}$$

el costo total anual será simplemente la suma del monto del capital invertido más el costo anual de la operación, así tenemos que:

$$\text{CTA} = \text{CCapital} + \text{CAO}$$

Los resultados en cuanto a evaluación económica están realizados en el tipo de cambio monetario más usual en el mundo, lográndose un empleo más práctico del programa.

Queda al usuario del programa, el trabajo de actualizar todos los valores que se crean convenientes.

5.1.3 Lista de variables empleadas en el programa, su significado y las unidades en que se encuentran dadas.

VARIABLE ... DESCRIPCIÓN Y UNIDADES

Amax.....	Caudal de agua Kg/hr
areatrans	Area de la sección transversal
CaeBom	Costo de la energía anual consumida por la bomba
Caevent.....	Costo anual de la energía del ventilador
CAO	Costo Anual de Operación
Capital.....	Capital
CCapital	Monto Anual del Capital Invertido
Celec.....	Costo de la energía eléctrica
CTA.....	Costo Anual Total
dist	Distribuidores y soportes
DP	Caída de presión a través de la torre, cm. de agua
Eb.....	Rendimiento de la bomba, 70%
Ev.....	Eficiencia del ventilador, 60%
est	Estructura y estanque
equi	Equipo de instalación e instalaciones eléctricas
G	Gasto del aire a través de la torre, Kg/hr
PotBomba	Energía anual consumida por la bomba, kWh
Potencia	Energía consumida por el ventilador, Kw-hr
rell	Relleno de Rejas y su instalación
Vasat.....	Volumen específico del aire saturado, m ³ /Kg
vent	Ventiladores, motores, motores de arranque

Referencia Bibliográfica

5.1 Análisis y Evaluación de Proyectos de Inversión

Raúl Coss Bu

Editorial Limusa 1990

5.2 Métodos de cálculos en los procesos de transferencia de materia.

H. Sawistowski y W. Smith

Editorial Alhambra 1964

5.3 Stoichiometry for chemical engineers

Edwin Williams/Curtis Johnson

Mc Graw Hill

5.4 Métodos Numéricos Aplicados a la Computación Digital con FORTRAN

Merlin L. James/Gerald H. Smith/James C. Wolford

Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A. 1973

5.5 Problemas de Ingeniería Química

J. Ocon G. y G. Tojo B.

Editorial Aguilar 1971

5.6 Visual Basic

Francisco J. Ceballos Sierra

Addison-Wesley Iberoamericana

CAPÍTULO 6

REDUCCIÓN DE COSTOS

A continuación se mencionan algunos de los aspectos mediante los cuales se puede disminuir los costos en una torre de enfriamiento

6.1 MODIFICACIONES AL PROCESO

Las modificaciones al proceso pueden por ejemplo eliminar los costos de remoción de cromo de las corrientes del arrastre en la torre de enfriamiento, una alteración en la manera en que se genera el fierro precipita iones de cromo hexavalente en el arrastre reduciendo el consumo de la electricidad en un 35%, siendo el costo de mantenimiento del 80%. [6.1]

En la práctica convencional se generan iones de fierro en una celda electrolítica, entonces se consumen en una reacción óxido/reducción (redox) que convierte el cromo hexavalente soluble a su forma menos tóxica, la trivalente que es insoluble. (El fierro y el cromo precipitan como un lodo que es removido de la corriente arrastre). En los métodos existentes los iones de fierro son producidos directamente en presencia de la alta concentración de sólidos disueltos en la corriente del arrastre. Cuando ocurre la reducción del cromo lejos de la celda electrolítica, no hay ningún corto circuito o fluctuación de celda, y el porcentaje de consumo del electrodo desciende a 78%. [6.2]

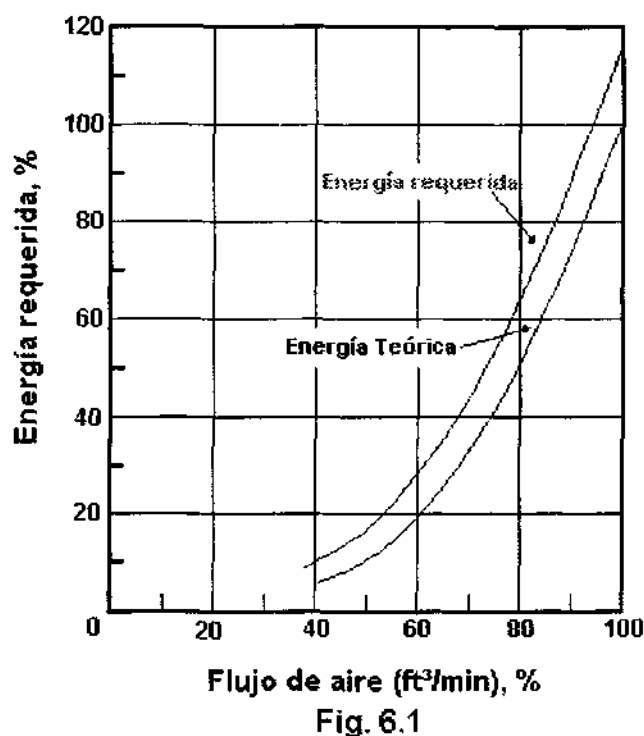
6.2 VENTILADORES DE VELOCIDADES VARIABLES PARA REDUCIR LOS COSTOS DE OPERACIÓN

La regulación del flujo de aire a través de torres de enfriamiento para controlar la velocidad del ventilador por c.a. y el ajuste de la velocidad pueden reducir significativamente los costos de energía, aminorar gastos de mantenimiento y alargar la vida del equipo. Un ejemplo típico se muestra a continuación:

Con la electricidad a \$0.06/kWh, un proyecto de torre de enfriamiento de tipo mecánico con un ventilador de 75 hp en funcionamiento continuo, impulsado por la inducción de un motor de c.a., genera una factura de energía de casi \$32,000/año ($75 \text{ hp} \times 0.746 \text{ kWh} \times 8,760 \text{ h/año} \times \$0.06/\text{kWh} \times 1/0.92 \text{ eficiencia} = \$31,964/\text{año}$). (Chem. Eng., Agosto 8, 1983)

La evaluación de hp del ventilador está basada en los requerimientos del flujo de aire, para el peor de los casos de las temperaturas del bulbo seco y el húmedo (el cual ocurre sólo en una parte pequeña de un año), el flujo del aire mismo, el costo de la energía, que se pueden reducir, por encima del 50% en muchos casos, mientras se mantiene el enfriamiento.

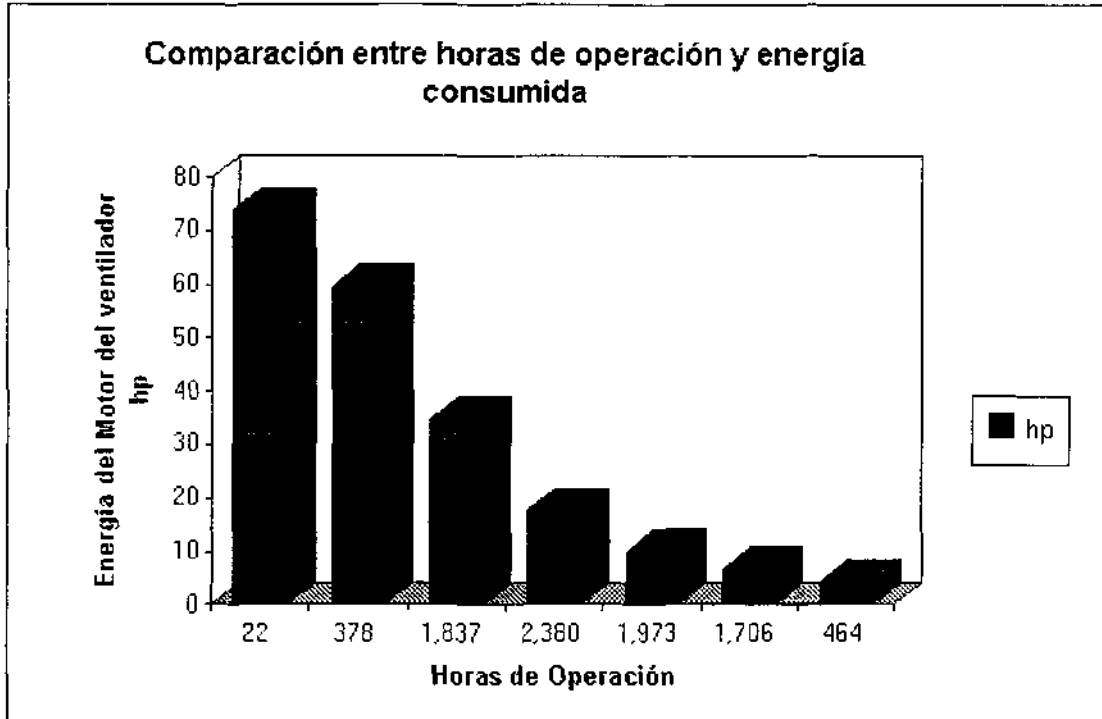
La Fig. 6.1 muestra la relación entre el flujo del aire (ft^3/min) y la energía para los ventiladores centrífugos. Se nota que el impulso requerido en hp desciende rápidamente conforme el flujo de aire es proporcional a la velocidad del ventilador. Por eso, las velocidades más lentas del ventilador dan como resultado la reducción de la energía requerida.



6.2.1 AHORRO AL AJUSTAR LA VELOCIDAD DEL VENTILADOR

Se realizaron prácticas del ajuste de la velocidad de operación de los ventiladores de una torre de enfriamiento, para las unidades de energía invertida, las cuales hicieron variable la velocidad de funcionamiento de motores estándar. Tal funcionamiento puede resultar *un ahorro significativo en los costos de la energía eléctrica, en la reducción de la pérdida de agua al exponerse al viento, alargando más la vida del equipo mecánico, y disminuyendo el ruido y la vibración.* Un método preciso de evaluación del posible ahorro de energía fue realizado con datos de tiempo reales, Tabla 6.1.

Datos de Operación para una Torre de Enfriamiento con un motor para el ventilador de 75 hp						
Tiempo de operación	Promedio de la Temp. Ambiente	Temperatura de Bulbo Húmedo	Flujo de Aire Requerido	Motor del Ventilador	Consumo del Motor	Energía Consumida
h	°F	°F	ft³/min	hp	kWh	kWh
22	97	76	275,928	73.8	55	1,210
378	92	74	256,618	59.6	44.5	16,821
1,837	77	68	214,369	34.7	25.9	47,578
2,380	62	57	171,135	17.6	13.2	31,416
1,973	47	43	140,891	10	7.5	14,798
1,706	32	30	122,985	6.6	4.9	8,359
464	13	12	106,222	4.3	3.2	1,485
8,760						121,687



Por medio de tales datos y una gráfica psicrométrica (en el "Manual del ingeniero Químico," 5a. ed., p. 20-6), los flujos de aire de la torre de enfriamiento requeridos para la variación ambiental, se pueden calcular (ver la Tabla 6.1).

Para estos flujos de aire, los requerimientos del motor para el ventilador (en kWh y hp) son determinantes. La demanda de kWh es calculada para varios períodos de funcionamiento. Se suman para obtener la demanda anual de kWh. La diferencia entre este total y el de energía anual requerida para la velocidad continua de funcionamiento del motor representa la economía de la energía obtenida del funcionamiento a velocidad inconstante.

Para el requisito anual de energía de 121,667 kWh se necesita el ajuste de la velocidad de funcionamiento (de la Tabla 6.1):

Ajuste de velocidad kWh = $121,667 / (0.93 \text{ rendimiento de motor} \times 0.94 \text{ eficiencia inversor}) = 139,175 \text{ kWh}$.

Velocidad constante kWh = $(73.8 \text{ hp} \times 8,760 \text{ h/año} \times 0.746 \text{ kW/hp}) / 0.94 \text{ eficiencia del motor} = 513,064$.

Ahorro en kWh/año = $513,064 - 139,175 = 373,889$.

Reducción en los costos de energía = $373,889 \text{ kWh/año} \times \$0.06/\text{kWh} = \$22,433/\text{año}$.

6.2.2 CALCULOS DE RESTITUCIÓN

Una evaluación económica de la aplicación del ajuste de velocidad a c.a. manejada por el ejemplo anterior es: (Chem. Eng., Agosto 8, 1983)

Costo del equipo:

Suma de la inversión de la c.a.	\$19,000
Suprima el Arrancador de motor con c.a.	- 2,500
Precio neto del costo adicional	\$16,500

Una simple medida rápida de atractivo económico es el período de restitución (GPP). $GPP = \text{inversión adicional} / \text{ahorro anual}$. En este caso $GPP = \$16,500 / \$22,433/\text{año} = 0.736 \text{ año}$.

Para realizar el posible ahorro al reducir la velocidad de operación, se construyen torres de enfriamiento equipadas con motores de dos velocidades para el impulso del ventilador. En tal caso los kWh requeridos por la Tabla 6.1 quedan iguales (en 121,667), pero se reducen un poco los kWh a velocidad constante. Las dos velocidades operan a velocidad total y otras a velocidad media. Los resultados en el consumo anual en kWh (basado en los datos de la Tabla 6.1) son de:

Horas de operación a velocidad total (hp totales) = $22 + 378 + 2,380 = 4,617 \text{ h}$.

Horas de operación a velocidad media (uno-ocho hp) = $1,973 + 1,706 + 464 = 4,143 \text{ h}$.

kWh de las dos velocidades/año = $[(73.8 \text{ hp} \times 4,617 \text{ h/año} + 73.8 \text{ hp} \times 1/8 \times 4,143 \text{ h/año}) \times 0.746 \text{ kW/hp}] / 0.94 \text{ eficiencia del motor} = 300,744 \text{ kWh/año}$.

Ahorro en kWh/año = $300,744 - 121,667 = 179,077 \text{ kWh/año}$.

Reducción del costo de energía = $179,077 \text{ kWh/año} \times \$0.06/\text{kWh} = \$10,745/\text{año}$.

Costos adicionales al equipo:

Inversor de c.a.	\$19,000
Motor simple de velocidad de c.a.	<u>3,700</u>
Suma total	\$22,700

Cancelación de costos de equipo:

Arrancador del motor de dos velocidades	\$4,500
Motor de dos velocidades de c.a.	6,500
Juego de cables energéticos para el motor	<u>800</u>
Cancelaciones totales	\$11,800
Precio neto de costo adicional	\$10,900

Por eso, $GPP = \$10,900 / \$10,745/\text{año} = 1.01 \text{ año}$. *La evaporación reducida del agua y el menor mantenimiento al ventilador provee ahorro adicional en ambos ejemplos.*

6.2.3 OTRAS CARACTERÍSTICAS

El control automático de la velocidad del ventilador es alcanzado por la instrumentación del proceso convencional. La medición de la temperatura de retorno o del agua fría proporcionan las señales de control para la velocidad de la unidad inversora de energía de los ventiladores (Fig. 6.2). El funcionamiento manual puede incluso cubrir un control de mal funcionamiento.

El funcionamiento reverso (para prevenir la formación de hielo sobre las paletas del ventilador) se logra electrónicamente dentro de la unidad inversora, también se puede arrancar manualmente, o automáticamente a una temperatura fija baja. Cuando se requiere fiabilidad extrema, los controles permiten el funcionamiento a velocidad constante.

El ahorro de costos en la unidad energética son posibles cuando funcionan motores múltiples con un suministro de energía simple (Fig. 6.2). En este arreglo todos los motores operan a la misma velocidad.

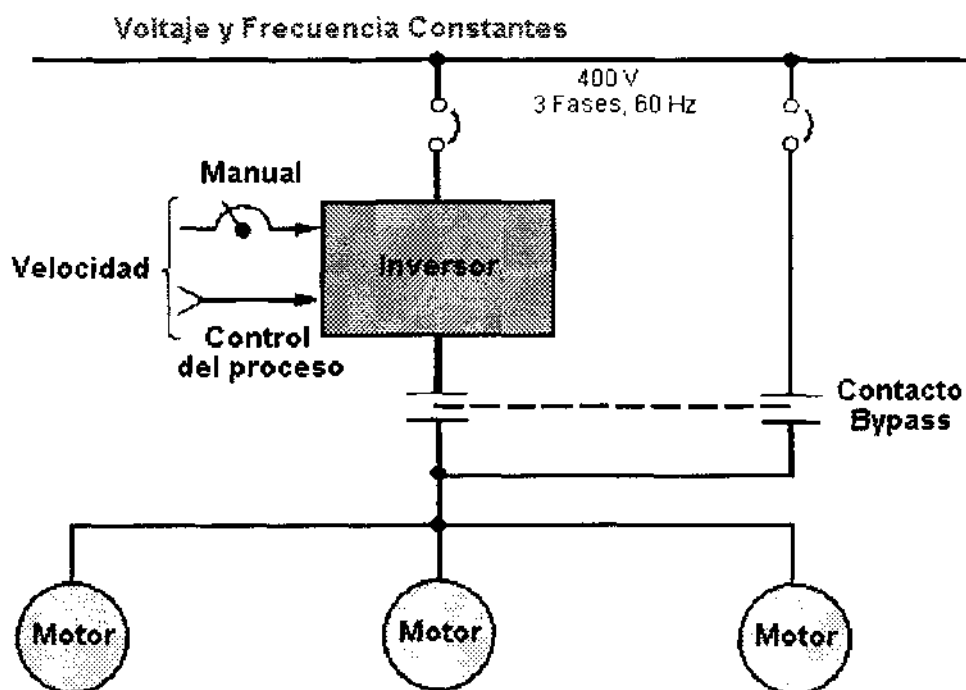


Fig. 6.2 Operación a velocidad constante.

Fijar el torque de partida del motor evita el "cierre de golpe" asociado con el voltaje "arranca y para". Su aumento aminora los costos de mantenimiento. La paleta más abajo también aminora la velocidad del ventilador, el ruido y la vibración. La reducción de velocidad es en 3:1 igual a una reducción de ruido de 20-25 dBA.[6.3].

6.3 FILTROS PARA ELIMINAR LA CONTAMINACIÓN EN TORRES DE ENFRIAMIENTO

Los requisitos más simples de mantenimiento y la reducción de costos son dos de los beneficios principales al limpiar una torres de enfriamiento.

Las torres de enfriamiento recogen muchos desechos y otros contaminantes del aire.

6.3.1 RETROLAVADO MANUAL

Para manejar el aumento de suciedad en el flujo de agua se instala un equipo de filtración. En cierto estudio una planta utilizó camas de arena para filtrar el arrastre; éstas requirieron una ejecución manual, el retrolavado regularmente de 30 min, y varios miles de galones de agua. Siguiendo el retrolavado, se encontraron problemas para el restablecimiento de las camas propiamente dichas.

Actualmente existen sistemas de filtros que reemplazan este sistema; en donde se emplea un filtro apretado hecho de una malla de acero forjado (malla de 15-micrometros). La malla es diseñada para atrapar las partículas más pequeñas que los poros de la malla. Como el espesor de tierra de la torta de los filtros aumenta, el diferencial de la presión para la torta crece. Con los sistemas convencionales se conserva el filtro hasta que la torta parcialmente se desprende (depositándose en el fondo del medio de filtración y elevando la presión), punto en que se ejecuta un retrolavado. Los nuevos sistemas emplean un juego de sensores de presión que supervisan la presión de la corriente, y se diseñan para operar en el proceso de retrolavado antes de que la torta se desprenda.

El setpoint del diferencial de presión es determinado en base a la experiencia y entonces es programado en controladores electrónicos durante el arranque.

6.3.2 AHORRO DE ENERGÍA

Estos sistemas de filtración proporcionan ventajas para una mejor filtración del arrastre. Con la reducción de columnas arrastre, los requerimientos de bombeo se reducen, y se ahorra agua en el proceso. Al mismo tiempo, **la torre de enfriamiento más limpia mejora la ejecución del equipo de intercambio de calor**, que está sujeto a la formación de la incrustación. Finalmente, la limpieza característica en sí misma de estos sistemas tienen ventajas potenciales de costo por encima de los cartuchos filtros, que requieren reemplazo periódico.

En el mercado actual hay estos sistemas de filtración (Filtomat) que se están usando en procesos químicos industriales, incluso en los procesos del petróleo, procesos de polímeros y otras plantas donde el agua sucia es un problema. Han sido usadas para procesos donde el agua es fundamental y para aplicaciones del agua de desecho, donde la proporción es por encima de 5,000 gal/min. [6.4].

6.3.3 NUEVA TECNOLOGÍA EN LA FILTRACIÓN DEL AGUA DE ENFRIAMIENTO

Muchos filtros hechos a presión usan la torta del filtro, la cual se construye sobre la trama, esto habilita al filtro para entrapar las partículas que son mucho más pequeñas que la trama de la malla. Pero hay límites a la efectividad de filtración de la torta. El espesor de la torta se construye para la presión diferencial. Se usa este diferencial de presión generalmente para activar los controles automáticos de alerta. A menudo pasa que parte de la torta cercana a la trama llega a ser comprimida, entonces deja que las partículas finas atrapadas en la torta se liberen y pasen por la trama. Ésta es la razón por la cual la filtración de la torta no trabaja a su efectividad máxima, Fig. 6.3.

Para superar este problema, un esquema de control que actúe por presión diferencial se debe usar. Una técnica es instalar una válvula de control de flujo en la línea de la corriente baja y varía el flujo para limitar la máxima presión diferencial. Ésto evita la presión excesiva, que puede causar el colapso de la torta. La acción de vaciado es controlada por Auto-lavado.

Este método es el más útil en sistemas de ciclos cerrados donde se instala el filtro en una corriente lateral para manejar un porcentaje del flujo total. [6.5]

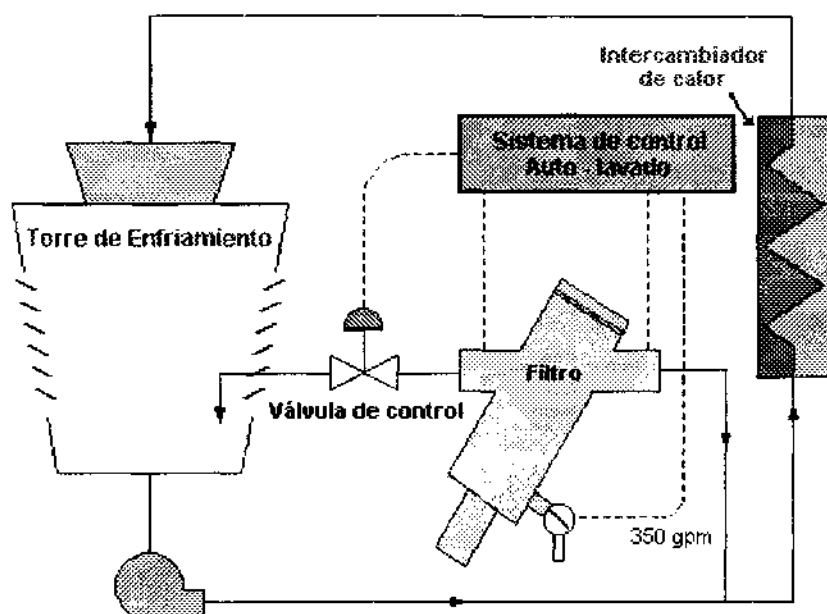


Fig. 6.3 Filtros para Torres de Enfriamiento.

6.4 CONGELAMIENTO PARA REDUCIR LOS COSTOS DE TRATAMIENTO

Congelar el afluente reemplazaría de 7 a 8 evaporadores de efecto etapas múltiples, con una reducción equivalente al volumen del agua sucia de las torres de enfriamiento, sin aumento en el consumo de energía. El convencional equipo de ciclos de refrigeración del amoníaco limpia el agua de los desperdicios. Arriba de un 95% del agua se solidifica; los sólidos suspendidos, concentrados en la porción de líquido, se pueden sedimentar, o enviarse a un estanque de evaporación. El hielo, el cual flota en un contenedor de colección, se lava para librarlo de contaminantes de la superficie, y se puede reutilizar en las torres de enfriamiento. [6.6]

Referencias Bibliográficas

- 6.1 *Chemical Engineering*, Enero 23, 1984.
- 6.2 *Chemical Engineering*, Febrero 20, 1984.
- 6.3 Johnson, James D. "Variable fan speeds cut cooling-tower operating costs"; *Chem. Eng.*, Agosto 8, 1983.
- 6.4 Filtomat Inc., Los Angeles, *Chem. Eng.*, Noviembre 1990.
- 6.5 "Extending the life of boilers and cooling towers", *Chem. Eng.*, Abril 1990.
- 6.6 *Chemical Engineering*, Noviembre 28, 1983.

CONCLUSIONES

Tanto esta tesis como el programa desarrollado nos proporcionan las evaluaciones y consideraciones que son pertinentes para los tipos de torres de mayor empleo en la industria.

En particular, el programa funciona interactivamente con el usuario mostrando:

- 1) La información descriptiva de los diferentes tipos de torres de enfriamiento (Generalidades)
- 2) Cómo construir y usar un diagrama psicrométrico a partir de datos de Temperatura y Presión (Capítulo 1)
- 3) Un simulador de los tipos de torres de enfriamiento más empleadas en la industria para el sistema aire-agua (Capítulo 2)
- 4) Algunas opciones prácticas para aumentar la efectividad y vida útil de una típica torre de enfriamiento (Capítulos 3 y 4)
- 5) Un ejemplo de evaluación económica (Capítulo 5)
- 6) Algunas alternativas para la reducción de costos (Capítulo 6).

El tutor está programado con Visual Basic que se está convirtiendo rápidamente en un lenguaje orientado a la elaboración de paquetes interactivos de computo.

La forma en que se presentan las respuestas a los cálculos nos permite ir siguiendo paso a paso la secuencia de los cálculos. Respecto a la parte teórica del programa, se logra por medio de imágenes visuales y textos explicativos un aprendizaje interactivo del funcionamiento de dichas Torres.

Dicha información se puede aplicar a:

1) Educación:

- a) como auxiliar en el aprendizaje del tema de psicrometría y torres de enfriamiento
- b) como ejemplo de programación en Visual Basic
- c) como auxiliar en los cursos de transferencia de masa, transferencia de calor y humidificación y secado

2) Industria:

- a) la información que contiene el programa puede en un momento dado ayudar a la toma de decisiones en cuanto a las características del equipo dadas por el proveedor y la cotización recibida
- b) Se reduce el tiempo de evaluación de un proyecto de torres de enfriamiento.

Con esto he podido demostrarme lo que es posible lograr con esfuerzo, interés e iniciativa.

Laura Estela Alcázar Esquivel

APÉNDICE A

Humedad

son el número de Kilogramos de vapor de agua que puede transportar un Kilogramo de aire seco en condiciones previamente determinadas. Esta cantidad se denomina "relación de humedad".

Si el comportamiento de la mezcla cumple las leyes de los gases ideales, la presión total ejercida por la mezcla será igual a la suma de la presión parcial del gas más la presión parcial del vapor de agua:

$$P_T = P_a + P_v$$

En estas condiciones de fracción la fracción molar del vapor de agua es:

$$y = \frac{n_v}{n_t} = \frac{P_v}{P_t}$$

es decir la fracción molar es igual a la composición en volumen. Para expresar la concentración del vapor en el gas se emplean diversos términos.

Humedad Molar o Saturación Molar

es la relación entre el número de moles de vapor y de gas contenidos en una determinada masa gaseosa.

$$V_m = \frac{n_v}{n_a} = \frac{P_v}{P_a} = \frac{P_v}{P_T - P_v}$$

Humedad Absoluta o Saturación Absoluta

es la relación entre el peso de vapor y el peso de gas contenido en una masa gaseosa de vapor de agua y de aire

$$W = \frac{M_v}{M_a} Y_m = \frac{M_v}{M_a} \frac{P_v}{P_T - P_v}$$

donde M_v y M_a son las masas moleculares del vapor y del aire. Para el caso de la mezcla aire-agua, tomando para el aire un peso molecular medio de 29, tendremos:

$$W = \frac{18 P_v}{29 P_T - P_v} = 0.6202 \frac{P_v}{P_T - P_v}$$

en que "W" es la humedad.

Aire Saturado

es el aire en el que el vapor de agua está en equilibrio con el agua líquida en condiciones de temperatura y presión dadas. En mezclas de este tipo la presión parcial de vapor de agua en la mezcla de vapor agua-aire es igual a la presión de vapor del agua pura a dicha temperatura.

Porcentaje de Humedad

(Porcentaje de Saturación o grado de saturación) es la relación entre el peso de vapor contenido en un cierto peso de aire seco, y el peso de vapor que habría en el mismo peso de aire seco, a las misma temperatura. Se expresa en tanto por ciento.

Calor Húmedo

es el número de Kilocalorías necesario para elevar un grado centígrado a la temperatura de un Kilogramo de aire seco, más cualquier humedad que puede llevar. Si el calor específico del aire es 0.24 Kcal/°C Kg, y el del vapor del agua se toma como 0.45 en las mismas condiciones y unidades, el calor húmedo se define por la ecuación:

$$S = 0.24 + 0.45 W$$

donde "S" es el calor húmedo en Kcal/°C Kg

Entalpía de la mezcla aire-agua

es un kilogramo de aire seco más la entalpía del vapor de agua que lo acompaña. Se expresa en Kcal/Kg de aire seco.

Las entalpías sobre los estados de referencias más comúnmente utilizados son:

Para el agua: agua líquida a 0°C y a una presión de saturación de una atm de 0.22 KCal/Kg.

Para aire seco a -18°C y 1 atm.

Por lo tanto para una mezcla de aire y de vapor de agua que contenga W Kg. de vapor de agua por Kg de aire seco a una temperatura de t°C. la entalpía puede calcularse así:

$$H = 0.24 (t + 10) + W (597.8 + 0.45 t)$$

En la que 597.8 es el calor latente de evaporación a 0°C.

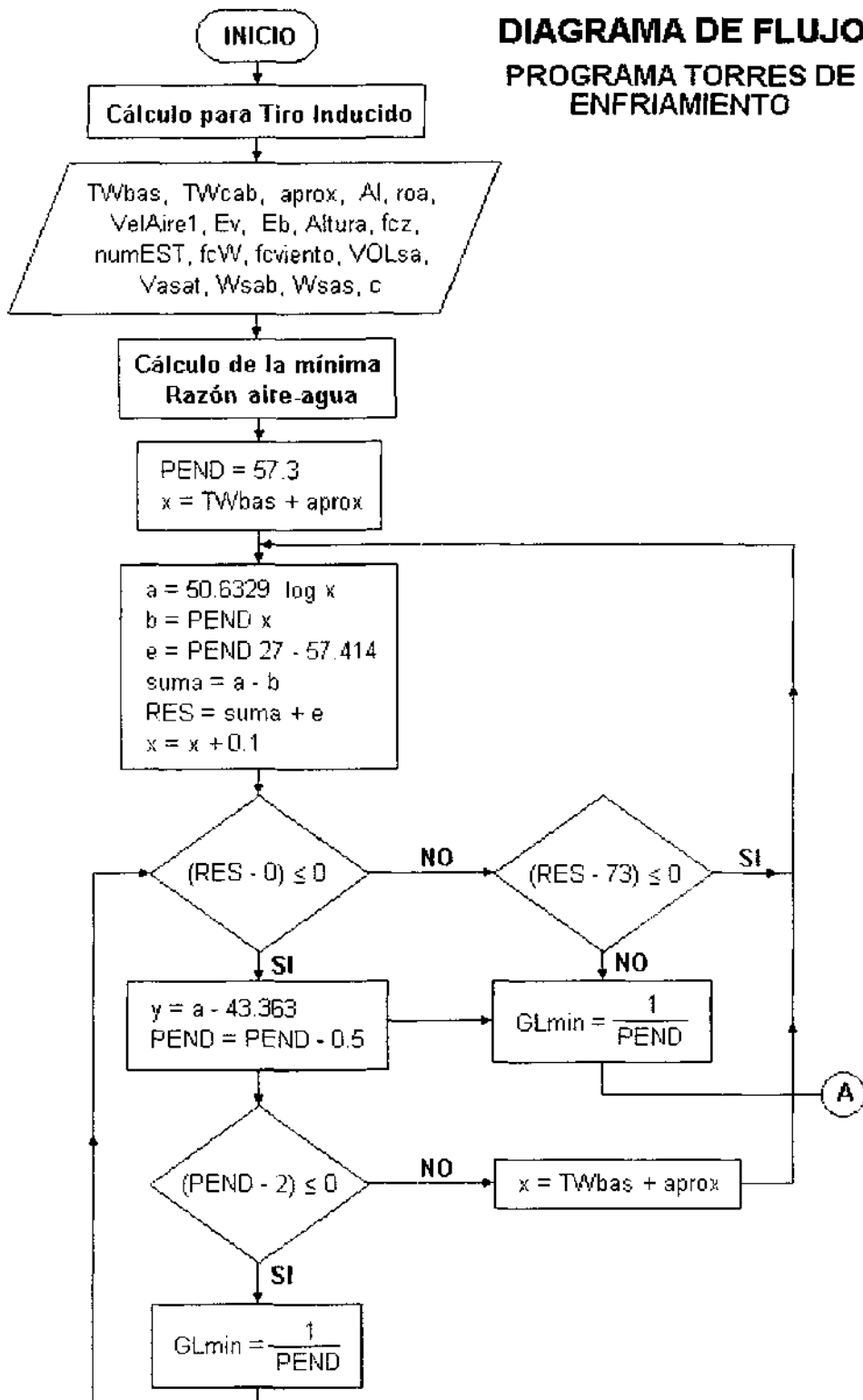
Volumen Húmedo

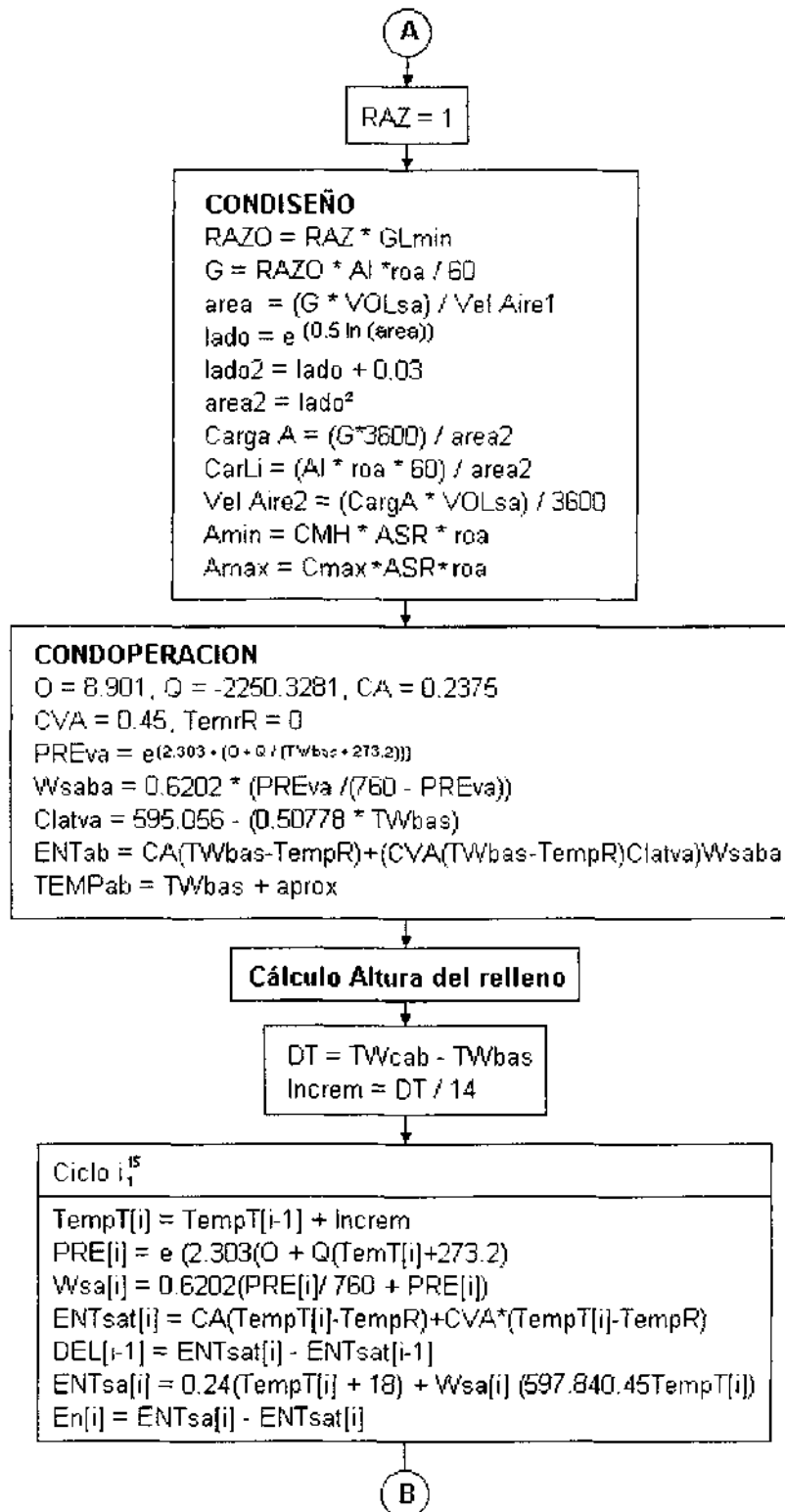
es la unidad usada en Psicrometría, viene expresada en metros cúbicos de aire húmedo por Kilogramo de aire seco.

Punto de rocío

es la temperatura a la que debe enfriarse una mezcla de aire y vapor de agua (a humedad constante) con objeto de que sature (es decir, que está en equilibrio con el agua líquida en el punto de rocío).

DIAGRAMA DE FLUJO **PROGRAMA TORRES DE** **ENFRIAMIENTO**





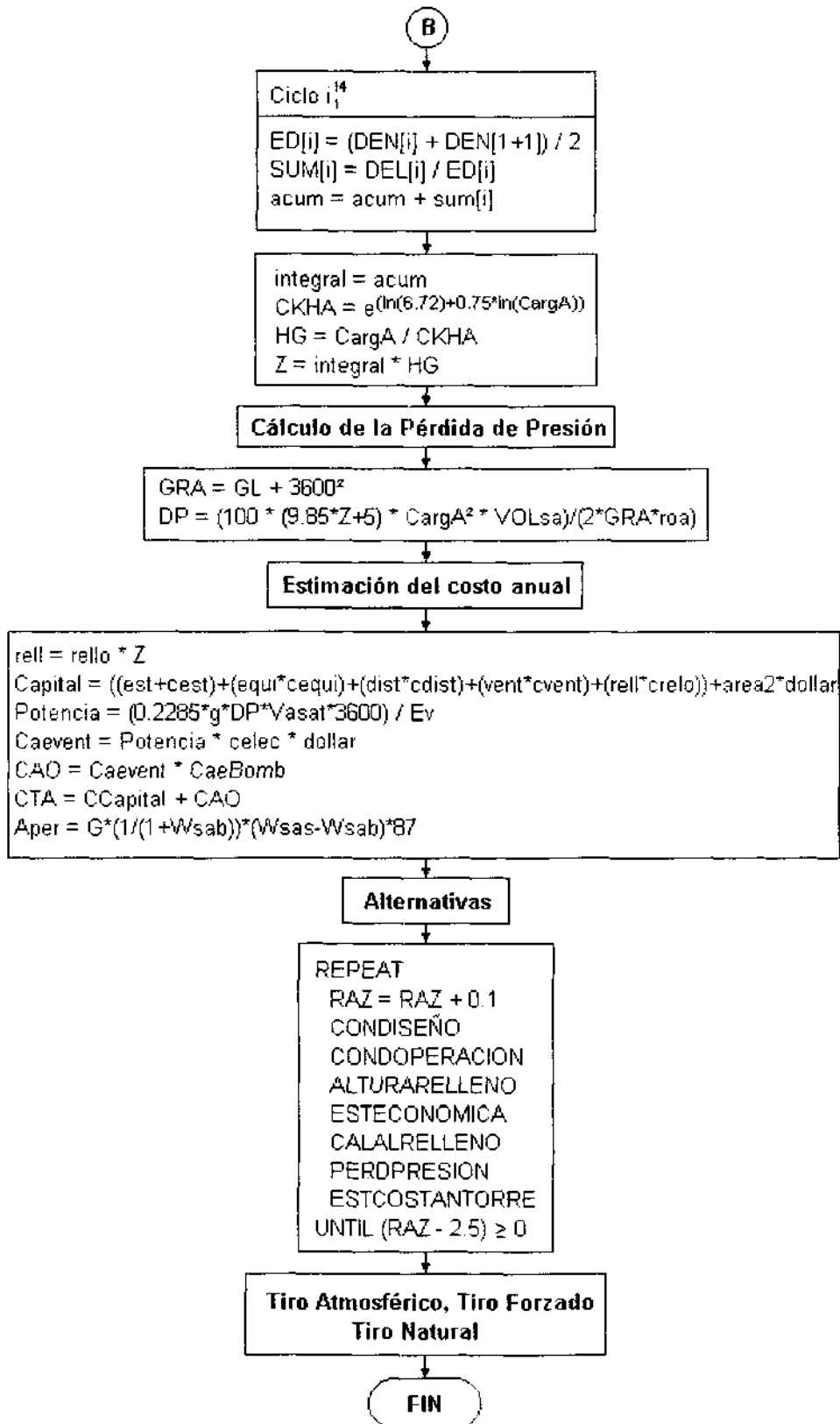


DIAGRAMA DE FLUJO CARTA PSICROMÉTRICA

