

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL**



## **“EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO INDUCIDO FLUJO CONTRACORRIENTE”**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTADO POR:  
LUIS ANTONIO SOLES VALDIVIA**

**LIMA – PERÚ  
2013**

## **DEDICATORIA**

A Dios.

A mis Padres, por todo el amor, por lo enseñado y su apoyo incondicional.

A mis hermanas, por ser mi ejemplo a seguir desde muy pequeño.

A Cindy, por su amor infinito, creer y apoyarme en este camino.

## ÍNDICE

<b>Capítulo I: Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción	1
<b>Capítulo II: Marco teórico</b>	<b>3</b>
2.1 Torre de enfriamiento	3
2.2. Consideraciones teóricas	4
2.3. Tipos de torres de enfriamiento	12
2.3.1. Torres de tiro mecánico	12
2.3.2. Torres de circulación natural	14
2.4. Partes de una torre de enfriamiento	15
2.5. Psicrometría	23
2.6. Curva de demanda de una torre de enfriamiento	29
2.7. Curva característica de una torre de enfriamiento	29
2.8. Método de curvas características por el criterio de Merkel	32
<b>Capítulo III: Evaluación de desempeño de una torre de enfriamiento</b>	<b>34</b>
3.1. Principio de funcionamiento	34
3.2. Datos básicos de diseño	36
3.3. Cálculos	55
<b>Capítulo IV: Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>65</b>
4.1. Conclusiones	65
4.2. Recomendaciones	65
<b>Capítulo V : Bibliografía</b>	<b>67</b>
<b>Capítulo VI : Apéndice</b>	<b>69</b>
Apéndice N ° 1: Propiedades termodinámicas de vapor	69
<b>Glosario</b>	<b>71</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla N° 01:</b> Parámetros de diseño de la torre de enfriamiento en estudio	36
<b>Tabla N° 02:</b> Aditivos químicos para la torre de enfriamiento	39
<b>Tabla N° 03:</b> Valores promedios mensuales de evaluación de la torre de enfriamiento	40
<b>Tabla N° 04:</b> Parámetros de control de las principales líneas de la torre	44
<b>Tabla N° 05:</b> Límites recomendados para los parámetros de control de la torre	55
<b>Tabla N° 06:</b> Resultado con los parámetros de diseño de la torre	58
<b>Tabla N° 07:</b> Resultado con los parámetros de campo de la torre	59
<b>Tabla N° 08:</b> Resultado mensual del estudio de eficiencia en la torre de enfriamiento	62

## RESUMEN

El presente Informe de Suficiencia, trata sobre la evaluación de desempeño de una torre de enfriamiento de tiro inducido con flujo en contracorriente, existente en una refinería de petróleo. La función principal de la referida torre es el enfriamiento de las aguas procedentes de los trenes de intercambiadores de calor pertenecientes a los condensadores de las distintas torres de destilación.

En primer lugar, se procede a evaluar el funcionamiento de la torre a partir de los datos registrados. Luego, se realiza la comparación entre los datos obtenidos en campo con los datos de diseño, para que posteriormente, se realice el recalcado del dispositivo de enfriamiento y, finalmente, proceder a determinar el desempeño de la torre de enfriamiento.

A partir de los resultados obtenidos, se propone posibles mejoras que conlleven a la optimización de los costos de operación y mantenimiento de la unidad.

## **Capítulo I: Introducción**

### **1.1 Introducción**

La industria utiliza grandes cantidades de agua para enfriar equipos y procesos de producción, siendo este recurso hídrico cada vez más escaso. En ese sentido, resulta necesario conservar este recurso, donde una de los mecanismos es recirculando la mayor parte posible para usarlo nuevamente, tantas veces como sea posible. Para lograr lo señalado es necesario un sistema que permita el intercambio de calor de un líquido caliente hacia el agua de enfriamiento, lo cual permita en el proceso una pérdida mínima de agua. En consecuencia, es óptimo el uso de una torre de enfriamiento.

Las torres de enfriamiento son ampliamente empleadas en las industrias, por ejemplo, como caudales del orden de decenas de miles de metros cúbicos de agua al día. Las torres de enfriamiento regulan el proceso de enfriamiento mediante la evaporación controlada, reduciendo así la cantidad de agua consumida. El uso de torres de enfriamiento permite la reutilización del agua empleada para retirar el calor de procesos químicos o industriales. Por ende, consumir menos agua significa un ahorro económico para el sector industrial; asimismo, un menor impacto para el medio ambiente ya que se verterá menos efluentes, los cuales incorporan productos químicos empleados en su tratamiento.

Por consiguiente, el presente informe trata sobre la evaluación de desempeño de una torre de enfriamiento de tiro inducido con flujo en contracorriente de la planta de proceso de una refinería de petróleo.

A partir de ello, los objetivos de la evaluación de la torre de enfriamiento son los siguientes:

Hallar la eficiencia de la torre de enfriamiento.

Comparar los datos obtenidos en campo con los datos de diseño de la torre de enfriamiento.

Generar programas de mantenimiento predictivo que garantice sostenibilidad futura del sistema.

Proponer mejoras en la torre de enfriamiento analizando ciertas variables del proceso.



## Capítulo II: Marco Teórico

### 2.1 Torre de enfriamiento

Una torre de enfriamiento (ver gráfico N°1) es una torre en la cual el agua caliente es enfriada por contacto directo con una corriente de aire frío. El enfriamiento sufrido por el agua se basa en la transferencia combinada de masa y calor al aire que circula por el interior de la torre.

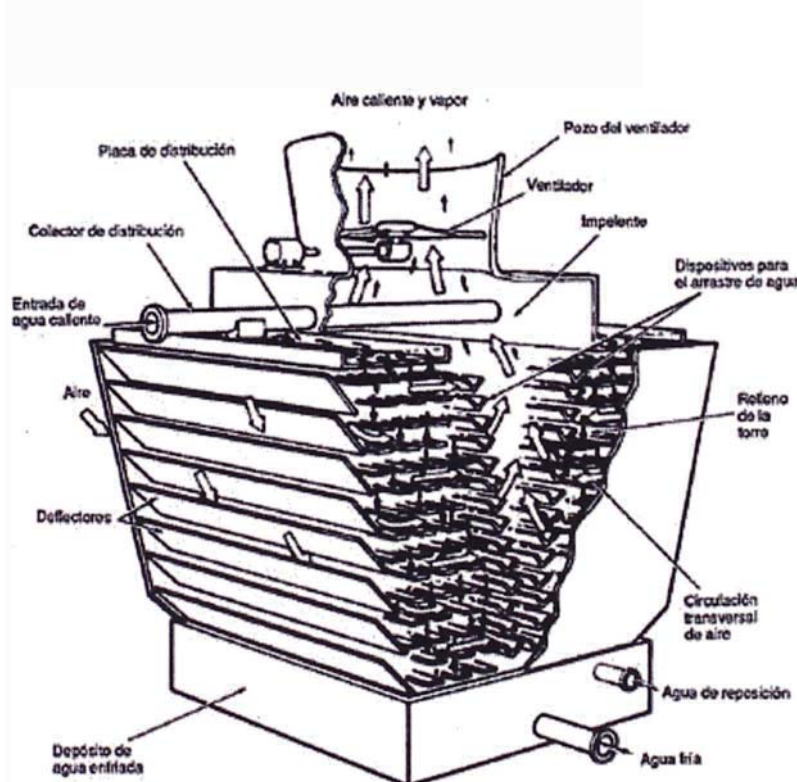


Gráfico N° 01: Torre de enfriamiento [7]

El enfriamiento ocurre por transferencia de masa (evaporación) y, por la transferencia de calor sensible y calor latente del agua al aire. Por lo cual, la temperatura y humedad del aire aumentan, mientras que la temperatura del agua descende. La rapidez de la transferencia de masa es generalmente pequeña, por ello, la variación de temperatura es pequeña.

El objeto que se persigue en la torre es que la gota esté el mayor tiempo posible en contacto con el aire, lo cual se logra con la altura de la misma y además interponiendo obstáculos (el relleno), que la van deteniendo y al mismo tiempo la van fragmentando facilitando más el proceso evaporativo. En los nuevos sistemas, los obstáculos en lugar de romper la gota, hacen que se forme una película muy delgada en donde se lleva a cabo el mismo proceso.

En términos generales, podemos decir que la capacidad de enfriamiento de una torre es una combinación de todas las variables involucradas en el diseño y selección de la misma, lo cual nos indica la cantidad de agua que enfría en condiciones de operación comparada con las condiciones de diseño, esto es entonces, el equivalente de la eficiencia térmica.

## 2.2 Consideraciones teóricas

### A. Operación Adiabática:

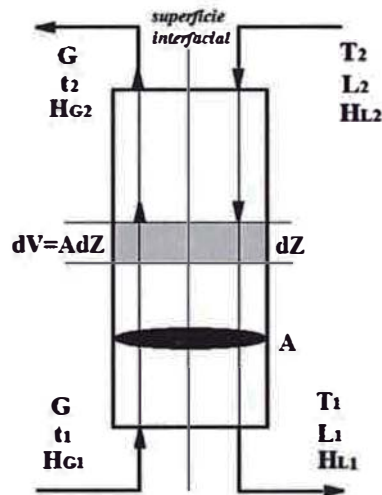
**Enfriamiento de un líquido:** El enfriamiento sucede por la transferencia de calor sensible y, también, por evaporación. La aplicación principal es el enfriamiento de agua por contacto con el aire atmosférico (enfriamiento de agua).

[1]

El agua, entibada por el paso a través de intercambiadores de calor, condensadores y similares, se enfría por contacto con el aire atmosférico para ser utilizada nuevamente. El calor latente del agua es tan grande que una cantidad pequeña de evaporación produce grandes efectos de enfriamiento.

Considerando la torre de enfriamiento a contracorriente que se muestra en el gráfico N° 2. El aire ingresa a la temperatura  $t_1$ , por el fondo de la torre y sale por la parte superior a una temperatura  $t_2$ . El agua entra por la parte superior a la temperatura  $T_2$  y sale por el fondo a la temperatura  $T_1$ . La velocidad másica del aire es  $G$ , la masa del aire libre de vapor por hora y por unidad de la sección

transversal de la torre. Las velocidades másicas del agua a la entrada y a la salida son, respectivamente,  $L_2$  y  $L_1$ . En la superficie de contacto gas- líquido, la temperatura es  $T_i$  y la humedad  $Y_i$ .



**Gráfico N° 02: Proceso general de humidificación**

**Balance de Masa:**

En el gráfico N° 2, se muestra una torre de área transversal unitaria, donde se realiza un balance de masa para el flujo de aire y agua en contracorriente, en consecuencia:

$$dL = G dY$$

$$L_2 - L_1 = G(Y_2 - Y_1) \quad (1)$$

Donde:

$L$  : Flujo másico del agua, kg/h.m<sup>2</sup>

$G$  : Flujo másico del aire, kg/h.m<sup>2</sup>

$Y$  : Humedad absoluta, masa vapor/masa aire seco, kg/kg

Donde los sufijos 1 y 2, representan condiciones de entrada y salida de la torre respectivamente.

Considerando que la carga  $G$  del aire permanece constante a través de ella debido a que está basada únicamente en el aire seco, sin embargo, como las pérdidas de saturación del agua al aire ascienden a menos del 2% del agua circulada, por lo tanto, el flujo de agua circulada en la torre puede ser *considerada constante* sin introducir un error serio [6].

#### **Balance de Energía:**

Se realiza un balance de energía para una sección corta de la torre  $dZ$ :

$$G dH_G = d(LH_L) \quad (2)$$

Donde:

$L$  : Flujo másico del agua, kg/h.m<sup>2</sup>

$G$  : Flujo másico del aire, kg/h.m<sup>2</sup>

$H$  : Entalpía, Kcal/kg

$G, L$  : Perteneciente al aire y agua respectivamente.

Puesto que la variación en la velocidad del líquido en la torre es sólo de 1 a 2%, se supone que  $L$  es constante.

$$G dH_G = LC_L dT_L \quad (3)$$

Donde:

$C_L$  : Capacidad calorífica del agua, J/ kg. °C

$T$  : Temperatura del agua, °C

La variación en la entalpía del gas es la variación en el calor sensible más la variación en la humedad multiplicada por el calor de vaporización.

$$dH_G = C_s dt_G + \lambda_0 dY \quad (4)$$

Donde:

$C_s$  : Calor húmedo, capacidad calorífica de una mezcla vapor-aire, J/ kg. °C

$t$  : Temperatura del aire, °C

$\lambda_0$  : Calor de vaporización a 32°F.

Multiplicando a la ecuación 4 por G, se tiene:

$$G dH_G = G C_s dt_G + G \lambda_0 dY = L C_L dT_L \quad (5)$$

El balance global de energía para la torre resulta de integrar la ecuación 5:

$$G(H_{G2} - H_{G1}) = L C_L (T_2 - T_1) \quad (6)$$

La entalpía del aire saturado es:

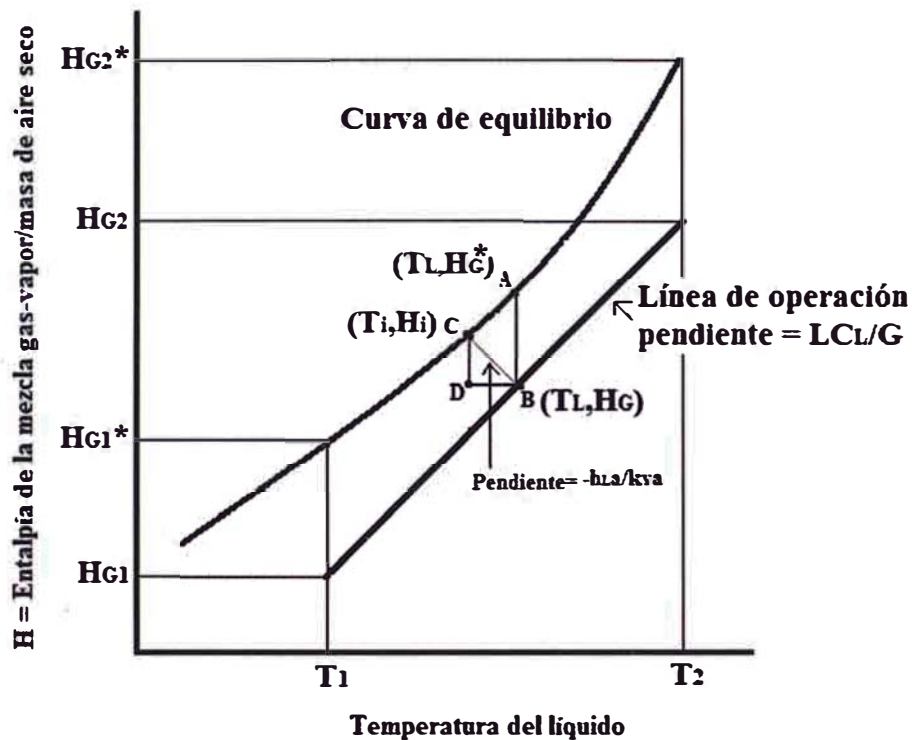
$$H_{G_{sat}} = C_s (t_G - 32) + \lambda_0 Y \quad (7)$$

En un punto intermedio de la torre, el balance de entalpía es:

$$G(H_{G2} - H_G) = L C_L (T_2 - T_L) \quad (8)$$

Este balance de energía puede representarse graficando la entalpía del gas  $H_G$  vs  $T_L$ , como se ve en el gráfico 3. Donde la “línea de operación” representa la ecuación 6, y pasa a través de los puntos que representan las condiciones finales

de los dos fluidos. La línea es recta con pendiente  $LC_L/G$ . La curva en el equilibrio se grafica para las condiciones del gas en la interfase gas-líquido, es decir, la entalpía del gas saturado a cada temperatura (ecuación 7).



**Gráfico N° 03: Diagrama de operación de una torre de enfriamiento**

La velocidad de la transferencia del calor sensible del agua a la superficie de contacto es:

$$LC_L dT_L = h_L a_H (T_L - T_i) dZ \quad (9)$$

Donde:

$h_L a_H$ : coeficiente volumétrico de transferencia de calor para el líquido.

La velocidad de transferencia de calor de la superficie de contacto al gas es:

$$G C_s dt_G = h_G a_H (T_i - T_G) dZ \quad (10)$$

Donde:

$h_G a_H$ : coeficiente volumétrico de transferencia de calor para el gas.

La velocidad de transferencia de masa del vapor de agua es:

$$G dY = k_Y a_M (Y_i - Y) dZ \quad (11)$$

Donde:

$a_H, a_M$  : Superficie interfacial específica para la transferencia de calor y masa respectivamente,  $m^2/m^3$

$k_Y$  : Coeficiente de transferencia de masa del aire,  $kg/m^2.h$

Multiplicando a la ecuación 11 por  $\lambda_o$ , se tiene:

$$G \lambda_o dY = k_Y a_M \lambda_o (Y_i - Y) dZ \quad (12)$$

Al combinar las ecuaciones 10 y 12, se obtiene:

$$G(C_s dt_G + \lambda_o dY) = [h_G a_H (T_i - T_G) + \lambda_o k_Y a_M (Y_i - Y)] dZ \quad (13)$$

Para el sistema aire - vapor de agua:  $h_G/k_Y C_s = 1$ , relación de Lewis, y considerando:

$a_H = a_M = a$ , en la ecuación (13) se tiene:

$$G(C_s dt_G + \lambda_o dY) = k_Y a [(C_s t_i + \lambda_o Y_i) - (C_s t + \lambda_o Y)] dZ \quad (14)$$

El factor  $(C_s t + \lambda_o Y)$  es la entalpía,  $H$ , del aire húmedo expresado en J/kg de aire seco. La ecuación 14 puede ser escrita como:

$$GdH_G = k_Y a [H_i - H_G] dZ \quad (15)$$

La relación anterior muestra que el flujo de calor transferido por el agua es proporcional a la diferencia de entalpía,  $H_i$ , de aire saturado con agua a la temperatura interfacial y la entalpía,  $H_G$ , de aire a la temperatura  $t$  y humedad  $Y$ .

Del gráfico N° 3, el punto C mostrado en la curva de equilibrio, representa las condiciones en la interfase  $H_i$  y  $T_i$ ; la distancia CD representa la fuerza motriz de entalpía  $(H_i - H_G)$  dentro de la fase gaseosa. La integración gráfica de la ecuación 15 permite calcular la altura empacada  $Z$  y el número de unidades de transferencia de entalpía de la película del gas,  $N_{t_G}$ .

$$N_{t_G} = \int_{H_{G1}}^{H_{G2}} \frac{dH}{(H_i - H)} = \frac{k_Y a}{G} \int_0^z dz = \frac{k_Y a Z}{G} \quad (16)$$

La ecuación anterior se puede expresar como:

$$N_{t_G} = \int_{H_{G1}}^{H_{G2}} \frac{dH}{(H_i - H)} = \frac{H_{G2} - H_{G1}}{(H_i - H)_{av}} \quad (17)$$

En donde la altura de una unidad de transferencia de entalpía del gas es  $H_{t_G} = G/k_Y a$ . Se prefiere  $H_{t_G}$  en lugar de  $k_Y a$ , como una medida del comportamiento del empaque, puesto que depende menos de los flujos y tiene dimensión de longitud. Por lo tanto [1]:

$$z = H_{t_G} N_{t_G} \quad (18)$$



Del gráfico N° 3, la distancia vertical AB ó  $(H^* - H_G)$  representa la fuerza impulsora de la ecuación 19. Esto requiere de su coeficiente global correspondiente, lo cual lleva a números y alturas globales de las unidades de transferencia:

$$z = H_{toG} N_{toG}$$

$$N_{toG} = \int_{H_{G1}}^{H_{G2}} \frac{dH}{(H^* - H)} = \frac{K_Y a Z}{G} = \frac{Z}{H_{toG}} \quad H_{toG} = \frac{G}{K_Y a} \quad (19)$$

Donde:

$K_Y$  : Coeficiente global de transferencia de masa del aire, kg/m<sup>2</sup>.h

En la industria para torres de enfriamiento de agua, se utiliza con frecuencia otra forma de la ecuación 19:

$$G \int_{H_{G1}}^{H_{G2}} dH = L C_L \int_{T_1}^{T_2} dT \quad y \quad G \int_{H_{G1}}^{H_{G2}} dH = K_Y a (H_G^* - H_G) \int_0^Z dZ$$

Combinando ambas relaciones y fijando  $C_L = 1$  para el agua, se tiene:

$$n_d = \frac{K_Y a Z}{L} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{(H_G^* - H_G)} \quad (20)$$

donde  $n_d$  representa el número de unidades de difusión y  $H_G^*$  es la entalpía del aire saturado a la temperatura del agua, T.

El uso generalizado de la ecuación 20 que considera la diferencia del potencial de entalpía como la fuerza impulsora para torres de enfriamiento fue sugerido por Merkel en 1925.

## 2.3 Tipos de torre de enfriamiento

La clasificación más usual de torres de enfriamiento, se basa en *el medio con el que se les suministra el aire* a la torre. En base a este concepto, se puede clasificar en:

### 2.3.1 Torres de tiro mecánico

En las torres de tiro mecánico el aire se mueve por medio de ventiladores, la posición del ventilador indica si la torre es de tiro inducido o forzado. Las torres de tiro inducido aspiran aire por la torre, mientras que las torres de tiro forzado lo impulsan a través de la misma. Algunas de estas torres se muestran en los gráficos N° 4,5,6. Estas torres permiten una mayor carga de agua, empaques llenos más compactos y, por tanto, torres más pequeñas, a la vez que se puede lograr una mayor aproximación a la temperatura húmeda, pero con el inconveniente de mayores costos de mantenimiento y mayor peligro de averías. Tenemos:

- A. **Torres de tiro inducido:** Los ventiladores están a la salida del aire, generalmente en la parte superior de la torre. Son empleados para grandes caudales. Se ha tomado en cuenta el sentido de las corrientes aire-agua, pueden ser:

*Torres de flujo en contracorriente:* Existe menor riesgo de que se produzca recirculación del aire. Térmicamente son más eficientes que las torres de flujo cruzado.

*Torres de flujo cruzado:* El aire fluye horizontalmente. Ofrecen menor resistencia al flujo de aire (lo que reduce el consumo de energía de los ventiladores), requieren más espacio, la entrada de aire puede abarcar toda la altura de la torre, la cual es por tanto, de baja altura, lo que reduce la altura de bombeo, los elementos mecánicos y el sistema de distribución tienen un acceso más fácil. También pueden ser de tiro forzado (estando los ventiladores del lado de la entrada de aire).

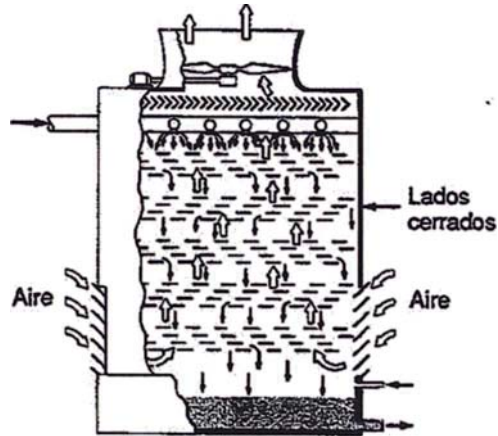


Gráfico N° 04: Tiro inducido, torre contracorriente [7]

Comparando ambas, las torres de tiro inducido cruzado presentan la ventaja de menor resistencia a través del empaque, por lo tanto, menor pérdida de tiro y velocidades de aire superiores, menor potencia y estructuras más bajas.

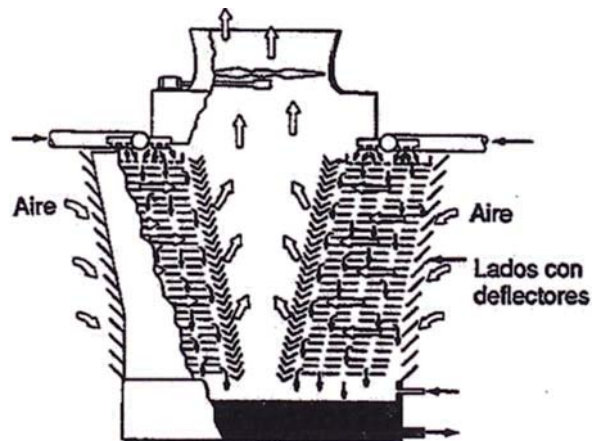


Gráfico N° 05: Tiro inducido, torre tipo cruzado [7]

- B. Torres de tiro forzado:** Los ventiladores se colocan a la entrada de aire de forma que lo impulsan a través del relleno. Debido a que la presión de velocidad convertida en presión estática realiza un trabajo útil, y, el ventilador trabaja con aire frío de más densidad que en el caso de tiro inducido, estas torres son más eficientes que las torres de tiro inducido.

Por otro lado, el tamaño del ventilador está muy reducido, por lo cual, se necesita un gran número de ventiladores pequeños o a mayores velocidades que en una torre de tiro inducido, lo cual conduce a mayores niveles de ruido y costos de mantenimiento.

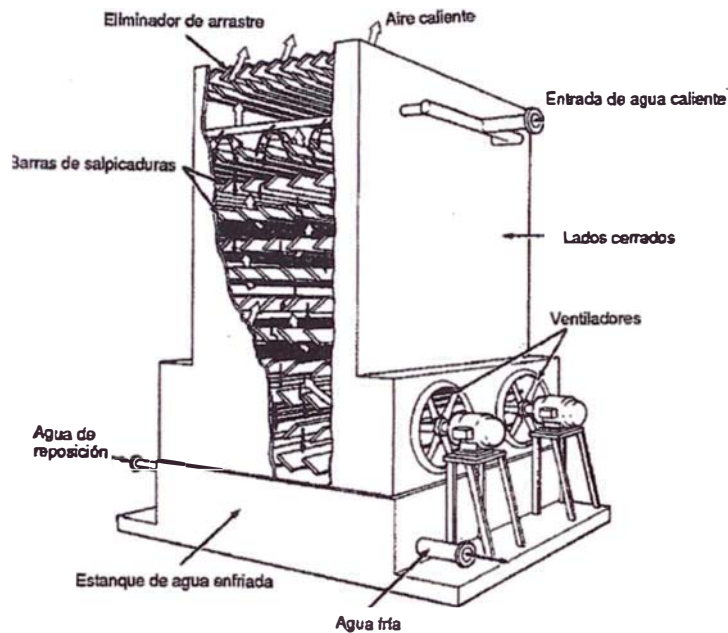


Gráfico N° 06: Tiro forzado [7]

### 2.3.2 Torres de circulación natural

- A. **Atmosférica:** El agua cae en flujo cruzado con respecto al movimiento horizontal del aire, lo que produce un efecto de contracorriente debido a las corrientes de convección producidas por el agua caliente.

Dentro de este tipo de torres puede distinguirse aquellas que contienen relleno de goteo, que son más eficientes que las que no tienen ningún relleno. Las torres atmosféricas constituyen una mínima parte de las torres existentes, a pesar de su larga vida y bajos costos de mantenimiento (debido a que no cuenta con partes mecánicas). No se produce recirculación del aire utilizado, son altas y estrechas.

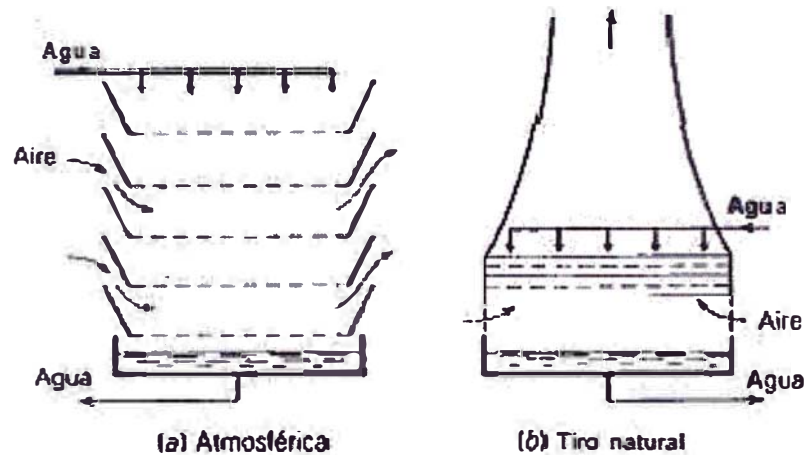


Gráfico N° 07: Tipos de torre de circulación natural [1]

**B. Tiro natural:** El relleno se encierra en una estructura con forma de chimenea hiperbólica, con persianas de entrada de aire en su interior. El aire es inducido a través de la torre, debido a la diferencia de densidades existentes entre el aire húmedo caliente y el aire atmosférico más denso. El relleno puede ser de goteo o de película. Debe de tener una sección transversal grande, debido a la baja velocidad con que el aire circula comparadas con las del tiro mecánico.

Tienen un coste inicial elevados, sin embargo, bajos costos de mantenimiento. Mejor rendimiento que las torres atmosféricas.

Debido a la gran altura de estas torres se consigue una mejor dispersión de la nube de vapor, ventaja que reduce la formación de niebla al nivel del piso y la recirculación de vapores húmedos y calientes.

#### 2.4 Partes de una torre de enfriamiento

Los elementos básicos de una torre de enfriamiento se detallan a continuación:

**A. Estructura:** Es el esqueleto portante de la torre. Se construye en hormigón, metálica, madera tratada o plástico.

**B. Empaque:** Es el corazón de la torre de enfriamiento, la función del empaque es aumentar la superficie disponible en la torre, ya sea distribuyendo el líquido sobre una gran superficie o retardando la caída de las gotas a través del aparato. En las torres de enfriamiento debido a los requerimientos de grandes volúmenes de aire y pequeñas caídas de presión permitidas se consideran. Existen dos tipos básicos de empaque: de salpicadura y laminares.

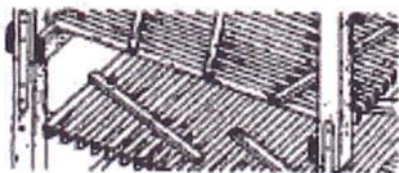
Los empaques de salpicadura (gráfico N° 8), están formados por parrillas constituidas por listones de diversos materiales: madera (especialmente tratada), poliestireno, polietileno u otros tipos de plásticos, aunque a veces para casos especiales se utilizan aluminio, materiales cerámicos, etc. Estos listones son apilados en plataformas y separados entre sí a distancias variables que rompen al agua en gotas menudas a medida que caen de plataforma en plataforma. Las torres con empaques de salpicadura son las más utilizadas en instalaciones industriales.



**LISTONES FINOS** para torre de corriente tipo cruzado que ofrecen una resistencia mínima al flujo de aire. La colocación de los pisos, a poca distancia de separación, disminuye la altura de la torre.



**BARRAS IRREGULARES** colocadas en pisos girados 90° con respecto a los pisos contiguos por encima y por debajo. Su gran superficie divide el agua.



**BARRAS DE SECCIÓN CUADRADA**, doblemente escalonadas en forma de rombo, que presentan una superficie de mojado máxima al flujo de aire ascendente.



**RETÍCULOS** de plástico de gran impacto moldeados por inyección, que se colocan formando pisos de relleno de salpicadura o se apilan para formar rellenos de película.

**Gráfico N° 8: Rellenos de tipo salpicadura [7]**

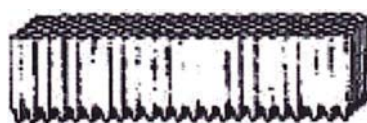


En los empaques de tipo laminar (gráfico N° 9), el agua se extiende en infinidad de láminas delgadas de gran superficie, el empaque ideal, debe tener desniveles que permitan humedecer bien la superficie adsorbente. De lo contrario el agua tiende a fluir en pequeño riachuelo y desde que la película de agua se adhiere a la superficie del empaque no hay gotas de agua que impidan el flujo de aire a través de la torre. De esta forma se favorece el manejo de una mayor velocidad y volumen de aire, así como alturas de empaque y alturas de bombeo menores.

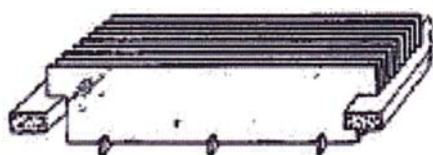
Estos empaques tienen alto rendimiento por metro cuadrado de superficie ocupada, pero son caros. Los materiales frecuentemente utilizados en la fabricación de este tipo de empaque deben ser resistentes y ligeros en peso, tales como: celulosa, amianto-cemento, plásticos, acero galvanizado, aluminio, etc., y en formas de chapas onduladas.



**TABLILLAS DE MADERA** colocadas en capas perpendiculares, que exponen bordes estrechos al aire ascendente y superficies laterales anchas cubiertas de una película de agua.



**LÁMINAS DE CELULOSA** reforzadas de plástico que se asemejan a cartón corrugado con puntas serradas en la parte inferior para que se mojen de forma uniforme.



**LÁMINAS DE ASBESTO Y CEMENTO** de 5 mm de espesor, que presentan una superficie absorbente irregular. Se apilan dejando un espacio horizontal de 19 mm.



**LÁMINAS ONDULADAS** de metal o plástico que mantienen una capa relativamente gruesa de agua en cada hueco para poder drenar los sólidos.

### Gráfico N° 9: Rellenos de tipo película o laminar [7]

En general, todos los empaques deben tener un bajo coste y ser fácilmente instalados, libertad de canalización del aire o del agua, alto índice de transferencia de masa y calor, oponiendo poca resistencia al flujo de aire y garantizando una gran resistencia al desgaste.

- C. Eliminador de gotas o arrastre:** Para evitar, al menos parcialmente el arrastre de gotas de agua por el aire caliente que sale de la torre, se utilizan los llamados eliminadores de gotas. Los eliminadores de gotas, situados por encima del sistema de distribución actúan generalmente haciendo variar la dirección del aire caliente separándose así el agua de arrastre o producto de condensación, que se va acumulando en los eliminadores y que cae de nuevo en forma de películas delgadas sobre el empaque.

Con un buen diseño, las pérdidas de agua no deben exceder al 0.2% del agua recirculada sobre la torre de enfriamiento evitando daños en instalaciones próximas; además, también desempeñan otras muy importantes funciones: al ofrecer mínima resistencia al flujo del aire, crean una depresión en el espacio que hay entre ellos y los ventiladores, consiguiendo así que el flujo de aire a través del empaque sea uniforme en su tendencia a nivelar la diferencia de presiones; retención de tratamiento químico y prevención de manchas por aditivos químicos, como cromato. Las formas más comunes se muestran en el gráfico N° 10, empleándose uno, dos, tres o más baffles dependiendo de la necesidad de cada torre. Los distribuidores de agua rotatorio tienen un eliminador especial adherido a cada área [6].

Los materiales utilizados para estos eliminadores de gotas deben resistir una atmósfera corrosiva y suelen ser de madera tratada, plásticos, chapa galvanizada, aluminio, fibra de vidrio, asbesto con impregnaciones de caucho, plástico o amianto. Los eliminadores rotatorios son de hojas metálicas con bordes de arrastre de neopreno.

- D. Distribuidor de agua:** Especial cuidado se debe tener en el diseño del sistema de distribución del agua, los requerimientos para los sistemas de distribución son los siguientes [6]:

El sistema debe dispersar el agua uniformemente sobre el área superficial del empaque.



- Si es posible, el sistema debe ser de ajuste automático y manual cuando se desee operar a diferentes flujos.
- El sistema debe ser capaz de operar prolongadamente sin mantenimiento.

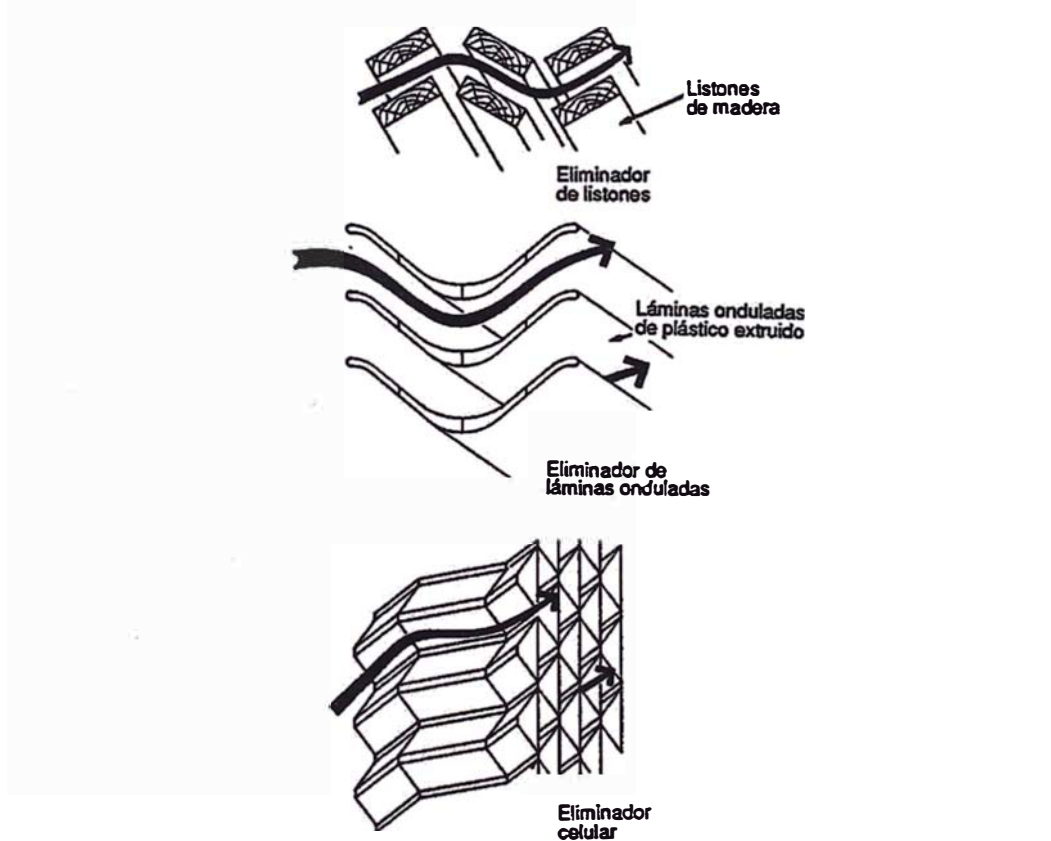


Gráfico N° 10: Eliminadores de arrastre [7]



Gráfico N° 11: Sistema de distribución de canales [7]

En los gráficos N° 12 y 14, el agua que ingresa a la torre de enfriamiento es distribuida por gravedad o bajo presión sobre los empaques. Un *sistema de distribución por gravedad*, se emplea comúnmente en torres de tiro inducido en flujo cruzado, es esencialmente un colector muy grande, llamado más comúnmente plataforma de la torre, que cubre la parte de arriba efectiva de la torre de enfriamiento (vea el gráfico N° 12A). El agua es bombeada a la plataforma y circula por gravedad a través de orificios desmontables de plástico o porcelana. Estos orificios se pueden taponar fácilmente y requieren una limpieza periódica para mantener una buena distribución de agua. Al salir agua por cada orificio, choca contra una placa de difusión, colocada justo debajo, que reparte el agua de forma uniforme sobre el relleno de la torre. Los gráficos N° 12B y 12 C, muestran un conjunto de orificio/placa de difusión y una boquilla de distribución de gran rendimiento usada en muchas torres actuales [7].

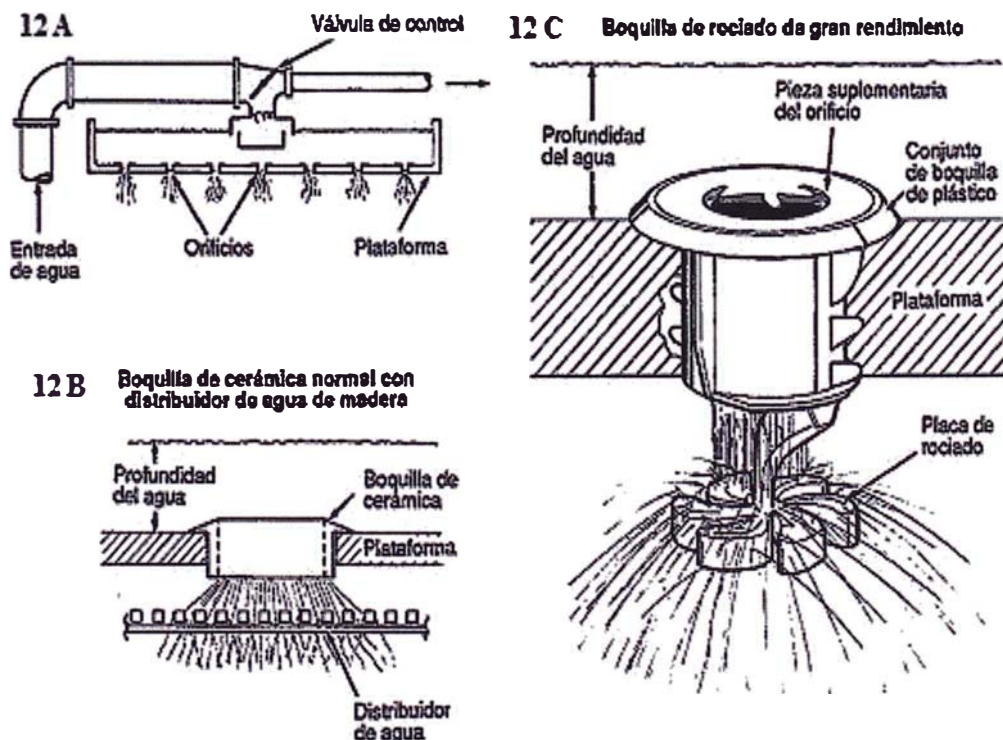


Gráfico N° 12: Componentes de la distribución de la corriente de agua tipo cruzado [7]

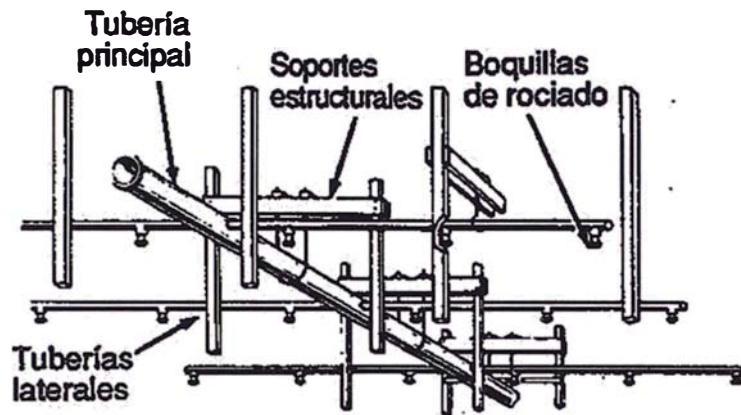


Gráfico N° 13: Sistema de rociado [7]

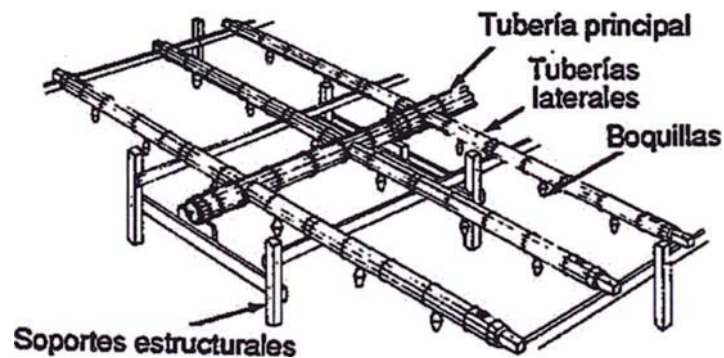


Gráfico N° 14: Sistema de rociado de baja presión hecho de madera [7]

**Boquillas de atomización**, son usadas en torres atmosféricas y empaques tipo salpicadura junto con un sistema de atrapa gotas. Manejan el agua de ingreso a baja presión, la boquilla mostrada en el gráfico N ° 12C, es del tipo cámara giratoria, con forma cónica interna y garganta de descarga con áreas concéntricas giratorias combinadas para igualar y balancear el flujo de agua.

**E. Chimeneas y Ventiladores:** En las torres de tiro inducido, que son las más utilizadas a nivel industrial, encima de los eliminadores de gotas van instalados los ventiladores, alojados en unas chimeneas, que tienen como principal función proporcionar al ventilador una cámara para un funcionamiento más efectivo y para dirigir el chorro de aire húmedo lejos de la torre, evitando en lo posible la recirculación

El diseño de estas chimeneas es importante ya que para el buen funcionamiento del ventilador es necesario que el flujo de aire que reciba sea suave, con lo que aumentará su rendimiento. Este factor es función de la forma de la chimenea, que debe seguir en su contorno una curva logarítmica o, en su defecto, elíptica, para así conseguir una recuperación de velocidad que puede suponer hasta un 20% de ahorro en la potencia teórica precisada por el ventilador. Los materiales más usados son: madera, chapa y plástico, los dos primeros por consideraciones económicas.

Los ventiladores, para controlar mejor el flujo de aire, pueden estar accionados por motores de dos velocidades, lo que permitirá ahorrar energía en el caso de necesitar menor cantidad de aire. Las palas de los ventiladores, suelen ser preferentemente de aluminio, acero galvanizado o plástico reforzado, y casi siempre orientables para poder ajustar el caudal de aire de acuerdo con las condiciones climatológicas existentes, favoreciendo el control de temperatura de agua fría. Se admite, como valor medio, que la potencia consumida por una torre de tiro inducido es de 1CV por cada 200 m<sup>3</sup>/min. de aire [6].

**F. Estanque:** Es la balsa de recolección de agua fría antes de ser bombeada de retorno a los equipos de intercambio de calor. Para torres industriales se hace en hormigón y en ellas se instalan las cimentaciones de la estructura de la torre; las torres pequeñas instaladas sobre los techos de las plantas industriales normalmente tienen estanques de metal o madera. Es importante el estudio de la capacidad de reserva del estanque, la profundidad de la

misma se establece normalmente, fijando un tiempo mínimo,  $t$ , para que el sistema pueda funcionar sin caudal de retorno, siendo por lo tanto [6]:

$$P = R \cdot t / S$$

Donde:

$P$  = Profundidad de la piscina, m.

$S$  = Superficie en planta,  $m^2$ .

$R$  = Caudal de Refrigeración,  $m^3/h$

$t$  = tiempo, h.

## 2.5 Psicrometría:

Se ocupa de la determinación de las propiedades de las mezclas de un gas y vapor. El sistema aire-vapor de agua es el que se encuentra con mayor frecuencia y por tanto se cuenta con cartas psicométricas completas para esta mezcla (gráfico N° 15). Esta carta se preparó para una presión total de 1atm (14.696 psi). En el caso de las entalpías, las condiciones de referencia utilizadas fueron de aire gaseoso y agua líquida saturada a 0°C (32°F), de tal forma que la carta puede utilizarse conjuntamente con las tablas de vapor.

La carta debe construirse de tal manera que la información sobre: humedad, saturación relativa o porcentual, volumen y calor húmedo o entalpía total, sean fáciles de obtener a partir de cantidades medidas de manera conveniente, como las temperaturas de bulbo húmedo y seco. La terminología y relaciones asociadas con la psicrometría son:

**A. Humedad Absoluta:** La humedad  $Y$  de una mezcla aire-vapor de agua se define como la masa de vapor de agua por una unidad de masa de aire seco. Esta definición de la humedad sólo depende de la presión parcial del vapor de agua en el aire y de la presión total  $P$ . Si las cantidades se expresan en moles, la relación es la humedad molal absoluta  $Y'$ .



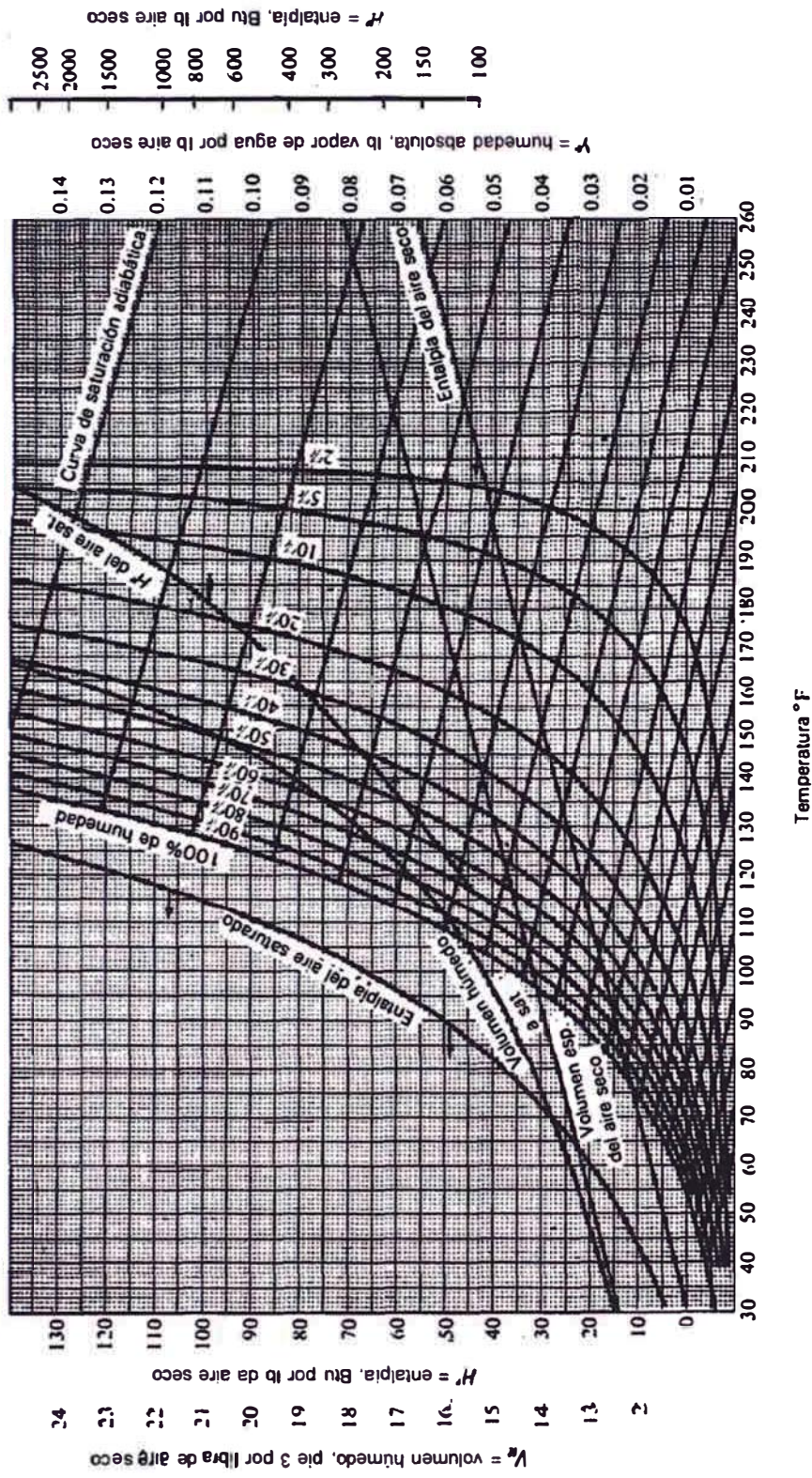


Gráfico N° 15: Carta psicrométrica [1]

En condiciones en que se aplica la ley de los gases ideales:

$$Y' = \frac{p}{(P - p)} \qquad Y = Y' \frac{M_{\text{agua}}}{M_{\text{aire}}}$$

Donde:

P : Presión total, atm

p : Presión parcial del vapor de agua, atm

$M_{\text{agua}}$  y  $M_{\text{aire}}$ : Peso molecular del agua y aire respectivamente, kg/kmol

El aire saturado es aquel en el cual el vapor de agua está en equilibrio con el agua líquida en las condiciones dadas de presión y temperatura. En esta mezcla, la presión parcial del vapor del agua en la mezcla aire-agua es igual a la **presión de vapor  $p_s$**  del agua pura a la temperatura de bulbo seco. A esta humedad absoluta se le denomina como **humedad absoluta de saturación  $Y_s$** .

**B. Porcentaje de humedad absoluta ó porcentaje de saturación:** Es la razón de la humedad absoluta a la de saturación y está dada por:

$$100 \frac{Y}{Y_s} = \frac{p(P - p_s)}{p_s(P - p)} \times 100$$

**C. Porcentaje de humedad relativa (H.R.):** Es la razón de la presión parcial del vapor de agua en aire con la presión de vapor de agua a la temperatura del bulbo seco, está dada por:

$$HR = 100 \frac{p}{p_s}$$

**D. Punto de rocío:** Es la temperatura a la cual una mezcla vapor-gas se satura cuando se enfría a presión total constante sin contacto con el líquido. Es la temperatura a la cual el agua ejerce una presión de vapor igual a la presión de vapor de agua en la mezcla dada.

**E. Calor húmedo,  $C_s$ :** Es el calor que se requiere para aumentar la temperatura de 1 kg de aire seco y su vapor en 1 °C a presión constante. Por consiguiente :

$$C_s = 1005 + 1884 Y \text{ (SI)}$$

$$C_s = 0.24 + 0.45 Y \text{ (Sistema inglés)}$$

Donde:

1005,1884 y 0.24, 0.45: Son las capacidades caloríficas del aire seco y vapor de agua en sus respectivos sistemas.

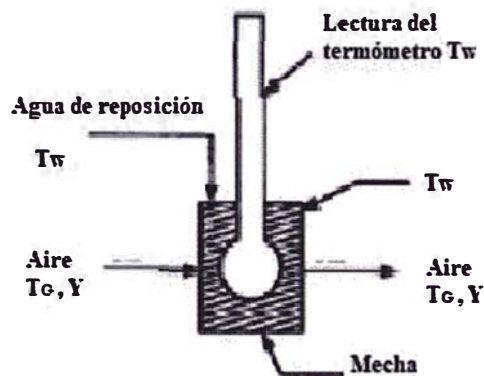
**F. Volumen húmedo,  $V_h$ :** Es el volumen total en metros cúbicos de una mezcla (aire más vapor de agua) por 1kg de aire seco más a la presión y temperatura dominantes. Cuando la masa de gas seco en una mezcla se multiplica por el volumen húmedo, se obtiene el volumen de la mezcla.

**G. Temperatura de bulbo seco:** Es la temperatura de una mezcla vapor-gas determinada en la forma ordinaria por inmersión de un termómetro en la mezcla.

**H. Temperatura de bulbo húmedo:** Es la temperatura en estado estacionario alcanzada por una pequeña cantidad de líquido que se evapora en una gran cantidad de una mezcla vapor-gas no saturada. En ciertas condiciones, dicha temperatura puede utilizarse para medir la humedad de la mezcla. Con este propósito, un termómetro cuyo bulbo



se ha cubierto con un material fibroso humedecido en el líquido, se sumerge en una corriente de la mezcla gaseosa, que se está moviendo rápidamente (gráfico N° 16). La temperatura del bulbo alcanzará finalmente un valor inferior a la temperatura de bulbo seco de la mezcla, si este último no está saturado; conocidos ambos valores se puede determinar la humedad de la mezcla.



**Gráfico N° 16: Temperatura de bulbo húmedo [3]**

Considérese una gota del líquido, como se observa en el gráfico N° 17, que se sumerge en una corriente de la mezcla aire-vapor de agua no saturada que se mueve rápidamente. Si el líquido se encuentra a una temperatura más elevada que la del punto de formación de rocío del aire, la presión de vapor del líquido será mayor en la superficie de la gota que la presión parcial del vapor en el aire, entonces, el líquido se evaporará y difundirá en el aire.

El calor latente que se requiere para la evaporación será proporcionado por el calor sensible de la gota de líquido, que entonces se enfriará. Tan pronto como la temperatura del líquido disminuye por debajo de la temperatura de bulbo seco del aire, fluirá calor del aire al líquido, a una rapidez que aumentará al incrementarse la diferencia en temperatura. Finalmente la rapidez de transferencia de calor del aire al

líquido será igual al calor necesario para la evaporación, y la temperatura del líquido permanecerá constante en algún valor bajo, la temperatura de bulbo húmedo.

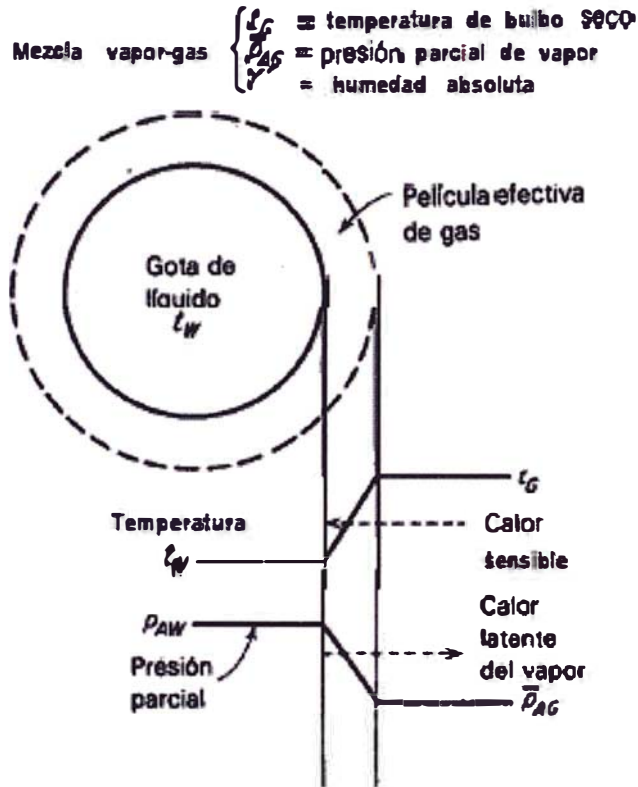


Gráfico N° 17: Teoría de la gota [1]

**I. Entalpía** La entalpía de una mezcla vapor-gas es la suma de las entalpías relativas del contenido en gas y en vapor. Consideremos una masa unitaria de un gas que contiene una masa  $Y$  de vapor a la temperatura de bulbo seco  $t$ . Si la mezcla no está saturada, el vapor está en un estado de sobrecalentamiento, y se puede calcular la entalpía con relación a los estados de referencia, gas y líquido saturado a  $t_0$ .

La entalpía del aire solo es  $C_{aire} (t - t_0)$ , y la entalpía del vapor, por masa unitaria de vapor, será  $C_{vapor} (t-t_0) + \lambda_0$ , en donde  $\lambda_0$  es el calor

latente de vaporización a la temperatura de referencia. Por tanto se tiene:

$$H = C_s(t - t_o) + Y\lambda_o$$

Con referencia a aire gaseoso y agua líquida a 0°C (32 °F), tenemos:

$$H = (1005 + 1884Y)t + 2502300Y \quad (\text{J/kg aire seco}) \quad (21)$$

$$H = (0.24 + 0.45Y)(t-32) + 1075.8Y \quad (\text{Btu/lb aire seco}) \quad (22)$$

## 2.6 Curva de Demanda de una Torre de Enfriamiento

La ecuación de Merkel, se utiliza para calcular la demanda térmica basada en el diseño de temperaturas y seleccionadas relaciones de líquido-gas (L/G). En 1967, el Cooling Tower Institute (CTI) publicó el "Blue Book" titulado "Cooling Tower Performances Curves", donde se encuentran representadas las curvas de demanda, las cuales fueron graficadas para gran alcance de temperatura y diversas condiciones de operación (gráfico N° 18).

Las curvas se grafican con la demanda térmica (KaV/L) como una función de la relación de líquido-gas (L/G). Las curvas de aproximación son los valores de la diferencia entre: la temperatura de salida del agua (CWT) y la temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada (WBT). Las curvas contienen un conjunto de 821 curvas, dando valores de KaV/L para 40 temperaturas de bulbo húmedo, 21 rangos de enfriamiento y 35 aproximaciones.

## 2.7 Curva Característica de una Torre de Enfriamiento

Actualmente, la siguiente ecuación es ampliamente aceptada y es muy útil para sobreponer sobre cada curva de demanda de la torre de

enfriamiento, desde la relación  $KaV/L$  vs.  $L/G$  es una función lineal de la curva de demanda (log-log):

$$KaV/L = C (L/G)^{-m}$$

Donde:

$KaV/L$ : Característica de la torre (número de difusión), se determina por la ecuación Merkel.

$C$  : Constante relacionada con el diseño de la torre de enfriamiento, o el intercepto de la curva característica en  $L/G = 1,0$ .

$m$  : Exponente relacionado con el diseño de la torre de enfriamiento (llamado pendiente), determina a partir de los datos de prueba.

La curva característica puede ser determinada de tres maneras, las cuales se detalla a continuación:

1. El proveedor puede suministrar dicha curva característica. En todos los casos, la pendiente de esta curva se puede tomar como la pendiente de la curva de operación de la torre de enfriamiento.
2. Mediante pruebas de campo, se determina un punto característico y se dibuja una curva característica a través del punto paralelo a la curva característica original; o una recta a través de este punto con una pendiente adecuada (-0.5 a -0.8).
3. Mediante pruebas de campo, determinar al menos dos puntos característicos a diferentes relaciones de  $L/G$ . La línea que atraviesa estos dos puntos es la curva característica. La pendiente de esta línea debe caer dentro del intervalo esperado, y sirve como un control de exactitud de la medición.

Se llama punto característico al dado tanto por “KaV/L” y “L/G”, los cuales se hallan con las ecuaciones anteriormente proporcionadas en el punto 2.2 del capítulo II.

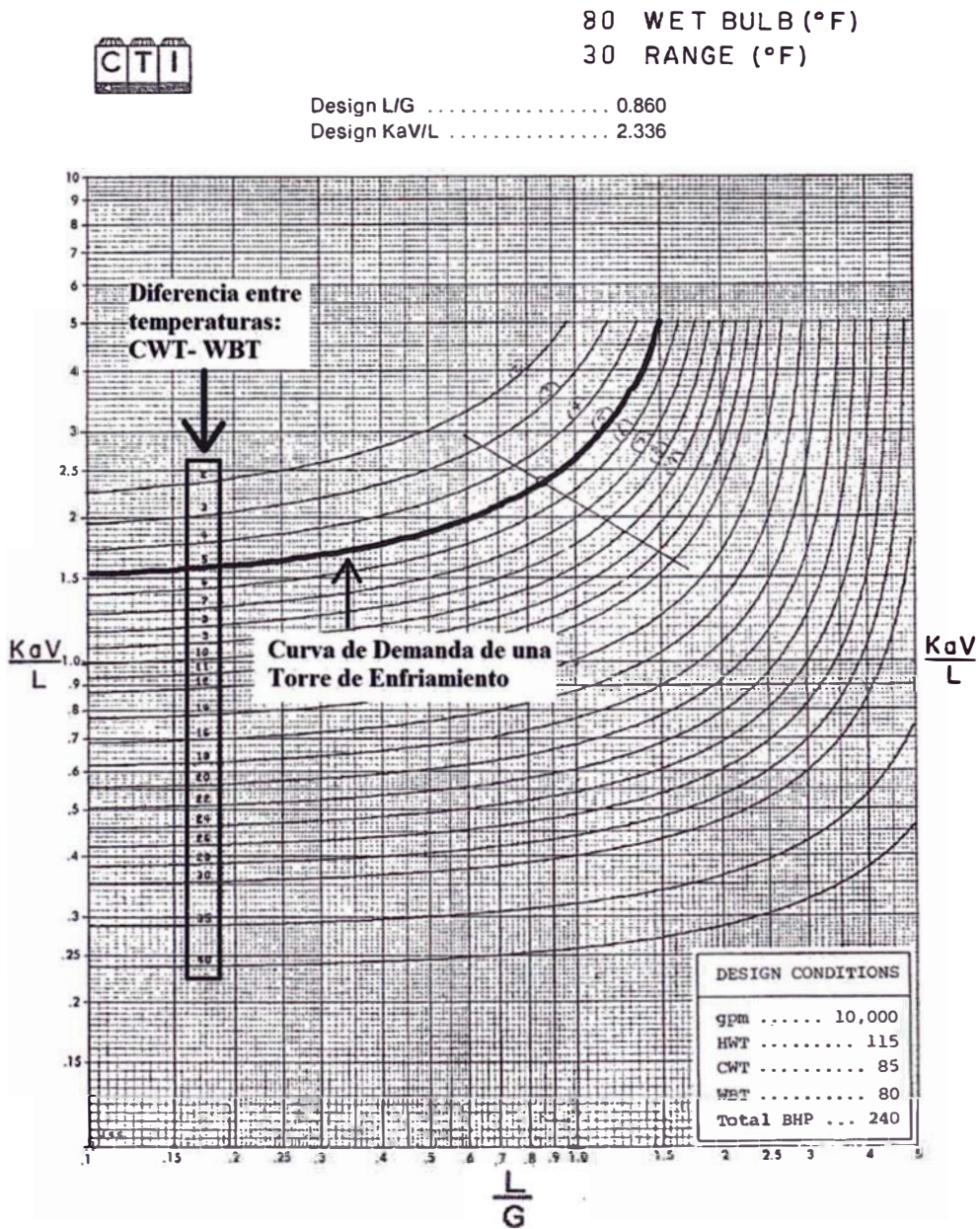


Gráfico N° 18: Curva de demanda de una torre de enfriamiento [9]

## 2.8 Método de Curvas Características por el Criterio de Merkel

Este método es gráfico, donde se utiliza una curva característica general de una torre de enfriamiento para obtener los datos requeridos por el criterio de Merkel.

Este método consiste inicialmente en localizar e interceptar los valores de diseño “ $KaV/L$ ” y “ $L/G$ ”, dicha intercepción nos da el *punto característico de diseño*. En este punto se traza una tangente con pendiente negativa de 0.6, dicha recta es denominada “**curva característica de diseño**”.

Posteriormente se localizan e interceptan los valores de “ $KaV/L$ ” y “ $L/G$ ”, de la prueba de campo, dicha intercepción nos da el *punto característico de prueba*. Por este punto se traza una tangente con pendiente negativa de 0.6, dicha recta es denominada “**curva característica de prueba**”, esta recta debe ser paralela a la curva característica de diseño. Moverse sobre esta línea paralela hasta interceptar a la curva de demanda con la aproximación de la diferencia de temperaturas de diseño del agua de salida y a la del bulbo húmedo del aire de entrada, para finalmente leer el valor de  $(L/G)_o$  que le corresponde.

A partir de estos valores se calcula el porcentaje de eficiencia de la torre de enfriamiento con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Eficiencia} = \frac{L/G_o}{L/G_{\text{diseño}}} \times 100 \quad (23)$$

Donde:

$(L/G)_o$  : Relación corregida del flujo de agua con respecto al flujo de aire.

$(L/G)_{\text{diseño}}$ : Relación de diseño del flujo de agua con respecto al flujo de aire.



80 WET BULB (°F)  
30 RANGE (°F)



	DESIGN	TEST
L/G .....	0.860	0.815
KaV/L .....	2.336	2.355

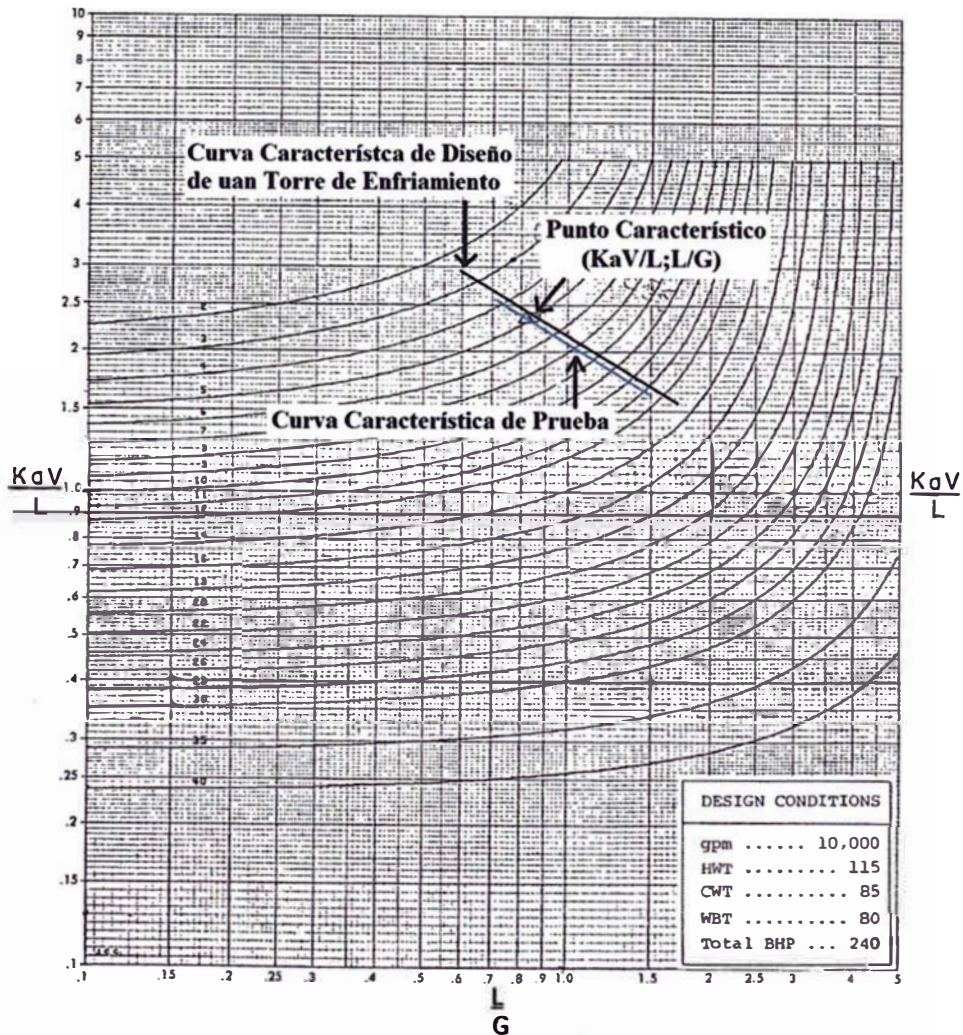


Grafico N° 19: Curva característica de una torre de enfriamiento [9]

### **Capítulo III: Evaluación de desempeño de una torre de enfriamiento de tiro inducido con flujo en contracorriente**

En el presente informe se evalúa y propone mejoras de una torre de enfriamiento de tiro mecánico inducido con flujo en contracorriente constituida por tres celdas, con un caudal de diseño de 3000 m<sup>3</sup>/h y un salto térmico en torno a los 11 °C, lo que conlleva una carga térmica, que opera entre 29 °C y 40 °C, del orden de 33000 Mcal/h. A la vista de los resultados se propondrán las posibles mejoras.

La torre de enfriamiento objeto de este informe (gráfico N° 18), tiene como propósito el enfriamiento del agua empleada como líquido refrigerante en los distintos procesos químicos, los cuales que tienen lugar en el refinado del crudo hasta una temperatura próxima a la del agua de aporte de manera que pueda ser nuevamente empleada. La instalación consta de tres celdas idénticas de tiro mecánico inducido y flujo en contracorriente.

#### **3.1 Principio de funcionamiento**

En cada celda de la torre de enfriamiento se enfría el agua de retorno caliente por la acción del aire frío que circula en contracorriente, por cesión de calor debido a su diferencia de temperatura con el aire y por evaporación de parte del agua. La velocidad de transferencia depende fundamentalmente de:

La velocidad del aire.

La diferencia de temperatura entre el agua y el aire.

El área de intercambio de calor, incrementada por el relleno de la torre.

Humedad relativa del aire.

En el proceso de evaporación y arrastre del agua se produce la permanencia en el circuito de sólidos y productos químicos. Para evitar el



aumento excesivo de su concentración, se realiza una purga continua de agua del circuito para mantener su calidad dentro de unos límites aceptables, definidos por el tipo de tratamiento a que está sometida el agua del circuito.

El proceso de evaporación, las pérdidas por arrastre y la purga, restan de forma continua un volumen considerable de agua que es necesario reponer al sistema.



**Gráfico N° 20: Torre de enfriamiento de tiro inducido**

### 3.2 Datos básicos de diseño:

**Tabla N° 1: Parámetros de diseño de la torre de enfriamiento en estudio**

---

<b>DATOS DE DISEÑO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO</b>	
<b>Caudal de diseño de agua circulante</b>	3000 m <sup>3</sup> /h
<b>Agua a filtración</b>	180 m <sup>3</sup> /h (6% del circulante)
<b>N° de celdas</b>	3
<b>Temperatura de entrada</b>	40 °C
<b>Temperatura de salida</b>	29 °C
<b>Temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada</b>	24.5 °C
<b>N° de ciclos de concentración</b>	3
<b>Perdidas por evaporación</b>	1.60%
<b>Perdidas por arrastre</b>	0,05 % del circulante
<b>Caudal de agua de aporte</b>	72 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumen de agua estimado en el circuito</b>	750 m <sup>3</sup>

---

El relleno de la torre es de tipo laminar de módulos de PVC, tipo ANCS-20 con una separación entre hojas de 20 mm. Este relleno, es autoextinguible y va apoyado sobre vigas de hormigón.

La dispersión de agua se consigue por la pulverización, sobre los platillos de los aspersores, del chorro que cae sin presión desde las toberas y que se convierte en finísima lluvia, asegurando un reparto uniforme del agua sobre la superficie de cada celda.

En un plano superior al de la distribución de agua, se encuentran los separadores de gotas. Estos separadores son de gran eficacia y reducen el arrastre de agua hacia el exterior de la torre hasta un 0.05 % del caudal circulante.

La purga del circuito de torre de enfriamiento evita una excesiva concentración de sales y sólidos en el sistema de agua de refrigeración. El caudal de agua a purgar se regula gracias al analizador de conductividad.

Los ventiladores se encuentran en la parte superior de la torre, estando los motores acoplados a los mismos mediante reductores de velocidad. El ángulo de calado de palas puede modificarse a máquina parada, dentro de los límites de la potencia del motor.

Cada celda va provista de los siguientes equipos:

Una chimenea para los ventiladores de poliéster reforzado de fibra de vidrio.

Un ventilador axial de 4.9 m. de diámetro con 6 palas de poliéster reforzado con fibra de vidrio.

Un motor eléctrico

Cada sección de la balsa está comunicada, mediante un canal conectado con la balsa de aspiración de las bombas de agua de refrigeración. El volumen de la balsa es de 350 m<sup>3</sup>. El aporte de agua bruta a la torre de refrigeración se realiza para compensar las pérdidas por arrastre y evaporación.

Los filtros de agua de enfriamiento son de arena y tienen un caudal de diseño de 90 m<sup>3</sup>/h (cada filtro), en operación normal dos filtros están en funcionamiento. El agua filtrada es devuelta a la balsa de la torre de enfriamiento.

**Sistema de aditivos:** La finalidad de este sistema es la de (partiendo de una determinada calidad del agua de aporte) obtener y mantener una calidad en el agua de refrigeración que permita una óptima transferencia de calor y una buena

conservación de los equipos y conducciones que forman el sistema de agua de enfriamiento de la planta, mediante la adición de unos productos o aditivos químicos y una purga continua en el agua de enfriamiento.

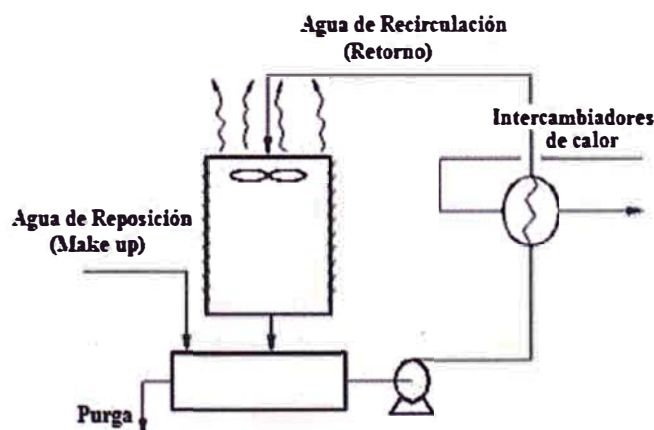
Los aditivos químicos que se agregan a la torre se muestran en la tabla N° 2.

**Selección de los datos de evaluación:** A fin de realizar este informe, se tiene los siguientes datos de las siguientes variables del proceso:

- Temperatura de entrada del agua caliente.
- Temperatura de salida del agua enfriada.
- Temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada.
- Caudal de agua de retorno.

Estos datos son del año 2011, los cuales son los valores promedios mensuales que se muestran en la siguiente tabla N° 3.

Por otro lado, la tabla N° 4 muestra los datos de los parámetros de control de las líneas principales de la torre: Reposición (Make up), Recirculación (Retorno) y Purga.



**Gráfico N° 24: Torre de enfriamiento con sus líneas principales**

**Tabla N° 2: Aditivos químicos para la torre de enfriamiento**

<b>Productos químicos (Nombre genérico)</b>	<b>Productos químicos (Nombre comercial)</b>	<b>Función</b>
<b>Biocida - oxidante</b>	Hipoclorito de sodio 11%	Control del crecimiento microbiológico a base de Cloro.
<b>Biocida - oxidante</b>	Actibrom 7342	Control del crecimiento microbiológico a base de Bromo.
<b>Inhibidor de corrosión a base de zinc</b>	Nalco 8575	Formar una película catódica a base de Zinc, para control de la corrosión.
<b>Biodispersante</b>	Nalco 73550	Control del crecimiento microbiológico (microorganismos sésiles)
<b>Dispersante inorgánico/ Estabilizante de Zinc</b>	Nalco 3DT102	Mantener las sales inorgánicas dispersas en solución y estabiliza el Zinc.
<b>Biocida - no oxidante</b>	Nalco 7338	Control del crecimiento microbiológico.

**Tabla N° 3 : Valores promedios mensuales de evaluación de la torre de enfriamiento. Año: 2011**

Temperatura (°C)									
Diseño	Entrada	Salida	Bulbo húmedo del aire de entrada	Salto térmico	Aproximación	Make up	Retorno		
Mes	40	29	24.5	11	4.5	Caudal (m3/h)			
Enero	34.32	26.73	22.55	7.59	4.18	44.11	3246.65		
Febrero	34.83	27.45	23.30	7.39	4.15	41.25	3284.26		
Marzo	33.46	26.49	22.80	6.96	3.69	40.74	3270.52		
Abril	26.71	23.60	21.20	3.11	2.40	20.88	2485.59		
Mayo	33.27	26.02	19.15	7.26	6.87	39.59	3596.04		
Junio	33.56	26.36	18.05	7.20	8.31	40.40	3655.70		
Julio	35.60	28.06	17.40	7.54	10.66	39.99	3337.27		
Agosto	31.68	24.58	16.85	7.10	7.73	41.08	3664.40		
Septiembre	32.55	25.04	16.70	7.50	8.34	42.30	3699.95		
Octubre	31.88	25.04	17.75	6.84	7.29	40.38	3718.51		
Noviembre	32.40	25.81	19.40	6.59	6.41	43.83	3718.61		
Diciembre	33.96	26.80	21.05	7.16	5.75	43.85	3635.18		

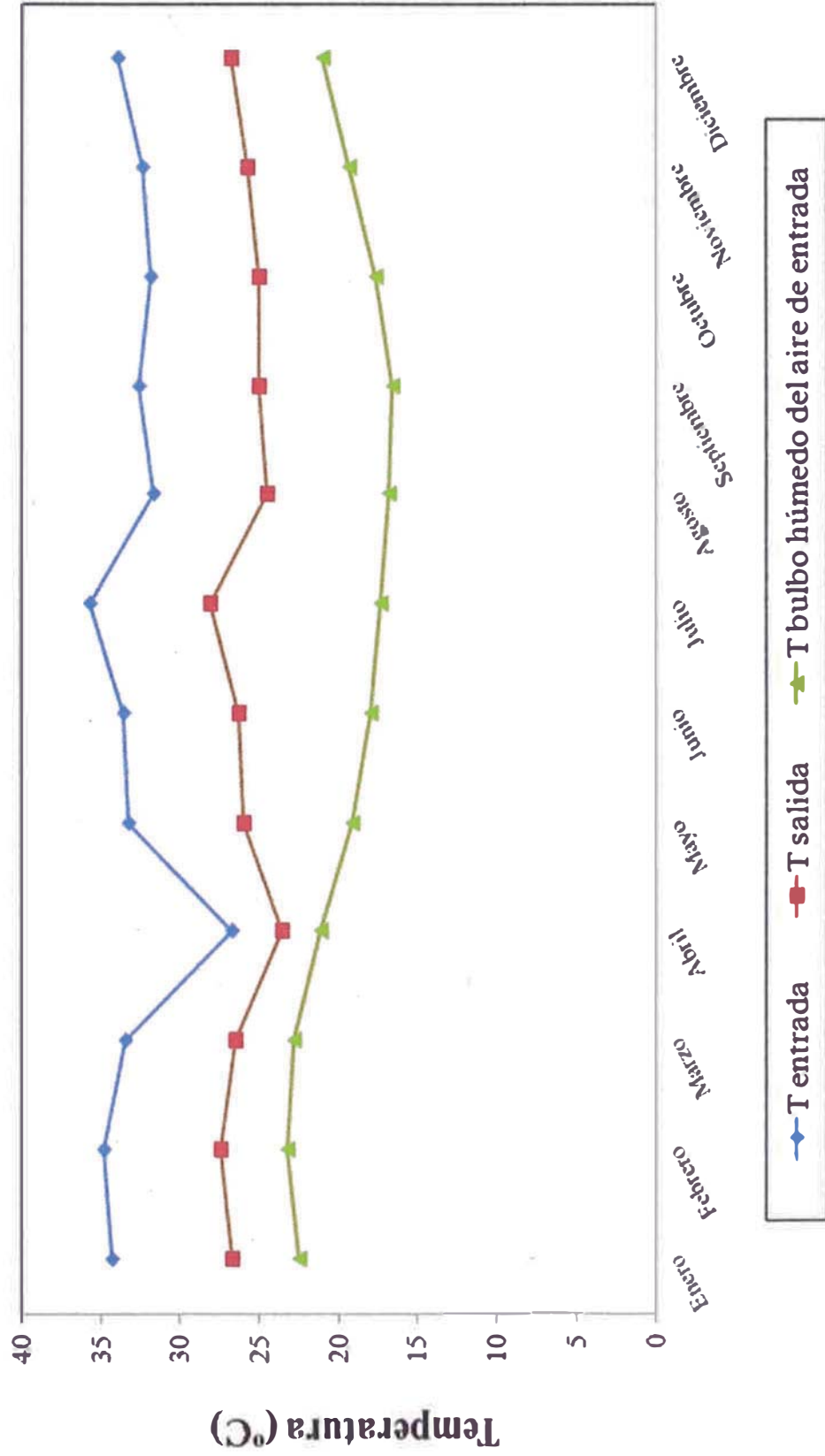


Gráfico N° 21: Relación mensual de las temperaturas de la torre de enfriamiento. Año: 2011

## Salto Térmico (°C)

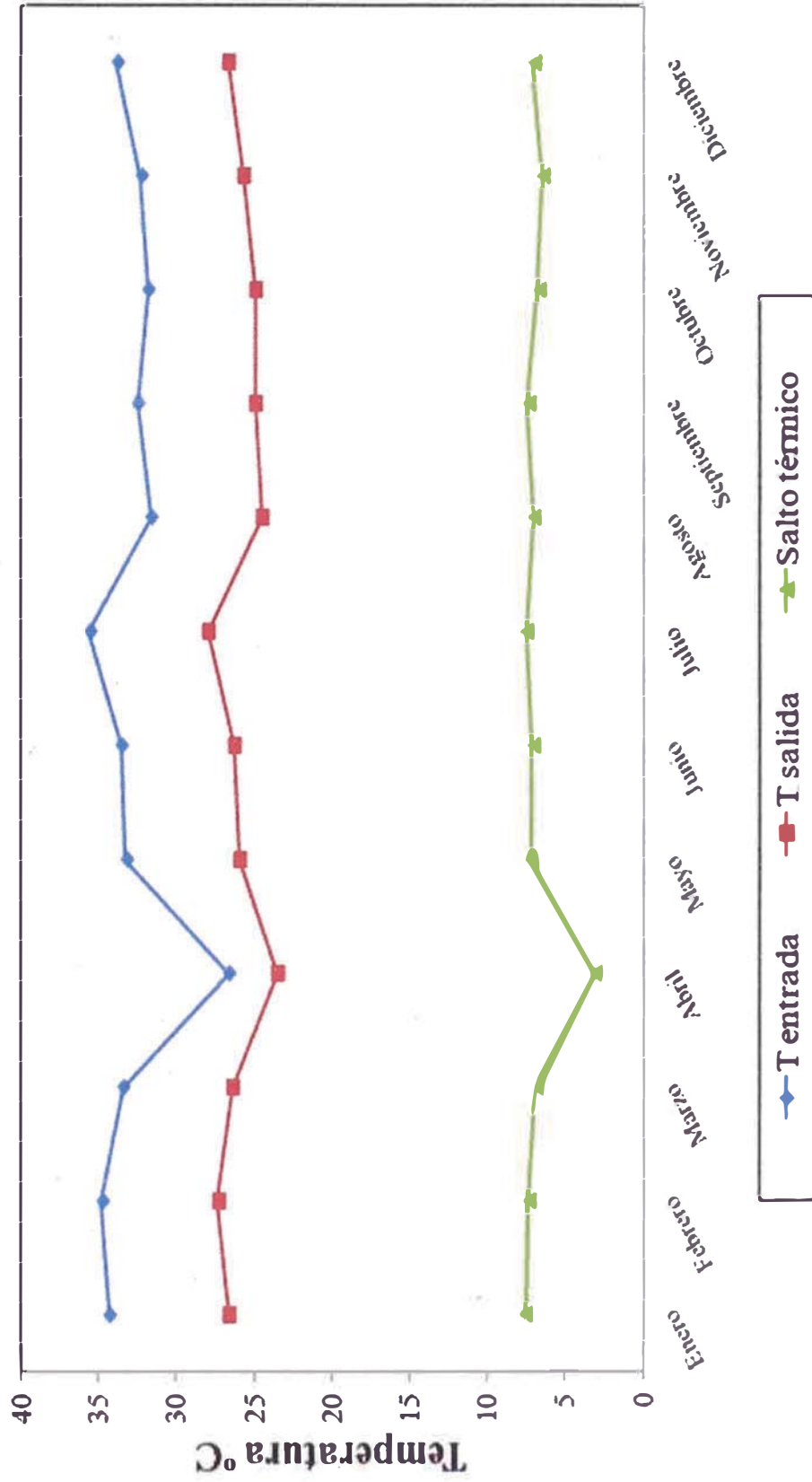


Gráfico N° 22: Salto térmico en la torre de enfriamiento. Año: 2011



# Aproximación (°C)

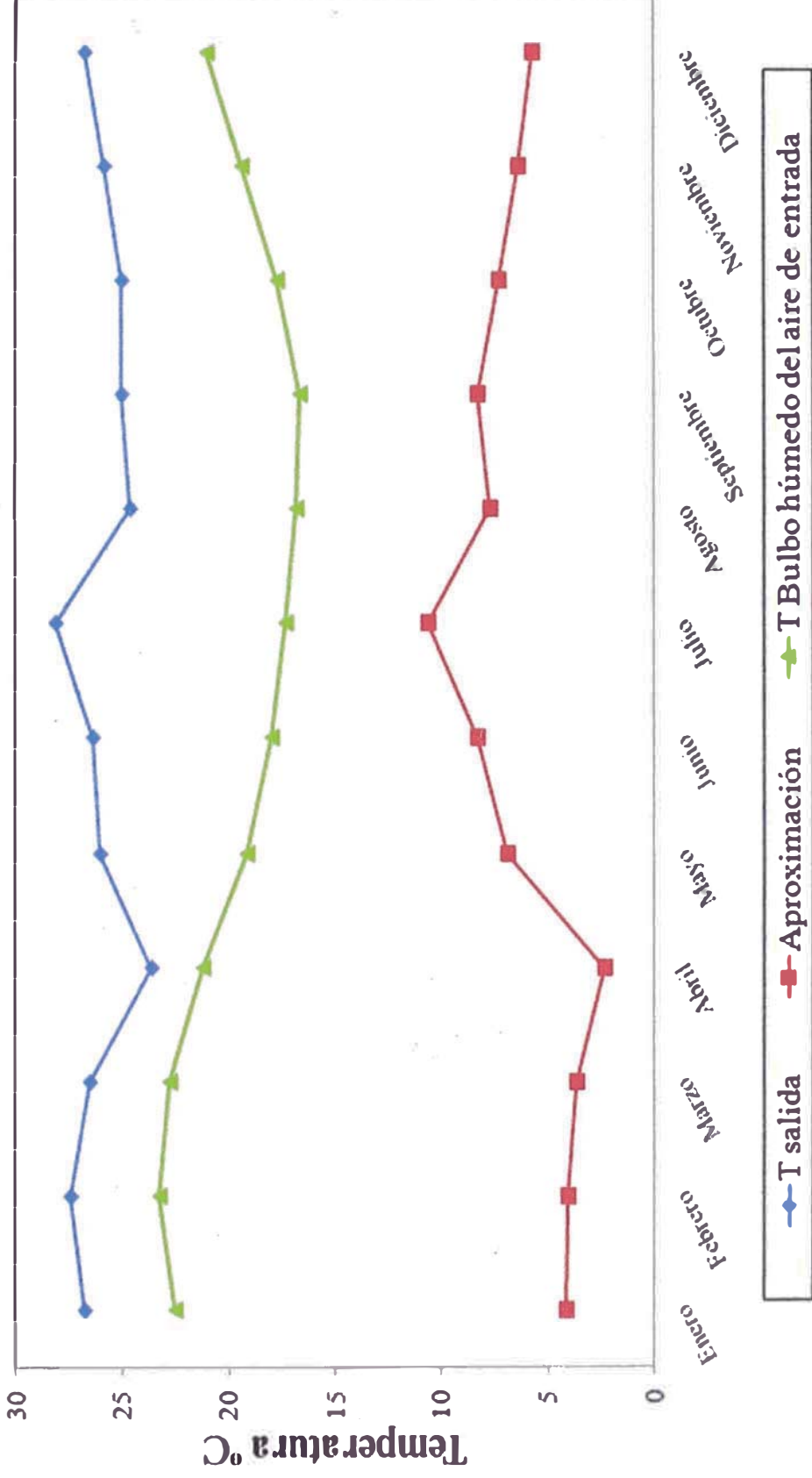


Gráfico N° 23: Aproximación en la torre de enfriamiento. Año: 2011



REPOSICIÓN (MAKE UP)										RECIRCULACIÓN (RETORNO)										PURGA	
Fecha	pH	Conductividad (µS/cm)	Silice (ppm)	Caudal m3/hr	pH	Turbidez (FAU)	Dureza Total (ppm)	Conductividad (µS/cm)	Silice (ppm)	Temperatura (°C)	Alcalinidad Parcial (ppm)	Alcalinidad Total (ppm)	Cloro (ppm)	Zinc (ppm)	Ciclos de Concentración	Fosfatos (ppm)	Hierro (ppm)	Índice LSI	Caudal m3/hr		
06-feb				41.99																	
07-feb	6.6	56.0	1.0	43.93	7.9	7.0	30.0	470.0	4.9	35.7	0.0	32.0	0.4	2.0	5.05	10.0	0.6	-1.02	8.70		
08-feb	6.6	60.0		46.89	7.9	8.0	22.0	458.0		36.1	0.0	32.0	0.8	2.0		9.0	0.5	-1.11			
09-feb	6.8	60.0		40.77	8.0	7.0	26.0	430.0		35.4	0.0	33.0	1.0	2.1		10.0	0.4	-1.00			
10-feb	6.7	60.0		37.33	7.9	8.0	28.0	465.0		34.6	0.0	34.0	1.0	2.1		10.0	0.5	-1.02			
11-feb	6.7	56.0	1.0	38.05	7.9	8.0	32.0	495.0	5.0	35.7	0.0	36.0	1.0	2.2	4.85	9.0	0.4	-0.89	7.84		
12-feb				43.17																	
13-feb				42.18																	
14-feb	7.0	52.0	1.0	38.19	7.8	9.0	26.0	529.0	5.0	35.5	0.0	34.0	1.7	2.0	4.81	9.0	0.3	-1.17	7.94		
15-feb	6.8	48.0		39.40	7.7	6.0	30.0	486.0		34.9	0.0	32.0	0.3	3.3		12.0	0.4	-1.24			
16-feb	7.0	58.0		42.49	8.0	14.0	28.0	464.0			0.0	32.0	0.2	1.7		8.0	0.4	-1.63			
17-feb	7.0	56.0		39.75	8.1	9.0	30.0	473.0			0.0	28.0	0.2	2.0		12.0	0.4	-1.56			
18-feb	7.0	48.0	1.0	39.06	7.8	7.0	30.0	460.0	4.9	35.0	0.0	30.0	0.2	2.2	5.00	12.0	0.4	-1.12	7.81		
19-feb				37.85																	
20-feb				39.66																	
21-feb	6.5	50.0	1.1	39.58	8.0	9.0	34.0	530.0	5.0	34.5	0.0	32.0	0.2	2.27	4.79	10.0	0.4	-0.89	8.26		
22-feb	6.7	48.0		35.37	8.0	9.0	34.0	550.0		34.3	0.0	36.0	0.4	2.3		10.0	0.4	-0.83			
23-feb	6.8	63.0		38.39	7.8	11.0	32.0	603.0		34.5	0.0	30.0	1.8	2.6		9.0	0.4	-1.15			
24-feb	6.7	50.0		43.44	8.0	9.0	38.0	590.0		35.1	0.0	36.0	2.2	2.3		10.0	0.6	-0.77			
25-feb	6.9	54.0	1.1	44.83	8.0	11.0	32.0	550.0	5.1	35.1	0.0	32.0		3.3	4.51		0.5	-0.91	9.93		
26-feb				43.87																	
27-feb				41.18																	
28-feb	7.0	60.0	1.2	39.80	7.6	9.0	32.0	486.0	5.1	34.7	0.0	32.0		2.2	4.36	11.0	0.3	-1.32	9.13		
01-mar	7.0	47.0		44.04	7.7	484.0	28.0	8.0		34.2	0.0	32.0	0.4	2.2		11.0		-1.22			
02-mar	6.9	51.0		40.46	7.5	479.0	24.0	7.0		34.7	0.0	30.0	0.2	2.0		11.0	0.27	-1.54			
03-mar	6.5	55.0		40.81	7.7	475.0	26.0	6.0		35.0	0.0	30.0	0.3	2.0		9.0		-1.30			
04-mar	6.4	76.0	1.0	47.59	7.5	533.0	30.0	9.0	5.0	35.5	0.0	33.0	0.8	2.2	5.04	10.0	0.32	-1.41	9.44		
05-mar				42.29																	
06-mar				40.31																	
07-mar	6.6	50.0	1.0	38.86	7.6	510.0	36.0	6.0	5.5	34.9	0.0	30.0	0.1	2.5	5.45	9.0	0.26	-1.30	7.14		
08-mar	6.5	54.0		40.81	7.6	556.0	32.0	8.0		34.8	2.0	28.0	0.2	2.6		10.0		-1.31			
09-mar	6.4	63.0		43.36	7.5	536.0	30.0	9.0		35.0	0.0	30.0	0.4	2.6		10.0	0.39	-1.40			
10-mar	6.5	56.0		42.10	7.6	545.0	30.0	12.0		35.1	0.0	30.0	0.4	2.4		10.0		-1.34			
11-mar	6.3	59.0	1.0	41.77	7.6	576.0	32.0	6.0	5.4	31.2	0.0	31.0	0.5	2.4	5.40	9.0	0.30	-1.42	7.74		
12-mar				42.48																	
13-mar				41.44																	
14-mar	6.8	55.0	1.1	41.16	7.7	459.0	32.0	5.0	4.5	34.0	0.0	28.0	0.9	2.2	4.02	8.0	0.25	-1.30	10.24		
15-mar	6.7	52.0		40.86	7.6	434.0	28.0	4.0		33.0	0.0	30.0	0.3	2.3		8.0	0.27	-1.40			
16-mar	6.7	56.0		39.86	7.6	408.0	28.0	6.0		32.0	0.0	30.0	0.1	2.5		8.0	0.21	-1.47			
17-mar	6.7	56.0		41.28	7.5	402.0	30.0	7.0		32.3	0.0	30.0	0.9	2.5		10.0	0.24	-1.45			

RECIRCULACIÓN (RETORNO)																				
REPOSICIÓN (MAKE UP)						RECIRCULACIÓN (RETORNO)						PURGA								
Fecha	pH	Conductividad (µS/cm)	Silice (ppm)	Caudal m3/hr	pH	Turbidez (FAU)	Dureza Total (ppm)	Conductividad (µS/cm)	Silice (ppm)	Temperatura (°C)	Alcalinidad Parcial (ppm)	Alcalinidad Total (ppm)	Cloro (ppm)	Zinc (ppm)	Cic los de Concentración	Fosfatos (ppm)	Hierro (ppm)	Indice LSI	Caudal m3/hr	
18-mar	6.5	55.0	1.1	37.49	7.6	363.0	28.0	5.0	4.3	32.7	0.0	30.0	0.6	2.7	3.91	10.0	0.22	-1.44	9.59	
19-mar				43.45																
20-mar				40.50																
21-mar	6.3	42.0	1.2	33.96	7.7	400.0	36.0	5.0	4.0	32.4	0.0	36.0	0.9	2.1	3.28	10.0	0.16	-1.12	10.36	
22-mar	6.6	45.0		41.55	7.7	436.0	32.0	6.0		32.3	0.0	38.0	0.4	2.4		9.0	0.21	-1.15		
23-mar	6.7	61.0		37.03	7.8	488.0	24.0	10.0		33.0	0.0	38.0	0.1	2.2		9.0	0.24	-1.20		
24-mar	6.7	47.0		43.09	7.6	445.0	35.0	6.0		33.7	0.0	40.0	0.3	2.3		8.0		-1.15		
25-mar	6.5	50.0	1.1	37.74	7.5	461.0	22.0	8.0	4.6	33.4	0.0	36.0	0.5	2.2	4.18	10.0	0.18	-1.52	9.02	
26-mar				38.55																
27-mar				39.52																
28-mar				38.33	7.9	580.0	28.0	7.0		38.3	0.0	28.0	2.2	2.2		10.0	0.28	-1.09		
29-mar	6.7	48.0		38.09	7.6	540.0	22.0	8.0		38.5	0.0	28.0	2.7	2.2		9.0		-1.44		
30-mar	6.4	59.0	1.2	37.52	7.7	580.0	28.0	11.0	4.2	38.0	0.0	30.0	1.5	2.3	3.62	10.0	0.25	-1.18	10.36	
31-mar	6.4	58.0		46.70	7.9	519.0	44.0	52.0		33.0	0.0	30.0	0.4	2.5		9.0	0.98	-0.92		
01-abr	6.8	60.0	1.1	45.20	7.7	404.0	24.0	23.0	3.2	31.0	0.0	28.0	1.6	2.5	2.91	10.0	1.0	-1.48	15.54	
02-abr				43.32																
03-abr				43.87																
04-abr	6.6	52.0	1.1	41.35	7.7	274.0	38.0	10.0	2.9	30.5	0.0	31.0	0.2	1.6	2.54	8.0	0.2	-1.22	16.25	
05-abr	6.8	60.0		34.07	7.7	282.0	34.0	8.0		30.5	0.0		0.1	1.8		8.0				
06-abr	6.8	61.0		37.66	7.7	300.0	32.0	6.0		30.0	0.0	26.9	0.2	2.6		8.0	0.4	-1.35		
07-abr	6.6	55.0		34.76	7.6	330.0	28.0	9.0		30.8	0.0		0.2	3.5		9.0				
08-abr	6.6	48.0		16.89	7.7	375.0	30.0	10.0		25.9	0.0	31.0	0.5	2.5		9.0	0.4	-1.37		
09-abr				14.58																
10-abr				9.31																
11-abr	6.9	43.0	1.1	15.27	7.9	380.0	25.0	10.0	2.4	25.3	0.0	33.0	0.4	3.2	2.29	10.0	0.6	-1.25	6.68	
12-abr	6.9	35.0		13.17	7.6	370.0	24.0	10.0		24.5	0.0		0.6	3.1		10.0				
13-abr				12.56														0.7		
14-abr	6.9	65.0		12.82	7.9	365.0	20.0	9.0		25.8	0.0		0.1	3.1		10.0				
15-abr	6.8	54.0	1.0	11.97	7.8	401.0	22.0	9.0	2.6	26.9	0.0	35.1	1.2	3.3	2.55	9.0	0.7	-1.39	4.69	
16-abr				13.16																
17-abr				12.99																
18-abr	6.8	40.0	1.0	12.44	7.5	407.0	26.0	9.0	2.4	24.8	0.0	49.6	0.4	1.9	2.47	9.0	0.8	-1.47	5.03	
19-abr	6.9	37.0		21.57	7.7	387.0	30.0	11.0		27.6	0.0		0.7	2.9		10.0				
20-abr	6.8	70.0		21.93	7.9	388.0	20.0	10.0		29.8	0.0	43.4	0.4	2.6		10.0	0.8	-1.14		
21-abr				19.43																
22-abr				18.26																
23-abr				7.03																
24-abr				1.27																
25-abr				3.94																
26-abr	6.5	80.0	1.0	7.50	7.7	306.0	26.0	16.0	2.6	19.3	0.0		0.2	2.6	2.50	9.0	1.4		3.00	



RECIRCULACIÓN (RETORNO)													PURGA						
Fecha	REPOSICIÓN (MAKE UP)						RECIRCULACIÓN (RETORNO)										Caudal m3/hr	Indice LSI	
	pH	Conductividad (µS/cm)	Silice (ppm)	Caudal m3/hr	pH	Turbidez (FAU)	Dureza Total (ppm)	Conductividad (µS/cm)	Silice (ppm)	Temperatura (°C)	Alcalinidad Parcial (ppm)	Alcalinidad Total (ppm)	Cloro (ppm)	Zinc (ppm)	Ciclos de Concentración	Fosfatos (ppm)			Hierro (ppm)
06-jun	7.0	56.0	1.0	40.21	8.0	641.0	46.0	9.0	5.3	34.1	0.0	51.6	1.5	2.4	5.30	10.0	0.74	-0.56	7.59
07-jun	6.7	49.0		40.56	7.9	603.0	44.0	10.0		32.3	0.0		1.0	2.3		9.0			
08-jun	6.7	56.0		39.61	7.8	595.0	46.0	11.0		33.8	0.0	59.9	0.1	2.0		9.0	0.70	-0.68	
09-jun	6.6	48.0		35.75	7.9	571.0	42.0	12.0		33.4	0.0		0.7	2.4		10.0			
10-jun	7.0	53.0	1.0	41.71	7.7	570.0	42.0	9.0	5.0	33.7	0.0	49.7	0.4	2.3	5.14	10.0	0.35	-0.91	8.11
11-jun				41.27															
12-jun				41.50															
13-jun	6.5	60.0	0.9	36.53	7.9	555.0	44.0	6.0	6.8	33.2	0.0	49.7	0.5	2.1	7.56	9.0	0.35	-0.69	4.83
14-jun	6.9	52.0		40.51	7.6	620.0	44.0	10.0		33.7	0.0		0.1	2.6		11.0			
15-jun	6.8	69.0		45.98	7.9	573.0	44.0	10.0		34.1	0.0	45.2	0.1	2.0		9.0	0.47	-0.74	
16-jun	6.8	56.0		41.74	7.8	537.0	40.0	8.0		33.4	0.0		0.2	2.2		10.0			
17-jun	6.7	62.0	0.9	39.86	7.8	533.0	40.0	10.0	5.3	33.8	0.0	33.9	0.1	1.8	5.64	9.0	0.25	-0.96	7.07
18-jun				41.41															
19-jun				41.16															
20-jun	6.6	56.0	1.0	40.04	8.0	554.0	42.0	18.0	5.1	34.1	0.0	39.2	2.2	1.4	5.21	9.0	0.31	-0.66	7.69
21-jun	6.4	67.0		39.23	8.0	563.0	38.0	1.0		33.8	0.0		0.6	1.4		8.0			
22-jun	6.5	64.0		39.01	7.9	574.0	40.0	6.0		34.2	0.0	33	0.9	1.4		8.0	0.33	-0.89	
23-jun	6.8	62.0		41.11	7.9	596.0	44.0	8.0		33.7	0.0		0.1	1.6		8.0			
24-jun	6.7	64.0	1.0	45.70	7.7	563.0	40.0	12.0	5.3	33.5	0.0	43	0.1	1.7	5.30	9.0	0.20	-0.97	8.62
25-jun				43.59															
26-jun				47.62															
27-jun	6.5	54.0	0.9	39.46	7.5	449.0	30.0	7.0	5.0	36.2	0.0	22.6	0.4	3.3	5.56	10.0	0.20	-1.53	7.10
28-jun	6.7	64.0	0.9	41.22	7.5	460.0	34.0	4.0	4.1	38.1	0.0		0.5	2.5	4.51	11.0			9.15
29-jun				40.88															
30-jun	6.6	58.0	0.9	43.17	7.5	450.0	32.0	7.0	7.1	33.4	0.0	26.0	0.3	2.7	7.89	10.0	0.21	-1.47	5.47
01-jul	6.5	57.0	1.0	39.76	7.4	434.0	33.0	13.0	3.4	32.7	0.0	22.6	0.8	2.3	3.47	11.0	0.20	-1.69	11.46
02-jul				39.41															
03-jul				41.28															
04-jul	6.6	49.0	0.9	40.72	7.5	440.0	26.0	3.0	3.9	36.4	0.0	22.6	0.9	3.4	4.24	9.0	0.17	-1.59	9.61
05-jul	6.5	60.0	1.0	37.48	7.5	440.0	30.0	1.0	3.3	36.6	0.0		0.8	2.2	3.47	10.0			10.79
06-jul	6.7	65.0	1.0	40.78	7.6	442.0	32.0	9.0	3.9	37.3	0.0	27.1	0.2	2.3	3.86	10.0	0.21	-1.35	10.56
07-jul	6.6	61.0	1.0	39.25	7.5	446.0	34.0	3.0	6.4	37.7	0.0		0.6	3.3	6.60	12.0			5.95
08-jul	6.5	66.0	1.0	41.35	7.6	450.0	30.0	8.0	4.5	38.3	0.0	29.4	0.2	2.3	4.74	10.0	0.16	-1.32	8.73
09-jul				39.00															
10-jul				39.49															
11-jul	6.7	64.0	1.0	41.55	7.6	467.0	34.0	7.0	4.8	37.6	0.0	31.6	0.1	2.0	4.90	10.0	0.18	-1.24	8.48
12-jul	7.1	69.0	1.0	41.23	7.6	476.0	37.0	6.0	4.7	37.8	0.0		0.4	2.2	4.75	11.0			8.68
13-jul	7.0	66.0	1.0	42.23	7.6	488.0	38.0	4.0	5.1	38.0	0.0	29.4	0.3	2.2	5.26	10.0	0.21	-1.20	8.03
14-jul	7.1	74.0	0.9	43.45	7.7	495.0	40.0	3.0	4.2	37.2	0.0		0.9	2.3	4.52	10.0			9.62
15-jul	6.7	64.0	1.0	46.57	7.5	470.0	36.0	7.0	4.5	38.3	0.0	29.4	0.4	2.3	4.69	10.0	0.21	-1.29	9.93



Fecha	REPOSICIÓN (MAKE UP)										RECIRCULACIÓN (RETORNO)										PURGA	
	pH	Conductividad (µS/cm)	Silice (ppm)	Caudal m3/hr	pH	Turbidez (FAU)	Dureza (ppm)	Total Conductividad (µS/cm)	Silice (ppm)	Temperatura (°C)	Alcalinidad Parcial (ppm)	Alcalinidad Total (ppm)	Cloro (ppm)	Zinc (ppm)	Ciclos de Concentración	Fosfatos (ppm)	Hierro (ppm)	Indice LSI	Caudal m3/hr			
16-jul				41.84																		
17-jul				43.67																		
18-jul	6.9	62.0	1.0	44.95	7.5	429.0	30.0	5.0	3.8	38.0	0.0	32.0	2.2	2.5	3.92	10.0	0.18	-1.34	11.48			
19-jul	7.3	59.0	0.9	42.71	7.5	400.0	28.0	3.0	3.1	37.6	0.0	31.6	1.0	2.3	3.30	10.0	0.17	-1.35	12.95			
20-jul	7.4	57.0	1.0	42.45	7.6	386.0	28.0	6.0	2.2	37.0	0.0	31.6	1.0	2.3	2.22	9.0	0.17	-1.35	19.10			
21-jul	6.6	65.0	1.0	41.32	7.5	391.0	28.0	4.0	2.4	37.3	0.0	32.0	0.1	2.6	2.35	10.0	0.15	-1.47	17.56			
22-jul	6.3	66.0	1.0	42.75	7.4	398.0	30.0	3.0	2.5	36.9	0.0	32.0	0.1	2.6	2.60	11.0	0.15	-1.47	16.42			
23-jul				39.93																		
24-jul				34.64																		
25-jul	6.8	56.0	1.0	31.95	7.5	360.0	26.0	1.0	2.6	33.1	0.0	36.1	0.3	2.9	2.68	11.0	0.07	-1.41	11.92			
26-jul	7.2	58.0	1.0	35.25	7.6	371.0	28.0	6.0	2.8	34.4	0.0	32	0.7	3.0	2.83	11.0	0.24	-1.31	12.46			
27-jul	6.9	44.0	1.0	35.92	7.7	369.0	28.0	6.0	2.7	30.9	0.0	32	0.6	3.0	2.84	11.0	0.24	-1.31	12.64			
28-jul				36.66																		
29-jul				41.04																		
30-jul				35.63																		
31-jul				35.50																		
01-ago	7.2	53.0	1.0	34.16	7.5	360.0	26.0	4.0	3.8	30.3	0.0	32	1.1	3.3	3.98	12.0	0.16	-1.52	8.58			
02-ago	6.9	60.0	1.0	36.29	7.5	350.0	26.0	5.0	3.9	28.7	0.0	30	1.1	3.2	3.98	11.0	0.12	-1.40	9.12			
03-ago	7.4	46.0	1.0	33.68	7.7	348.0	26.0	10.0	3.3	29.2	0.0	30	0.4	3.3	3.24	11.0	0.12	-1.40	10.40			
04-ago	7.1	42.0	0.9	36.34	7.6	323.0	26.0	8.0	3.5	29.6	0.0	32.0	0.1	3.0	3.80	10.0	0.16	-1.69	9.55			
05-ago	7.0	46.0	1.0	34.19	7.4	329.0	24.0	7.0	3.4	29.2	0.0	32.0	0.7	3.1	3.51	11.0	0.16	-1.69	9.75			
06-ago				40.45																		
07-ago				39.74																		
08-ago	7.0	66.0	1.0	41.16	7.5	353.0	32.0	12.0	4.2	31.7	0.0	36.2	0.1	3.0	4.38	12.0	0.12	-1.38	9.41			
09-ago	6.9	55.0	0.9	40.83	7.5	357.0	35.0	6.0	4.4	31.7	0.0	32.0	0.2	2.9	4.68	11.0	0.16	-1.37	8.72			
10-ago	6.9	58.0	1.0	41.64	7.5	355.0	36.0	10.0	4.3	31.5	0.0	32.0	0.5	3.2	4.43	13.0	0.16	-1.37	9.39			
11-ago	7.0	47.0	1.0	42.02	7.5	361.0	32.0	9.0	4.0	32.0	0.0	34.1	0.2	2.8	3.88	12.0	0.11	-1.38	10.82			
12-ago	6.9	53.0	1.0	44.96	7.5	360.0	32.0	12.0	4.1	32.1	0.0	34.1	0.6	3.3	4.14	11.0	0.11	-1.38	10.85			
13-ago				41.52																		
14-ago				44.59																		
15-ago	6.9	58.0	0.9	43.32	7.6	349.0	32.0	8.0	2.8	32.4	0.0	34.1	0.2	2.5	2.98	10.0	0.20	-1.29	14.54			
16-ago	7.0	58.0	1.0	45.46	7.2	351.0	28.0	13.0	3.4	32.4	0.0	34.1	0.2	2.2	3.54	10.0	0.11	-1.07	12.84			
17-ago	6.9	56.0	1.0	43.23	7.9	348.0	30.0	9.0	3.3	32.5	0.0	34.1	0.2	2.2	3.27	11.0	0.11	-1.07	13.23			
18-ago	7.2	68.0	1.1	42.46	8.0	361.0	30.0	1.0	4.0	32.0	0.0	32.0	0.4	2.3	3.81	9.0	0.11	-1.08	11.15			
19-ago	7.1	67.0	1.0	41.95	7.9	380.0	28.0	12.0	4.3	32.2	0.0	32.0	0.1	2.3	4.53	10.0	0.11	-1.08	9.27			
20-ago				44.90																		
21-ago				41.47																		
22-ago	6.9	48.0	0.9	40.48	7.6	385.0	28.0	7.0	4.0	32.1	0.0	32.0	0.4	1.9	4.35	9.0	0.13	-1.39	9.31			
23-ago	6.7	51.0	0.9	40.03	7.3	395.0	28.0	7.0	3.8	31.8	0.0	34.1	0.2	2.1	4.42	9.0	0.14	-1.06	9.06			
24-ago	7.1	63.0	1.0	42.38	7.9	406.0	28.0	6.0	4.1	31.9	0.0	34.1	0.3	2.3	4.32	10.0	0.14	-1.06	9.82			

RECIRCULACIÓN (RETORNO)													PURGA						
REPOSICIÓN (MAKE UP)																			
Fecha	pH	Conductividad (µS/cm)	Silice (ppm)	Caudal m3/hr	pH	Turbidez (FAU)	Dureza Total (ppm)	Conductividad (µS/cm)	Silice (ppm)	Temperatura (°C)	Alcalinidad Parcial (ppm)	Alcalinidad Total (ppm)	Cloro (ppm)	Zinc (ppm)	Ciclos de Concentración	Fosfatos (ppm)	Hierro (ppm)	Índice LSI	Caudal m3/hr
25-ago	6.8	52.0	0.9	41.38	7.5	395.0	28.0	1.0	4.4	32.0	0.0	36.2	0.3	2.1	4.94	9.0	0.10	-1.47	8.37
26-ago	7.0	63.0	0.9	43.13	7.5	378.0	26.0	4.0	4.1	31.6	0.0			2.4	4.45	10.0	0.10		9.69
27-ago				40.48															
28-ago				42.28															
29-ago	6.8	56.0	0.9	43.82	7.8	384.0	28.0	2.0	4.3	32.1	0.0	29.9	0.2	2.7	5.06	10.0	0.11	-1.21	8.66
30-ago				42.42															
31-ago	7.0	65.0	0.9	42.73	7.6	391.0	28.0	5.0	4.2	32.2	0.0	34.1	0.4	2.6	4.72	11.0	0.10	-1.40	9.05
01-sep	6.8	56.0	1.0	41.65	7.6	397.0	32.0	4.0	4.8	32.2	0.0		0.5	3.0	4.66	12.0			8.94
02-sep	6.7	56.0	1.0	43.23	7.6	399.0	29.0	3.0	6.2	32.4	0.0	32.7	0.2	2.9	6.33	11.0	0.07	-1.36	6.83
03-sep				42.94															
04-sep				45.05															
05-sep	6.9	64.0	1.1	43.99	7.8	416.0	28.0	5.0	5.3	32.7	0.0	28.6	1.3	2.7	5.00	10.0	0.10	-1.28	8.80
06-sep	6.9	69.0	1.0	42.79	7.6	419.0	32.0	5.0	4.9	32.8	0.0		0.5	2.7	4.95	10.0			8.65
07-sep	6.6	64.0	1.0	42.07	7.7	413.0	38.0	4.0	4.9	32.5	0.0	32.7	0.5	2.7	4.76	10.0	0.16	-1.14	8.84
08-sep	6.9	65.0	1.0	40.99	7.6	419.0	28.0	7.0	5.1	32.1	0.0		0.5	2.7	5.10	10.0			8.04
09-sep	7.0	64.0	1.0	41.53	7.6	418.0	28.0	5.0	5.2	32.1	0.0	38.8	1.0	2.7	5.31	9.0	0.12	-1.36	7.83
10-sep				41.74															
11-sep				41.54															
12-sep	7.1	58.0	0.9	42.25	7.8	460.0	32.0	8.0	5.8	32.2	0.0	36.7	0.2	2.5	6.37	9.0	0.23	-1.07	6.63
13-sep	6.9	63.0	1.0	41.03	7.6	436.0	30.0	2.0	5.2	32.0	0.0		0.1	2.4	5.51	9.0			7.45
14-sep	6.9	62.0	0.9	39.72	7.6	441.0	31.0	9.0	4.1	32.6	0.0	40.8	0.1	2.5	4.41	9.0	0.28	-1.23	9.01
15-sep	7.0	57.0	0.9	43.03	7.6	462.0	32.0	8.0	4.5	31.8	0.0		0.2	2.7	4.79	10.0			8.99
16-sep	6.9	67.0	1.0	46.65	7.7	385.0	35.0	6.0	4.4	32.2	0.0	40.8	0.2	2.4	4.40	9.0	0.16	-1.08	10.60
17-sep				41.96															
18-sep				44.65															
19-sep	7.0	67.0	0.9	38.85	7.5	413.0	28.0	11.0	4.9	32.5	0.0	40.8	0.6	2.6	5.44	12.0	0.17	-1.34	7.14
20-sep	6.9	65.0	0.9	39.80	7.6	438.0	30.0	6.0	5.1	32.4	0.0		1.0	2.7	5.82	10.0			6.84
21-sep	6.8	64.0	1.2	42.20	7.6	457.0	30.0	7.0	5.0	32.7	0.0	40.8	0.7	3.1	4.17	11.0	0.18	-1.29	10.13
22-sep	6.7	66.0	0.9	40.24	7.6	483.0	35.0	3.0	4.7	32.9	0.0		0.7	3.2	5.47	13.0			7.36
23-sep	6.7	61.0	1.0	42.86	7.5	513.0	35.0	8.0	4.3	32.8	0.0	40.8	0.2	3.2	4.43	12.0	0.05	-1.27	9.67
24-sep				47.28															
25-sep				42.14															
26-sep	7.0	57.0	0.9	41.18	7.6	495.0	33.0	6.0	5.6	33.0	0.0	36.7	0.2	3.2	6.29	12.0	0.15	-1.22	6.54
27-sep	6.9	68.0	1.0	41.07	7.6	490.0	36.0	5.0	5.2	32.0	0.0		0.4	2.6	5.42	10.0			7.58
28-sep	6.7	66.0	0.8	44.61	7.5	488.0	32.0	8.0	4.0	32.0	0.0	32.7	0.3	3.4	4.76	13.0	0.11	-1.43	9.37
29-sep	6.9	66.0	1.0	41.25	7.8	470.0	32.0	7.0	4.3	31.9	0.0		0.6	2.8	4.26	10.0			9.69
30-sep	7.0	64.0	0.9	40.59	7.5	489.0	30.0	5.0	4.1	31.8	0.0	34.7	0.7	2.5	4.46	11.0	0.16	-1.44	9.11
01-oct				44.63															
02-oct				39.55															
03-oct	6.8	65.0	0.9	42.00	7.5	500.0	36.0	8.0	4.5	33.0	0.0	30.6	0.8	3.3	5.29	12.0	0.20	-1.39	7.93







Fecha	REPOSICIÓN (MAKE UP)										RECIRCULACIÓN (RETORNO)										PURGA	
	pH	Conductividad (µS/cm)	Silice (ppm)	Caudal m3/hr	pH	Turbidez (FAU)	Dureza (ppm)	Total Conductividad (µS/cm)	Silice (ppm)	Temperatura (°C)	Alcalinidad Parcial (ppm)	Alcalinidad Total (ppm)	Cloro (ppm)	Zinc (ppm)	Ciclos de Concentración	Fosfatos (ppm)	Hierro (ppm)	Índice LSI	Caudal m3/hr			
23-dic	6.6	49.0	0.7	40.58	7.9	415.0	24.0	8.0	3.3	34.6	0.0	34.1	1.5	2.4	4.71	9.0	0.22	-1.08	8.61			
24-dic				42.13																		
25-dic				41.04																		
26-dic	6.8	47.0	0.7	41.13	7.8	406.0	18.0	7.0	3.4	34.2	0.0	38.3	1.3	2.7	4.72	10.0	0.20	-1.30	8.71			
27-dic	6.8	47.0	0.8	41.35	7.7	411.0	20.0	5.0	3.6	34.1	0.0		0.4	2.8	4.80	12.0			8.61			
28-dic	6.7	51.0	0.8	42.71	7.5	393.0	18.0	5.0	3.4	34.1	0.0	36.2	0.4	3.2	4.38	15.0	0.21	-1.58	9.74			
29-dic	6.6	48.0	0.7	40.13	7.6	394.0	29.0	5.0	3.3	34.5	0.0		0.1	3.3	4.53	16.0			8.85			
30-dic	6.6	42.0	0.7	39.33	7.5	403.0	18.0	4.0	3.3	34.5	0.0	23.4	0.0	2.6	4.71	14.0	0.13	-1.76	8.34			
31-dic				40.67																		

Fuente: Quimtia S.A. 2011  
Elaboración: Propia

Para la línea de reposición (Make up) tenemos los siguientes parámetros de control:

- pH
- Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
- Sílice (ppm)
- Caudal ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

Para la línea de recirculación (retorno) tenemos los siguientes parámetros de control:

- pH
- Turbidez (FAU)
- Dureza total (ppm)
- Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
- Sílice (ppm)
- Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )
- Alcalinidad parcial (ppm)
- Alcalinidad total (ppm)
- Cloro (ppm)
- Zinc (ppm)
- Ciclos de concentración
- Fosfatos (ppm)

- Fierro (ppm)
- Índice de Langelier (LSI)

Para la línea de Purga tenemos el siguiente parámetro de control:

- Caudal ( $m^3/h$ )

Se tiene la tabla N° 5, donde se muestra los límites recomendados para ciertos parámetros de control:

**Tabla N° 5: Límites recomendados para los parámetros de control de la torre**

Límites recomendados								
Si (Lím máx. ppm)	pH Mín.	pH Máx.	Zn (Lím mín. ppm)	Dureza máx. ppm	CC Máx.	LSI Mín.	LSI Máx.	Conductividad máx. ( $\mu S/cm$ )
22	7.5	8	2	1000	8	-0.5	0.5	1000

### 3.3 Cálculos:

Inicialmente se desarrollará los cálculos con los parámetros de diseño de la torre, se tiene:

Caudal de diseño de agua circulante:  $L = 3000 m^3/h$

Temperaturas:

- Temperatura de entrada ( $T_2$ ) : 40 °C
- Temperatura de salida ( $T_1$ ) : 29 °C
- Temperatura del bulbo húmedo del aire de entrada : 24.5 °C
- Rango de enfriamiento ( $T_2 - T_1$ ) : 11 °C

Del balance de energía del sistema, de la ecuación 6, se tiene:

$$LC_L (T_2 - T_1) = G(H_{G2} - H_{G1}) = Q \quad (6)$$

Para hallar la entalpía de la mezcla aire - vapor de agua, de la ecuación 21, se tiene:

$$H = (1005 + 1884Y)t + 2502300 Y \quad (J/kgaireseco) \quad (21)$$

Donde:

Y: Humedad absoluta de la mezcla, kg agua/kg aire seco.

Para las condiciones de saturación:

$$H^* = (1005 + 1884Y_s)t + 2502300 Y_s \quad (J/kgaireseco) \quad (24)$$

Para hallar la humedad absoluta de aire - vapor de agua, tenemos:

$$Y = \frac{0.622 p}{(1.0133 \times 10^5 - p)} \text{ kg agua / kg aire} \quad (23)$$

$$Y_s = \frac{0.622 p_s}{(1.0133 \times 10^5 - p_s)} \text{ kg agua / kg aire} \quad (23)$$

Donde:

p, ps: Presión parcial del vapor en la mezcla y en la saturación, respectivamente.

Las propiedades del vapor saturado, son tomadas de la bibliografía [4], en este caso los valores de  $p_s$  se presentan en el Apéndice N° 1.

- **Cálculo de la entalpía de ingreso del aire ( $H_{G1}$ ):**

Tenemos las siguientes propiedades:  $p (t_1= 24.5^\circ\text{C}) = 3.074 \text{ kPa}$

Reemplazamos la  $p$  en la ecuación 23:  $Y = 0.0195$

Reemplazando en la ecuación 24:  $H_{G1} = 93.51 \text{ kJ/kg aire seco}$

- **Cálculo de la entalpía de salida del aire ( $H_{G2}$ ):**

Tenemos las siguientes propiedades:  $p (t_2= 34.5^\circ\text{C}) = 5.47 \text{ kPa}$

Reemplazamos la  $p$  en la ecuación 23:  $Y = 0.0353$

Reemplazando en la ecuación 24:  $H_{G2} = 145.31 \text{ kJ/kg aire seco}$

- **Cálculo de la carga de calor ( $Q$ ):**

De la ecuación 10 tenemos:  $Q = 3000 \cdot 1000 \cdot (40-29)$

$$Q = 33000000 \text{ kcal/h}$$

Donde:

$C_L = \text{calor específico del agua} = 1 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$

- **Cálculo de la relación ( $L/G$ ):**

Usamos la ecuación 10, por lo tanto:  $L/G = 0.57$

- **Cálculo del número de difusión:**

De la ecuación 18:

$$n_d = \frac{K_y a Z}{L} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{(H_G^* - H_G)} \quad (18)$$

Mediante la integración numérica se obtiene el área entre la curva de equilibrio y la curva de operación de la torre. A continuación, en la tabla N° 6



se observa los resultados obtenidos para los datos de diseño y en la tabla N° 7 los resultados obtenidos con los datos de campo actualmente:

**Tabla N° 6: Resultado con los parámetros de diseño de la torre**

T	H*	H	H*-H	(H*-H) <sub>av</sub>	dT/(H*-H) <sub>av</sub>
29.00	27.17	22.38	4.79		
30.83	29.46	23.42	6.04	5.42	0.34
32.67	31.97	24.46	7.51	6.77	0.27
34.50	34.73	25.50	9.23	8.37	0.22
36.33	37.78	26.54	11.24	10.23	0.18
38.17	41.16	27.59	13.58	12.41	0.15
40.00	44.92	28.63	16.29	14.93	0.12
Número de difusión ( $Ka \cdot V/L = \text{Integral } dT/(H^* - H) =$					1.28
L/G =					0.57
G =					31439.56 kg/hm <sup>2</sup>

Luego de realizar los cálculos y hallar el número de difusión como la relación L/G para ambos casos, diseño y prueba de campo, con la ayuda de la curva de demanda de la torre en estudio (gráfico N° 25) se efectúa el “Método de curvas características”, se tiene:

**1. Puntos Característicos:**

Diseño:  $KaV/L = 1.28$ ,  $L/G = 0.57$

Actual:  $KaV/L = 1.16$ ,  $L/G = 0.41$

**2. Diferencia de Temperaturas de diseño:**

Temperatura de Agua de salida (CWT):  $29^\circ\text{C} = 84.2^\circ\text{F}$

Temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada (WBT):  $24.5^\circ\text{C} = 76.1^\circ\text{F}$

Por lo tanto:  $\text{CWT} - \text{WBT} = 4.5^\circ\text{C} = 8.1^\circ\text{F}$

**Tabla N° 7: Resultado con los parámetros de campo de la torre**

T	H*	H	H*-H	(H*-H) <sub>av</sub>	dT/(H*-H) <sub>av</sub>
26.73	24.62	20.61	4.01		
28.00	26.01	21.13	4.88	4.44	0.28
29.26	27.49	21.65	5.84	5.36	0.24
30.53	29.06	22.17	6.90	6.37	0.20
31.79	30.74	22.68	8.06	7.48	0.17
33.06	32.53	23.20	9.33	8.69	0.15
34.32	34.45	23.72	10.73	10.03	0.13
Número de difusión ( $Ka*V/L = \text{Integral } dT/(H^*-H) =$					1.16
L/G =		0.41			
G =		47074.89 kg/hm <sup>2</sup>			

Finalmente, se traza pendientes paralelas negativas por dichos puntos característicos, como se observa en el gráfico N° 26.

Por la gráfica tenemos que el valor de la relación:  $(L/G)_o = 0.38$

Finalmente por la ecuación 23, se tiene la eficiencia de la torre:

$$\% \text{ Eficiencia} = \frac{L/G_o}{L/G_{\text{diseño}}} \times 100 \quad (23)$$

$$\% \text{ Eficiencia} = \frac{0.38}{0.57} \times 100 = 66.67\%$$

KaV/L vs L/G - CTI method

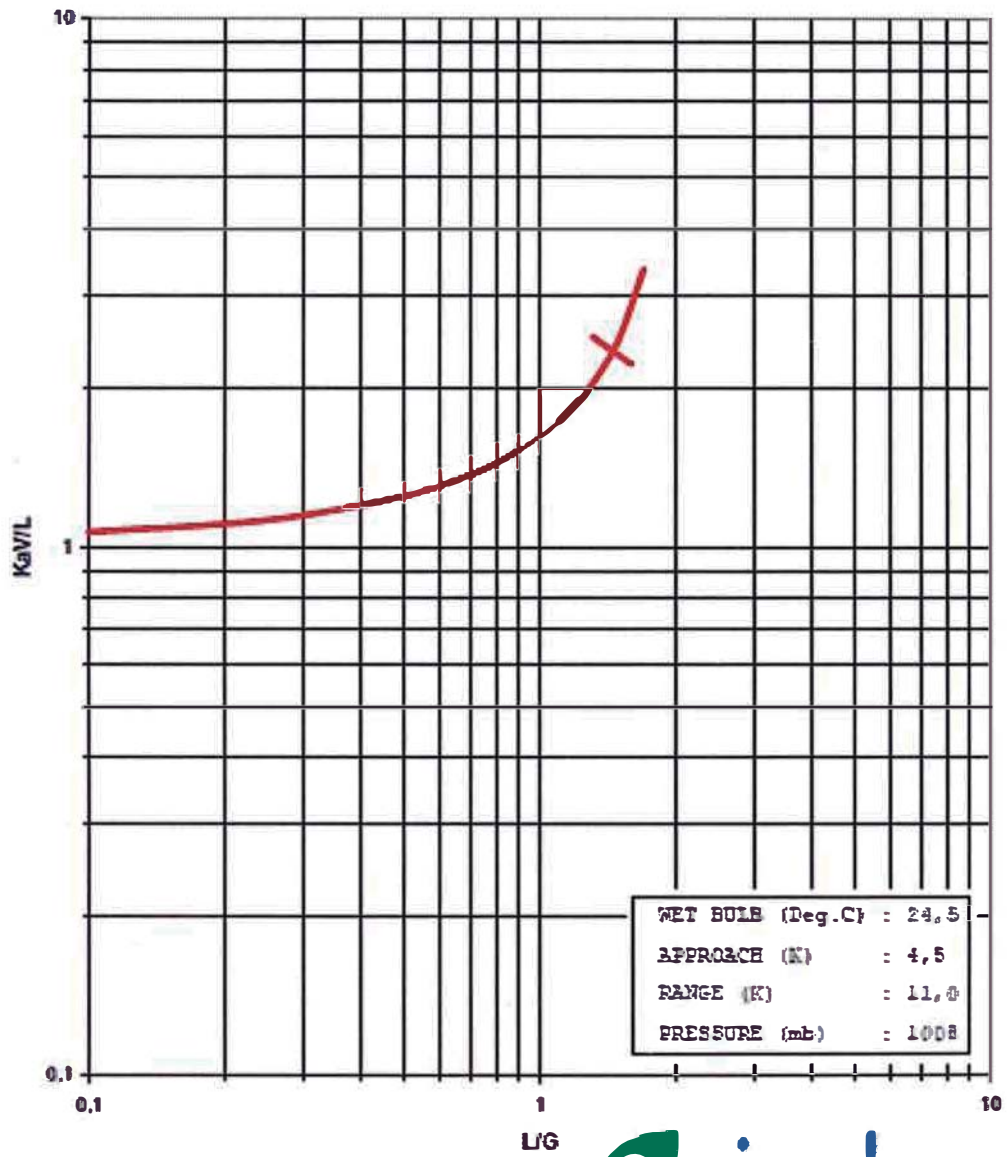


Gráfico N° 25: Curva de demanda de la torre de enfriamiento en estudio

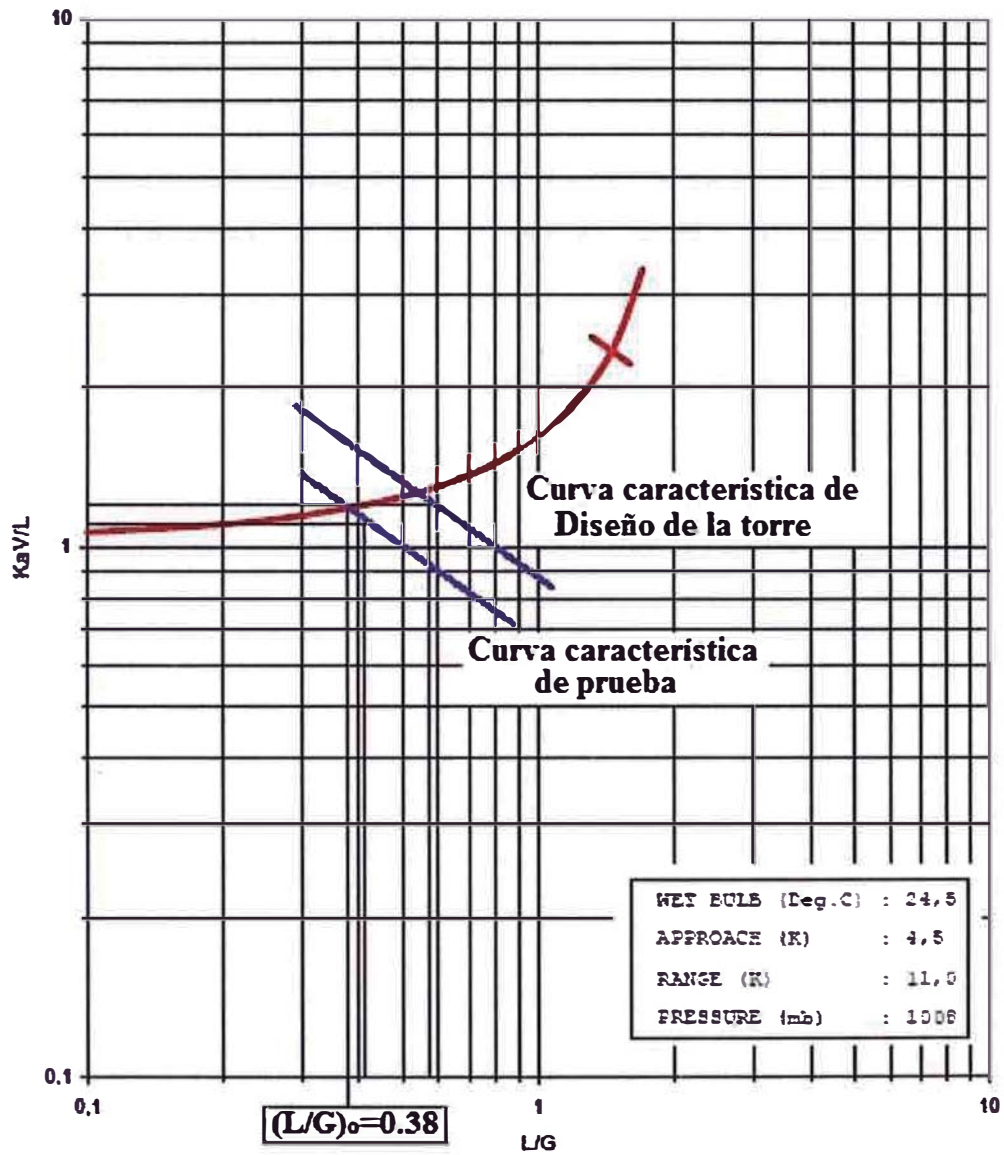


Gráfico N° 26: Desarrollo del método de curvas características

A continuación, se tiene la tabla N° 8, donde se muestra los resultados obtenidos por cada mes:

Tabla N° 8: Resultado mensual del estudio de eficiencia en la torre de enfriamiento. Año: 2011

	Unidades	Diseño	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Flujo de recirculación de agua	m <sup>3</sup> /h	3000	3247	3284	3271	2486	3596	3656
Temperatura de bulbo húmedo	°C	24.50	22.55	23.3	22.8	21.2	19.15	18.05
Temperatura de agua entrante	°C	40.00	34.32	34.83	33.46	26.71	33.27	33.56
Temperatura de agua saliente	°C	29.00	26.73	27.45	26.49	23.60	26.02	26.36
Carga de calor	kcal/h	33000000	24633642	24256907	2277308	7740121	26091266	26311037
Flujo de agua de recirculación específica	kg/h.m <sup>2</sup>	17857	19325	19549	19467	14795	21405	21760
Líquido/ Gas Ratio (L/G)		0.57	0.41	0.42	0.41	0.31	0.45	0.46
Difusión Nd = (Kxa*V/L)=Int.dT/(H*-H)		1.28	1.16	1.10	1.21	1.06	0.87	0.76
Eficiencia			66.67%	64.91%	68.42%	49.12%	52.63%	43.86%

	Unidades	Diseño	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Flujo de recirculación de agua	m <sup>3</sup> /h	3000	3337	3664	3700	3719	3719	3635
Temperatura de bulbo húmedo	°C	24.50	17.4	16.85	16.7	17.75	19.4	21.05
Temperatura de agua entrante	°C	40.00	35.60	31.68	32.55	31.88	32.40	33.96
Temperatura de agua saliente	°C	29.00	28.06	24.58	25.04	25.04	25.81	26.80
Carga de calor	kcal/h	33000000	25164383	26019788	27764173	25445934	24514066	26030987
Flujo de agua de recirculación específica	kg/h.m <sup>2</sup>	17857	19865	21812	22023	22134	22135	21638
Líquido/ Gas Ratio (L/G)		0.57	0.42	0.46	0.47	0.47	0.47	0.46
Difusión Nd = (Kxa*V/L)=Int.dT/(H*-H)		1.28	0.60	0.86	0.84	0.85	0.87	0.93
Eficiencia			29.82%	51.58%	51.05%	52.63%	54.39%	57.89%

## Caudal de Agua de retorno vs. Eficiencia

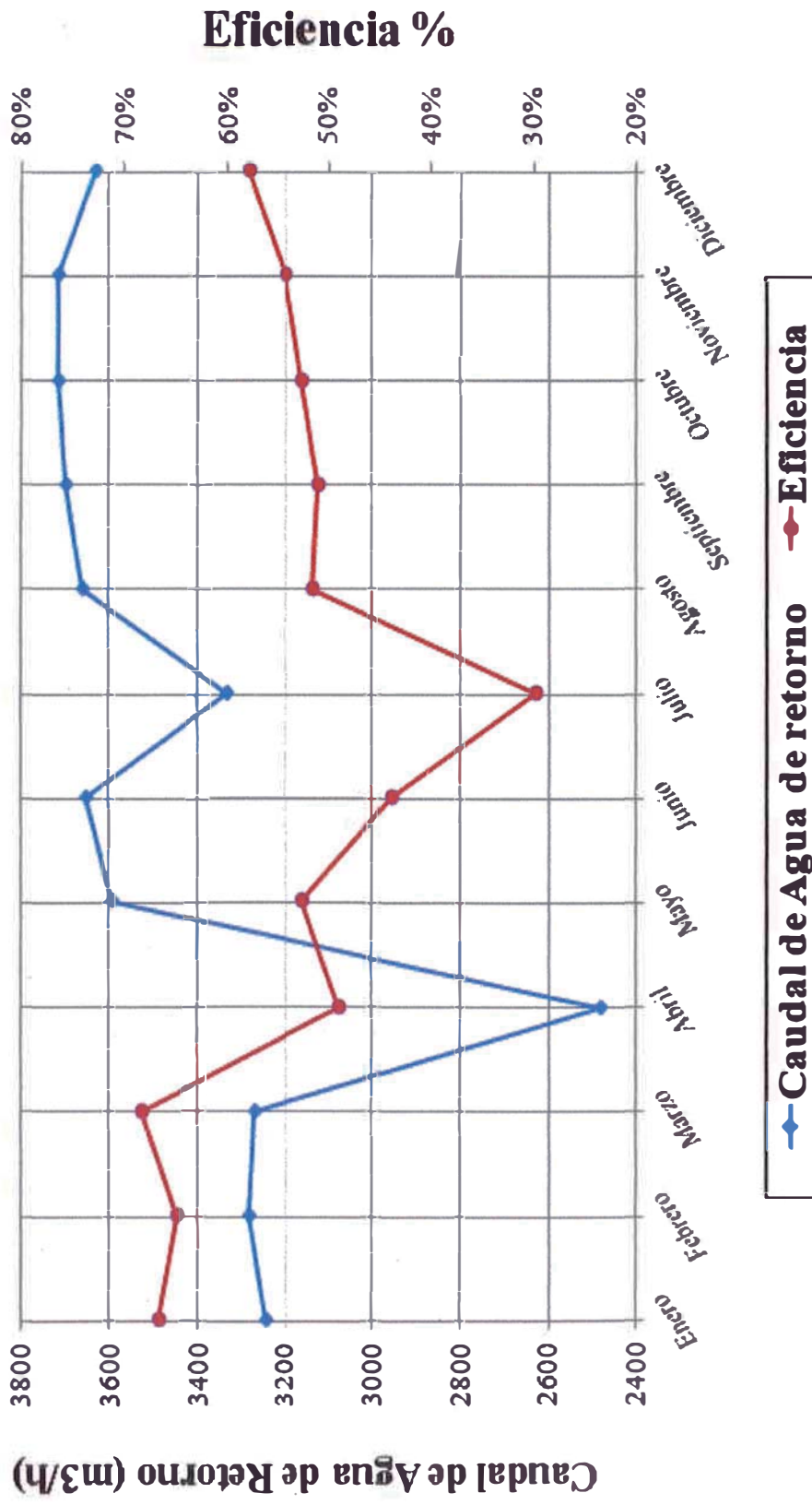


Gráfico N° 27: Caudal de Agua de retorno vs. Eficiencia. Año: 2011

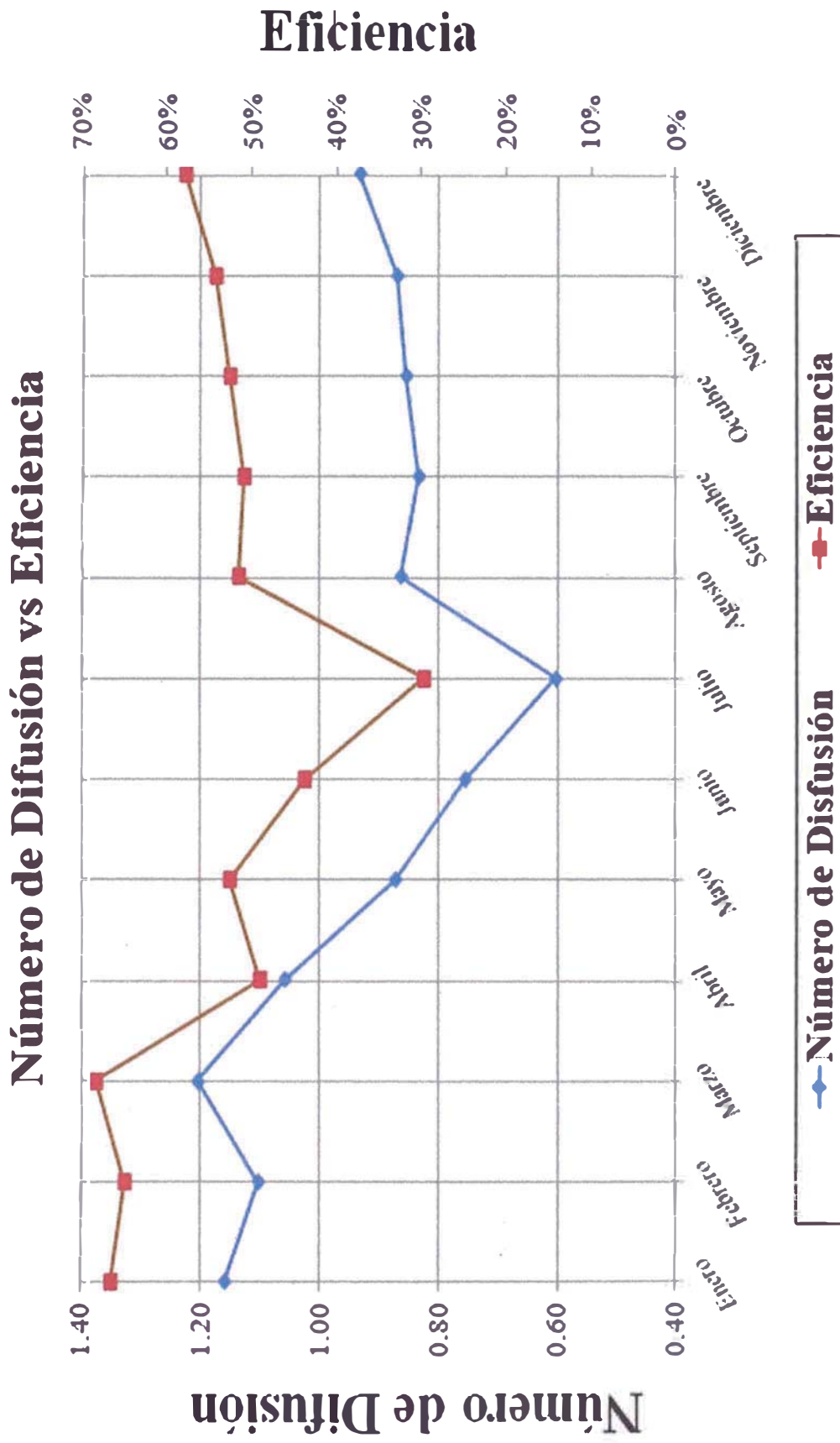


Gráfico N° 28: Número de Difusión vs. Eficiencia. Año: 2011



## **Capítulo IV: Conclusiones y Recomendaciones**

### **4.1 Conclusiones:**

1. La eficiencia promedio de la torre de enfriamiento es de 53.58%, como se muestra en el gráfico N° 27.
2. La menor eficiencia fue hallada en el mes de julio, con un valor de 29.82%, como se muestra en el gráfico N° 27.
3. La mayor aproximación se dio en el mes de julio, con un valor de 10.66°C, como se muestra en el gráfico N° 21, es decir, la diferencia de temperaturas entre la temperatura de agua fría y la temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada.
4. Generalizando, existe una relación directa entre el número de difusión con la eficiencia, lo cual evidencia que a mayor número de difusión, también lo será la eficiencia, como se muestra en el gráfico N° 28.
5. El caudal de retorno de agua está sobredimensionado, está por encima de 3000 m<sup>3</sup>/h.
6. Los ciclos de concentración en la torre están fluctuando entre valores de 3 a 5, lo que implica una pérdida de agua como de productos químicos que adicionan a esta.

### **4.2 Recomendaciones**

1. En base a los resultados de la concentración de sílice en el agua de retorno y el agua de reposición, se recomienda que se evalúe los ciclos de concentración para minimizar la purga en la torre de enfriamiento.

2. Generar programas de operación y mantenimiento preventivo que garantice la sostenibilidad futura del sistema.
3. Se puede hallar la eficiencia también mediante el “Método de curvas de comportamiento”.

## Capítulo V: Bibliografía

- [1] Treybal R E., Operaciones de transferencia de masa, 2 edición 1986.
- [2] Foust A.S., Wenzel L.A., Clump C. W., Maus L., Andersen L. B., Principios de Operaciones Unitarias, 10 reimpresión 2006.
- [3] Geankoplis C. J., Procesos de transporte y operaciones unitarias, 3 edición 1998.
- [4] Smith J.M., Van Ness H.C., Abbott M.M., Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química, 7 edición 2007.
- [5] Cengel Y.A., Boles M.A., Termodinámica, 6 edición 2009.
- [6] Vivas M., Paucar K., Diseño y construcción de una torre de enfriamiento de tiro inducido con flujo en contracorriente, 1999.
- [7] Manual Técnico de Nalco.
- [8] Esindus S.A., Manual de operación y mantenimiento de torres de enfriamiento.
- [9] Cooling Tower Institute, Cooling Tower Manual Chapter 5, Cooling Tower Field Test Handbook, 1983.
- [10] Cooling Tower Technical Site of Daeil Aqua Co., Ltd. For Cooling Tower Engineers, Operators and Purchasers.  
<<http://che.sharif.edu/~heatlab/Lab/Benefit%20Book%20&%20Journal/Benefit%20book/Cooling%20Tower%20Thermal%20Design%20Manual.pdf>>

- [11] Campos J, Evaluación energética de torres de enfriamiento.  
<<http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Tecnologias/torres.pdf>>
- [12] Jalal Engineering, Karachi, Cooling tower [counter flow] theory.  
<<http://www.jalal.com.pk/papers/Cooling%20Tower%20Theory.pdf>>

## Capítulo IV: Apéndice

### Apéndice N ° 1 : Propiedades termodinámicas del Vapor [4]

V = VOLUMEN ESPECÍFICO  $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$

U = ENERGÍA INTERNA ESPECÍFICA  $\text{kJ kg}^{-1}$

H = ENTALPÍA ESPECÍFICA  $\text{kJ kg}^{-1}$

S = ENTROPIA ESPECÍFICA  $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

t °C	T K	P kPa	VOLUMEN ESPECÍFICO V		ENERGÍA INTERNA U				ENTALPÍA H				ENTROPIA S				
			líq.	sat.	evap.	vap. sat.	líq.	sat.	evap.	vap. sat.	líq.	sat.	evap.	vap. sat.			
0	273.15	0.611	1.000	206300.	206300.	206300.	-0.04	2375.7	2375.6	-0.04	2501.7	2501.6	0.0000	9.1578	9.1578	0.0000	9.1578
0.01	273.16	0.611	1.000	206200.	206200.	206200.	0.00	2375.6	2375.6	0.00	2501.6	2501.6	0.0000	9.1575	9.1575	0.0000	9.1575
1	274.15	0.657	1.000	192600.	192600.	192600.	4.17	2372.7	2376.9	4.17	2499.2	2503.4	0.0153	9.1158	9.1311	0.0153	9.1311
2	275.15	0.705	1.000	179900.	179900.	179900.	8.39	2369.9	2378.3	8.39	2496.8	2505.2	0.0306	9.0741	9.1047	0.0306	9.1047
3	276.15	0.757	1.000	168200.	168200.	168200.	12.60	2367.1	2379.7	12.60	2494.5	2507.1	0.0459	9.0326	9.0785	0.0459	9.0785
4	277.15	0.813	1.000	157300.	157300.	157300.	16.80	2364.3	2381.1	16.80	2492.1	2508.9	0.0611	8.9915	9.0526	0.0611	9.0526
5	278.15	0.872	1.000	147200.	147200.	147200.	21.01	2361.4	2382.4	21.01	2489.7	2510.7	0.0762	8.9507	9.0269	0.0762	9.0269
6	279.15	0.935	1.000	137800.	137800.	137800.	25.21	2358.6	2383.8	25.21	2487.4	2512.6	0.0913	8.9102	9.0014	0.0913	9.0014
7	280.15	1.001	1.000	129100.	129100.	129100.	29.41	2355.8	2385.2	29.41	2485.0	2514.4	0.1063	8.8699	8.9762	0.1063	8.9762
8	281.15	1.072	1.000	121000.	121000.	121000.	33.60	2353.0	2386.6	33.60	2482.6	2516.2	0.1213	8.8300	8.9513	0.1213	8.9513
9	282.15	1.147	1.000	113400.	113400.	113400.	37.80	2350.1	2387.9	37.80	2480.3	2518.1	0.1362	8.7903	8.9265	0.1362	8.9265
10	283.15	1.227	1.000	106400.	106400.	106400.	41.99	2347.3	2389.3	41.99	2477.9	2519.9	0.1510	8.7510	8.9020	0.1510	8.9020
11	284.15	1.312	1.000	99910.	99910.	99910.	46.18	2344.5	2390.7	46.18	2475.5	2521.7	0.1658	8.7119	8.8776	0.1658	8.8776
12	285.15	1.401	1.000	93830.	93830.	93830.	50.38	2341.7	2392.1	50.38	2473.2	2523.6	0.1805	8.6731	8.8536	0.1805	8.8536
13	286.15	1.497	1.001	88180.	88180.	88180.	54.56	2338.9	2393.4	54.56	2470.8	2525.4	0.1952	8.6345	8.8297	0.1952	8.8297
14	287.15	1.597	1.001	82900.	82900.	82900.	58.75	2336.1	2394.8	58.75	2468.5	2527.2	0.2098	8.5963	8.8060	0.2098	8.8060
15	288.15	1.704	1.001	77980.	77980.	77980.	62.94	2333.2	2396.2	62.94	2466.1	2529.1	0.2243	8.5582	8.7826	0.2243	8.7826
16	289.15	1.817	1.001	73380.	73380.	73380.	67.12	2330.4	2397.6	67.12	2463.8	2530.9	0.2388	8.5205	8.7593	0.2388	8.7593

$V =$  VOLUMEN ESPECÍFICO  $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$   
 $U =$  ENERGÍA INTERNA ESPECÍFICA  $\text{kJ kg}^{-1}$   
 $H =$  ENTALPIA ESPECÍFICA  $\text{kJ kg}^{-1}$   
 $S =$  ENTROPIA ESPECÍFICA  $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

$t$ $^{\circ}\text{C}$	$T$ $\text{K}$	$P$ $\text{kPa}$	VOLUMEN ESPECÍFICO $V$		ENERGÍA INTERNA $U$				ENTALPIA $H$				ENTROPIA $S$	
			liq. sat.	evap.	vap. sat.	liq. sat.	evap.	vap. sat.	liq. sat.	evap.	vap. sat.	liq. sat.	evap.	vap. sat.
20	293.15	2.337	1.002	57840.	57840.	83.86	2319.2	2403.0	83.86	2454.3	2538.2	0.2933	8.3721	8.6684
21	294.15	2.485	1.002	54560.	54560.	88.04	2316.4	2404.4	88.04	2452.0	2540.0	0.3105	8.3356	8.6462
22	295.15	2.642	1.002	51490.	51490.	92.22	2313.6	2405.8	92.23	2449.6	2541.8	0.3247	8.2994	8.6241
23	296.15	2.808	1.002	48620.	48620.	96.40	2310.7	2407.1	96.41	2447.2	2543.6	0.3389	8.2634	8.6023
24	297.15	2.982	1.003	45920.	45920.	100.6	2307.9	2408.5	100.6	2444.9	2545.5	0.3530	8.2277	8.5806
25	298.15	3.166	1.003	43400.	43400.	104.8	2305.1	2409.9	104.8	2442.5	2547.3	0.3670	8.1922	8.5592
26	299.15	3.360	1.003	41030.	41030.	108.9	2302.3	2411.2	108.9	2440.2	2549.1	0.3810	8.1569	8.5379
27	300.15	3.564	1.003	38810.	38810.	113.1	2299.5	2412.6	113.1	2437.8	2550.9	0.3949	8.1218	8.5168
28	301.15	3.778	1.004	36730.	36730.	117.3	2296.7	2414.0	117.3	2435.4	2552.7	0.4088	8.0870	8.4959
29	302.15	4.004	1.004	34770.	34770.	121.5	2293.8	2415.3	121.5	2433.1	2554.5	0.4227	8.0524	8.4751
30	303.15	4.241	1.004	32930.	32930.	125.7	2291.0	2416.7	125.7	2430.7	2556.4	0.4365	8.0180	8.4546
31	304.15	4.491	1.005	31200.	31200.	129.8	2288.2	2418.0	129.8	2428.3	2558.2	0.4503	7.9839	8.4342
32	305.15	4.753	1.005	29570.	29570.	134.0	2285.4	2419.4	134.0	2425.9	2560.0	0.4640	7.9500	8.4140
33	306.15	5.029	1.005	28040.	28040.	138.2	2282.6	2420.8	138.2	2423.6	2561.8	0.4777	7.9163	8.3939
34	307.15	5.318	1.006	26600.	26600.	142.4	2279.7	2422.1	142.4	2421.2	2563.6	0.4913	7.8828	8.3740
35	308.15	5.622	1.006	25240.	25240.	146.6	2276.9	2423.5	146.6	2418.8	2565.4	0.5049	7.8495	8.3543
36	309.15	5.940	1.006	23970.	23970.	150.7	2274.1	2424.8	150.7	2416.4	2567.2	0.5184	7.8164	8.3348
37	310.15	6.274	1.007	22760.	22760.	154.9	2271.3	2426.2	154.9	2414.1	2569.0	0.5319	7.7835	8.3154
38	311.15	6.624	1.007	21630.	21630.	159.1	2268.4	2427.5	159.1	2411.7	2570.8	0.5453	7.7509	8.2962
39	312.15	6.991	1.007	20560.	20560.	163.3	2265.6	2428.9	163.3	2409.3	2572.6	0.5588	7.7184	8.2772
40	313.15	7.375	1.008	19550.	19550.	167.4	2262.8	2430.2	167.5	2406.9	2574.4	0.5721	7.6861	8.2583

## Glosario

- **Acercamiento:** También llamado Aproximación o Approach, es la diferencia entre la temperatura de agua fría y la temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada (°C).
- **Agua de reposición (Make up):** Es la que hay que añadir al sistema para compensar las pérdidas de evaporación, arrastre y purga.
- **Arrastre:** Pérdidas del líquido de la torre de enfriamiento en forma de pequeñas gotas líquidas que entran al aire de escape. Esta pérdida es independiente de las pérdidas por evaporación. Los eliminadores de gotas controlan esta pérdida de la torre.
- **Número de ciclos de concentración:** Cociente entre el número de sólidos disueltos en el agua de recirculación y el número de sólidos disueltos en el agua de reposición.
- **Purga:** Agua que se descarga del sistema para controlar la concentración de sales u otras impurezas en la balsa de la torre (kg/h).
- **Rango o salto térmico:** Diferencia entre la temperatura del agua caliente y la temperatura del agua fría. (°C). También es conocido como rango de enfriamiento.