

## TORRES DE ENFRIAMIENTO

- DESCRIPCION
- TIPOS
- COMPONENTES
- PARAMETROS OPERACIONALES

## TORRES DE ENFRIAMIENTO

Las torres de enfriamiento tienen como finalidad enfriar una corriente de agua por vaporización parcial de esta con el consiguiente intercambio de calor sensible y latente de una corriente de aire seco y frío que circula por el mismo aparato.

Las torres pueden ser de muchos tipos, sin embargo el enfoque se centra en un equipo de costo inicial bajo y de costo de operación también reducido.

Con frecuencia la armazón y el empaque interno son de madera.

Es común la impregnación de la madera, bajo presión con fungicidas.

Generalmente el entablado de los costados de la torre es de pino, poliéster reforzado con vidrio, o cemento de asbesto.

## TORRES DE ENFRIAMIENTO

Pueden empacarse con empaques plásticos. El empaque de plástico puede ser polipropileno, moldeado en forma de enrejado o alguna otra forma.

El espacio vacío es muy grande, generalmente mayor del 90% con el fin de que la caída de presión del gas sea lo más baja posible.

Como consecuencia la superficie de la interfase no sólo incluye la superficie de las películas líquidas que humedecen el empaque, sino también la superficie de las gotas que caen como lluvia desde cada fila de

## TIPOS DE TORRES DE ENFRIAMIENTO

Las torres de enfriamiento se clasifican según la forma de suministro de aire en:

- Torres de circulación natural
  - 1. Atmosféricas
  - 2. Tiro natural
- Torres de tiro mecánico
  - 1. Tiro inducido
  - 2. Tiro Forzado
- Otros tipos: Torres de flujo cruzado

## TIPOS DE TORRES DE ENFRIAMIENTO

- Torres de Circulación natural
    - 1. Atmosféricas: El movimiento del aire depende del viento y del efecto aspirante de las boquillas aspersoras. Se usan en pequeñas instalaciones. Depende de los vientos predominantes para el movimiento del aire.
    - 2. Tiro natural: El flujo de aire necesario se obtiene como resultado de la diferencia de densidades, entre el aire más frío del exterior y húmedo del interior de la torre. Utilizan chimeneas de gran altura para lograr el tiro deseado.  
Debido al inmenso tamaño de estas torres (500 pie alto y 400 pie de diámetro), se utilizan por lo general para flujos de agua por encima de 200000 gpm
- Son ampliamente utilizadas en las centrales térmicas.

## TIPOS DE TORRES DE ENFRIAMIENTO

- Torres de Tiro mecánico
  - El agua caliente que llega a la torre puede distribuirse por boquillas aspersoras o compartimientos que dejan pasar hacia abajo el flujo de agua a través de unos orificios.  
El aire usado para enfriar el agua caliente es extraído de la torre, en cualquiera de las dos formas siguientes:
    1. Tiro Inducido: El aire se succiona a través de la torre mediante un ventilador situado en la parte superior de la torre. Son las más utilizadas.

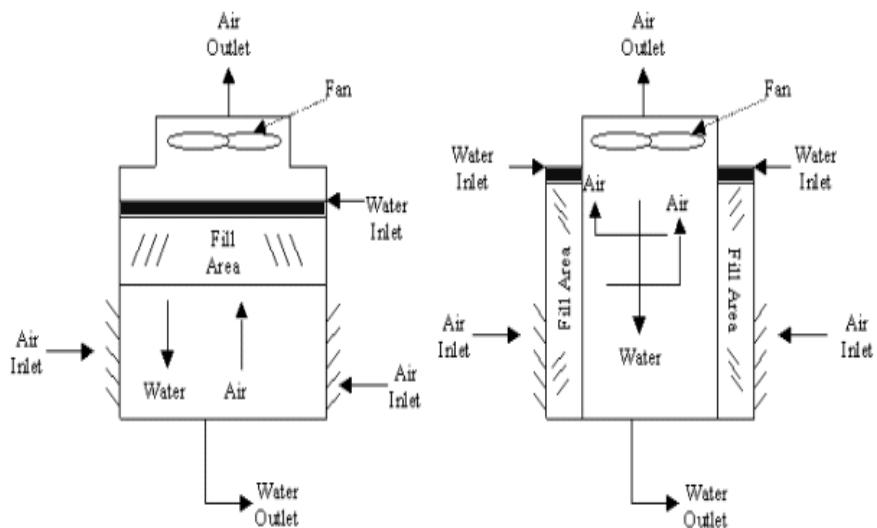
## TIPOS DE TORRES DE ENFRIAMIENTO

2. Tiro forzado: El aire se fuerza por un ventilador situado en el fondo de la torre y se descarga por la parte superior.

Estas torres están sujetas particularmente a la recirculación del aire caliente y húmedo que es descargado, dentro de la toma del ventilador, debido a la baja velocidad de descarga y que materialmente reduce la efectividad de la torre.

El tiro inducido con el ventilador en la parte superior de la torre evita esto y además permite una distribución interna más uniforme del aire.

## TORRES DE TIRO INDUCIDO



## TIPOS DE TORRES DE ENFRIAMIENTO

Torres de flujo cruzado:

El aire entra a los lados de la torre fluyendo horizontalmente a través del agua que cae. Las corrientes de aire laterales se unen en un pasaje interno y dejan la torre por el tope.

Las torres de flujo cruzado requieren más aire y tienen un costo de operación más bajo que las torres a contracorriente.

## COMPONENTES DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO

- Equipo mecánico

1. Ventiladores
2. Motores

- Sistema de distribución del agua:

1. Las torres a contracorriente dispersan el flujo a través de un sistema de distribución de spray a baja presión, desde un sistema de tuberías distribuido a lo largo de toda la torre
2. Los diseños de flujo cruzado tienen un sistema de distribución del agua caliente por gravedad a través del empaque.

## COMPONENTES DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO

### ***Sistema de distribución de agua:***

La eficiencia global de una torre de enfriamiento está directamente relacionada con el diseño del sistema de distribución de agua caliente.

La consideración principal en la selección del tipo de sistema de distribución de agua para una aplicación específica es la cabeza a vencer por la bomba.

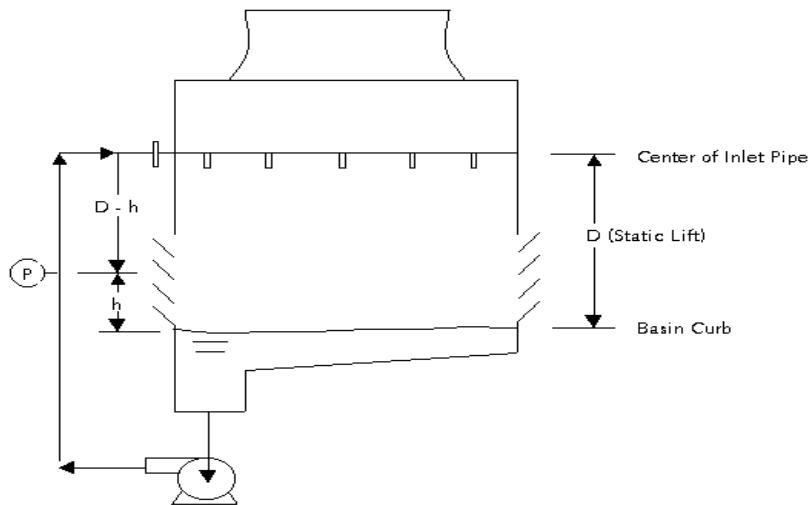
La cabeza de la bomba impuesta por una torre de enfriamiento consiste de la altura estática (relativa a la altura desde la entrada, más la presión necesaria para mover el agua a través del sistema de distribución y sobre el relleno.

## COMPONENTES DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO

### ***Sistema de distribución de agua:***

La cabeza de bombeo varía de acuerdo a la configuración de la torre.

## COMPONENTES DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO



## COMPONENTES DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO

### ***Sistema de distribución de agua:***

Torres contracorriente: utilizan un sistema de distribución de spray a alta presión para lograr cubrir todo el relleno de la torre.

El patrón de spray de las boquillas es sensible a los cambios en el flujo de agua, y a los cambios en la presión de las boquillas.

Las torres a contracorriente tienen un área de presión menor que las de flujo cruzado pero requieren altura adicional, altura estática y cabeza dinámica para alcanzar el mismo efecto de enfriamiento.

## COMPONENTES DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO

### ***Sistema de distribución de agua:***

Las torres a flujo cruzado utilizan un sistema de distribución diferente. El agua caliente es distribuida a través de los empaques por gravedad a través de unos pequeños orificios ubicados en el piso de la base de entrada.

Tal sistema no es un sistema de distribución en spray. El aire se mueve horizontalmente a través del empaque y se cruza con el agua que cae. En las torres de flujo cruzado el componente de presión interna de la cabeza de bombeo es insignificante debido a que el flujo es principalmente por gravedad

## COMPONENTES DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO

### ***Sistema de distribución de agua:***

Comparadas a las torres de flujo cruzado las contracorriente pueden requerir de 5 a 6 psig adicionales de cabeza para alcanzar una distribución adecuada del spray.

Esta elevada cabeza de bombeo conduce a mayores costos iniciales y anuales por consumo de energía de las bombas.

## COMPONENTES DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO

### ***Sistema de distribución de Aire***

En las torres contracorriente la resistencia al flujo ascendente del aire por parte de las gotas que caen resulta en una elevada pérdida de presión estática y una mayor potencia del ventilador que en flujo cruzado.

Las torres a flujo cruzado contienen una configuración del relleno a través de la cual el aire se mueve horizontalmente a través del agua que cae.

Las torres de flujo cruzado utilizan esencialmente toda la altura de la torre para las rejillas de ventilación, reduciendo la velocidad de entrada del irá, y minimizando la recirculación y pérdida de tiro.

## COMPONENTES DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO

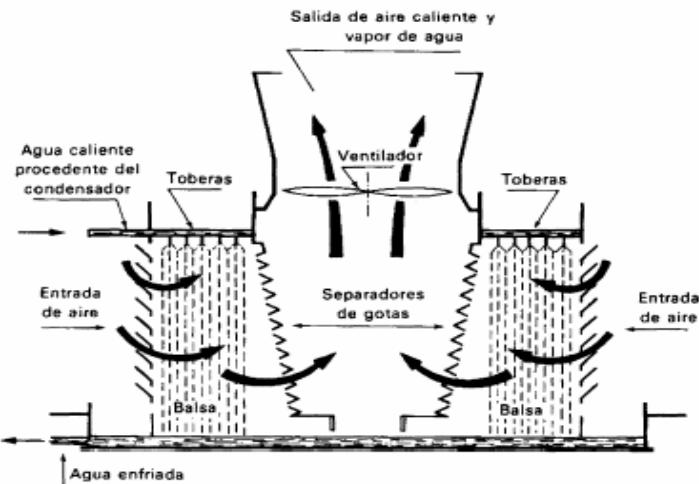
- Relleno:
- Distribuido dentro de la torre suministra el área superficial para la transferencia de masa y calor.
- Eliminadores de desviación
- Base recolectora del agua fría

El agua fría es recogida por la base del fondo

- Desviadores del flujo de aire
- Cubierta de redistribución

En torres de flujo cruzado se necesita romper la corriente de agua que baja.

## COMPONENTES DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO



## TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR

Teoría de Merkel:

El Dr. Merkel desarrolló una teoría para la transferencia de masa y calor en una torre de enfriamiento a contracorriente.

La teoría considera el flujo de masa y energía del agua a la interfase y de la interfase a la masa gaseosa.

Cuando el flujo cruza estas dos fronteras, cada una ofrece una resistencia a la transferencia de materia y energía, que resulta en gradientes de temperatura, entalpía y de humedades.

## TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR

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

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

Donde:

Q: calor total transferido Btu/h

K: coeficiente total de transferencia lb/h pie<sup>2</sup>

S: Área de transferencia pie<sup>2</sup>.

S= a\*V donde a es el área interfacial y V es el volumen efectivo de la torre

## TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR

hw : Entalpía de la mezcla gaseosa a la temperatura del agua

ha : Entalpía de la mezcla gaseosa a la temperatura de bulbo húmedo

## TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR

Como la entalpía y temperatura del aire y el agua cambian a lo largo de la torre se tiene:

$$dQ = d[K^*S^*(hw-ha)] = K^* (hw-ha)^*dS$$

La transferencia de calor del lado del agua:

$$dQ = C_w * L * dt_w$$

La transferencia del lado del aire:

$$dQ = G^*dha$$

Luego el calor total es:

$$K^*(hw-ha)^*dS = G^*dha \text{ o}$$

$$K^*(hw-ha)^*dS = C_w * L * dt_w$$

## TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR

Esto puede rescribirse como:

$$K^*dS = G^* \frac{dha}{hw - ha}$$

O También como:

$$\frac{K^*dS}{L} = \frac{C_w dt_w}{hw - ha}$$

Al integrar:

## TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR

$$\frac{KS}{L} = \frac{KaV}{L} = \frac{G}{L} \int_{ha}^{hw} \frac{dh}{hw - ha}$$

Al termino  $KaV/L$  se le llama la característica de la torre

O como:

$$\frac{KS}{L} = \frac{KaV}{L} = C_w \int_{ha}^{hw} \frac{dtw}{hw - ha}$$

Al integrar utilizando el método de Tchebycheff de la siguiente manera:

## TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR

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

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

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

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

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

## TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR

Para la evaluación de  $\frac{K a V}{L}$

$$\frac{K a V}{L} = C_w \int_{t_w 1}^{t_w 2} \frac{d t_w}{h_w - h_a} = \\ = (t_w 2 - t_w 1) * \frac{1}{4} \left[ \frac{1}{\Delta h_1} + \frac{1}{\Delta h_2} + \frac{1}{\Delta h_3} + \frac{1}{\Delta h_4} \right]$$

Donde:

$\Delta h_1$ = valor de (hw-ha) a la temperatura de  $t_w 1 + 0.1 * \text{Rango}$

$\Delta h_2$ = valor de (hw-ha) a la temperatura de  $t_w 1 + 0.4 * \text{Rango}$

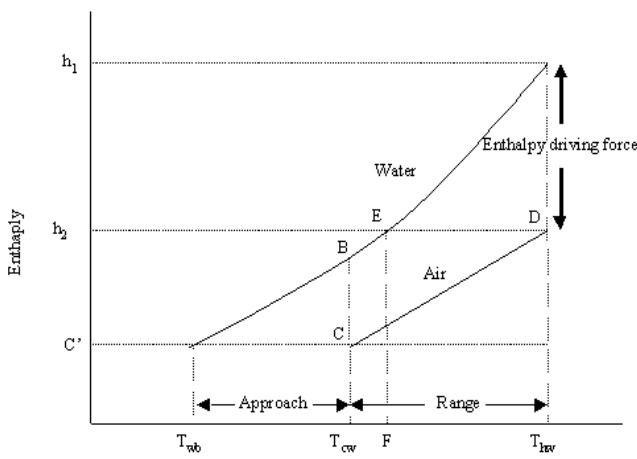
$\Delta h_3$ = valor de (hw-ha) a la temperatura de  $t_w 1 + 0.6 * \text{Rango}$

o de  $t_w 2 - 0.4(t_w 2 - t_w 1)$

$\Delta h_4$ = valor de (hw-ha) a la temperatura de  $t_w 1 + 0.9 * \text{Rango}$  o de  $t_w 2 - 0.4(t_w 2 - t_w 1)$

## TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR

Representación gráfica de la característica de la torre:



## TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR

Donde:

$$\text{Rango} = \text{Thw} - \text{Tcw}$$

$$\text{Alcance (Aproach)} = \text{Tcw} - \text{Twb}$$

También llamado diferencia útil de temperatura

Para calcular el valor de  $\frac{K a V}{L}$   
también se puede utilizar un nomograma o las graficas  
de características de la torre.

## TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR

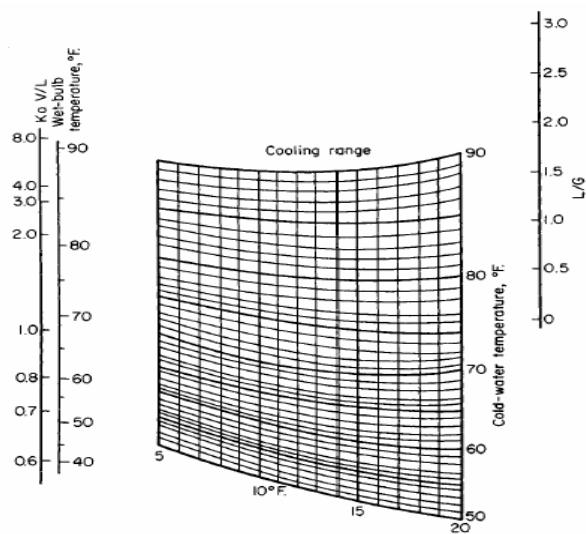


FIG. 12-13 Nomograph of cooling-tower characteristics. [Wood and Betts, Engineer, 189(4912), 337 (1950).]

## TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR

Como ejemplo supongamos que se tiene una torre que opera con un intervalo de 20 °F temperatura del agua fría de 80°F y temperatura de bulbo húmedo de 70°F. Con L/G = 1.

Se puede ver a continuación en el nomograma.

## TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR

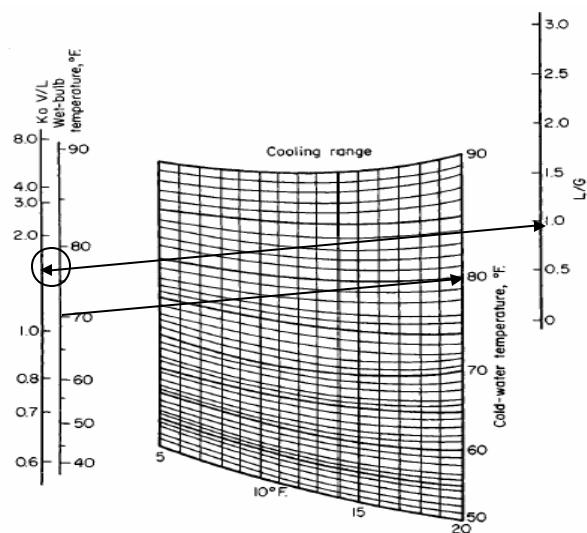
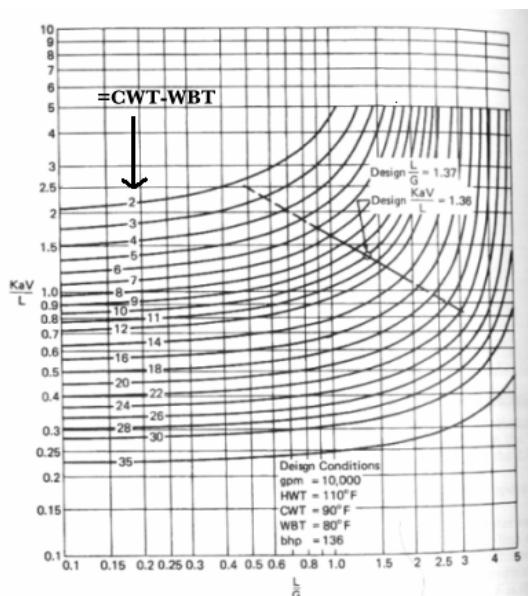


FIG. 12-13 Nomograph of cooling-tower characteristics. [Wood and Betts, Engineer, 189(4912), 337 (1950).]

## TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR

Las empresas que diseñan torres de enfriamiento cuentan con extensas tablas del cooling tower institute que se pueden conseguir en el Cooling Tower Institute Blue Book y que tienen la forma siguiente:

## TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR



## TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR

Las curvas características sirven como una medida de la capacidad de enfriamiento de la torre a la cual aplica.

Estas relacionan el termino  $KaV/L$  y la relación  $L/G$  de la forma:

$$\frac{KaV}{L} = C \left( \frac{L}{G} \right)^m$$

Donde  $C$  y  $m$  son constantes para una torre dada y se determinan por las características del empaque

## TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR

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

Esta última curva puede llamarse también "Curva de Requerimientos de diseño" puesto que es una medida del grado de dificultad para alcanzar los requerimientos de diseño, y no tiene nada que ver con las características físicas de la torre.

Se construye asumiendo valores de  $L/G$  y calculando los valores correspondientes de  $KaV/L$  utilizando la ecuación:

$$\frac{KaV}{L} = C w \int_{tw1}^{tw2} \frac{dtw}{hw - ha}$$

## TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR

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

$$\frac{K a V}{L} = C w \int_{tw1}^{tw2} \frac{dtw}{hw - ha}$$

## INFLUENCIAS EXTERNAS SOBRE EL FUNCIONAMIENTO DE LA TORRE

### • RECIRCULACION

La recirculación en las torres de enfriamiento se define como una adulteración de la atmósfera de entrada a la torre por la atmósfera de salida de la misma.

El efecto de la recirculación se ve en un inesperado aumento de la temperatura de bulbo húmedo del aire que entra a la torre de enfriamiento (por encima de la temperatura de bulbo húmedo del aire ambiente), y un correspondiente incremento en la temperatura del agua que sale de la torre.

## INFLUENCIAS EXTERNAS SOBRE EL FUNCIONAMIENTO DE LA TORRE

Dependiendo del grado de recirculación la temperatura del agua fría puede incrementarse hasta en 5 grados o más.

A lo mejor esto también ocasiona que el sistema opere por encima de los parámetros de diseño.

Todas las torres ofrecen un potencial riesgo de recirculación, la extensión de esta depende de las velocidades de entrada y salida del aire.

Altas velocidades de entrada incrementan el potencial para la recirculación, mientras que elevadas velocidades de salida disminuyen el riesgo de recirculación.

## INFLUENCIAS EXTERNAS SOBRE EL FUNCIONAMIENTO DE LA TORRE

### • Restricción del flujo de Aire

A una determinada carga de calor, un flujo determinado de agua y una temperatura de bulbo húmedo particular la temperatura del agua fría producida por una torre de enfriamiento es totalmente dependiente de la cantidad de aire de entrada.

Una disminución en la cantidad de aire y la temperatura del agua se incrementará.

Debido a la importancia del flujo de aire, los fabricantes se preocupan en diseñar correctamente los ventiladores y sus motores, puesto que estos son los que mueven el aire contra la presión estática encontrada dentro de la torre.

## INFLUENCIAS EXTERNAS SOBRE EL FUNCIONAMIENTO DE LA TORRE

La presión estática es una medida de la resistencia del sistema para un determinado flujo de aire, esto resulta de las restricciones en el sistema (lo cual incrementa la velocidad del aire) y de los cambios en la dirección del flujo de aire.

## INFLUENCIAS EXTERNAS SOBRE EL FUNCIONAMIENTO DE LA TORRE

### ● VIENTO

Dependiendo de su velocidad y dirección, tiende a incrementar el potencial de la torre de enfriamiento a la recirculación.

No solamente la curvatura creada por el aire de salida en la dirección del flujo del viento, también se crea una zona de baja presión en la cual puede formarse una porción de niebla, si la admisión de aire a la torre esta en esa dirección, entonces puede contaminarse el aire de entrada con esa niebla.

El grado al cual puede afectar la dirección del viento aumenta dependiendo de la relación de la velocidad de descarga de la torre ( $V_j$ ) respecto a la velocidad del viento ( $V_a$ )

## INFLUENCIAS EXTERNAS SOBRE EL FUNCIONAMIENTO DE LA TORRE

- Interferencia:

Sumideros de calor ubicados cerca de una torre de enfriamiento pueden "Interferir" con el desempeño térmico de la misma.

Estas interferencias pueden ser causadas por otras instalaciones de la planta u otros equipos.

Muchas veces consisten de contribución térmica del efluente de otra torre de enfriamiento cercana.

## INFLUENCIAS EXTERNAS SOBRE EL FUNCIONAMIENTO DE LA TORRE

- **Paredes de la torre**

## RECOMENDACIONES

- Las temperaturas de bulbo húmedo de diseño recomendadas han sido publicadas para diferentes áreas geográficas en varias publicaciones, una de ellas es "Engineering Weather Data"

Muchas veces es recomendable tomar estos datos y compararlos con los obtenidos por mediciones locales en el área de interés. La diferencia entre estas lecturas justificará una corrección para la temperatura de bulbo húmedo de diseño.

Cuando no se puedan efectuar tales mediciones es recomendable incrementar la temperatura de bulbo húmedo en 1 °F.

## RECOMENDACIONES

- A menos que la ubicación de la torre este limitada, esta debe ubicarse de manera tal que la descarga de la torre no este ubicada del mismo lado que la admisión de aire a la misma.

Esto garantiza que no ocurra recirculación debida a las corrientes de viento.

- Cuando sea inevitable la recirculación la temperatura de bulbo húmedo de diseño determinada en la recomendación inicial debe incrementarse aun más 1 °F para una torre de tiro inducido y 2 °F para una torre de tiro forzado.

## Condiciones normales de circulación del agua

- pH entre 6 y 8
- Contenido de cloruro (como NaCl) por debajo de 750 ppm
- Contenido de sulfato ( $\text{SO}_4$ ) por debajo de 1200 ppm
- Contenido de bicarbonato de sodio por debajo de 200 ppm
- Ningún contaminante apreciable
- Si se utiliza cloro debe añadirse de manera intermitente, con una cantidad libre residual que no exceda 1 ppm, mantenido por cortos periodos de tiempo.

## OTROS CALCULOS EN TORRES DE ENFRIAMIENTO

- VELOCIDAD DE EVAPORACION DE AGUA
- VELOCIDAD DE RECIRCULACION DE AGUA
- PERDIDAS POR ARRASTRE DE AGUA POR PARTE DEL AIRE, PURGA, FUGAS.
- CICLOS DE CONCENTRACION DEFINIDOS COMO LA RELACION DE REPOSICON A PURGADO.
- TIEMPO POR CICLO DEFINIDOS COMO LA CAPACIDAD DE LA TORRE ENTRE LA VELOCIDAD DE RECIRCULACION
- VIDA MEDIA CAPACIDAD/PURGA
- REPOSICION

## OTROS CALCULOS EN TORRES DE ENFRIAMIENTO

- VELOCIDAD DE EVAPORACION DE GUA  
 $\Delta T \text{ (}^{\circ}\text{F)} / 1000$
- REPOSICION = EVAPORACION + PERDIDAS
- PERDIDAS = PURGA + ARRASTRE + FUGAS
- CICLOS = REPOSICION/PURGA
- PURGA = EVAPORACION/(CICLOS-1)
- TIEMPOS POR CICLO = CAPACIDAD / VELOCIDAD DE RECIRCULACION
- VIDA MEDIA = CAPACIDAD / PURGA \*(1/60)
- REPOSICION = EVAPORACION\*CICLOS/(CICLOS-1)