

ESTUDIO Y CALCULO PARA LA SELECCIÓN DE UNA TORRE DE  
ENFRIAMIENTO EN LA COMPAÑÍA COLOMBIANA DE CLINKER S.A  
(COLCLINKER)

IVAN JOSE JIMENO TEJEDA

CARLOS ALBERTO OLMOS RUIZ

Trabajo de grado presentado  
como requisito parcial para  
optar por el título de  
Ingeniero Mecánico.  
Director: José Jimeno  
Ing. Mecánico

CORPORACION UNIVERSITARIA TECNOLOGICA DE BOLIVAR

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA

CARTAGENA D.T Y C.

1999

Nota de aceptación

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

Cartagena, 29 de enero de 1999

ESTUDIO Y CALCULO PARA LA SELECCIÓN DE UNA TORRE DE  
ENFRIAMIENTO EN LA COMPAÑÍA COLOMBIANA DE CLINKER S.A  
(COLCLINKER)

IVAN JOSE JIMENO TEJEDA  
CARLOS ALBERTO OLMOS RUIZ

CORPORACION UNIVERSITARIA TECNOLOGICA DE BOLIVAR  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
CARTAGENA D.T Y C.

1999

La Corporación se reserva el derecho de propiedad intelectual de todos los trabajos de grado aprobados, los cuales no pueden ser explotados comercialmente sin su autorización.

Cartagena, Septiembre 11 de 1998

Señores:

CORPORACION UNIVERSITARIA TECNOLOGICA DE BOLIVAR

Atención : Ing. Justo Ramos

Decano Facultad de Ingeniería Mecánica

Ciudad.

Apreciados señores:

De la manera más atenta me permito informarles que he dirigido a los estudiantes IVAN J. JIMENO TEJEDA y CARLOS A. OLMOS RUIZ: en su proyecto titulado: " ESTUDIO Y CALCULO PARA LA SELECCIÓN DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO PARA LA COMPAÑÍA COLOMBIANA DE CLINKER S.A". presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Atentamente.

---

JOSE JIMENO

Ing. Mecánico

Cartagena, Septiembre 11 de 1998

Señores:

CORPORACION UNIVERSITARIA TECNOLOGICA DE BOLIVAR  
Atención : Ing. Justo Ramos  
Decano Facultad de Ingeniería Mecánica  
Ciudad.

Apreciados Señores:

Adjunto a la presente nos permitimos hacer entrega del proyecto de grado titulado "ESTUDIO Y CALCULO PARA LA SELECCIÓN DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO PARA LA COMPAÑÍA COLOMBIANA DE CLINKER S.A". requisito parcial para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Agradecemos de antemano la atención que se sirvan prestar a ella.

Atentamente.

---

IVAN J. JIMENO TEJEDA

---

CARLOS A. OLMOS RUIZ

## DEDICATORIA

Este proyecto que hoy culmino es dedicado con gran cariño a mis padres y hermanos. Quienes en todo momento me brindaron su confianza y apoyo.

A toda mi familia.

IVAN

## DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico con mucho cariño a mis padres, hermanos y amigos que confiaron en mi y me apoyaron en todo momento.

A toda mi familia.

CARLOS

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

JUSTO RAMOS. Ing. Decano de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar

MIGUEL A. ROMERO. Ing. Docente de la Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar.

JOSE R. JIMENO. Ing. Director del proyecto.

HELBERT CARRILLO. Ing. Docente de la Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar.

JORGE VILLADIEGO. Ing. Jefe del dpto. de obras civiles de Colclinker S.A.

COLCLINKER S.A.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	
1. CONCEPTO DE CALOR	3
1.1. GENERALIDADES DE TEMPERATURA	3
1.1.1. Dilatación	7
1.2. NATURALEZA DEL CALOR	8
1.2.1. Calor	8
1.2.1.1. Capacidad Calorífica	9
1.2.1.2. Calor sensible	9
1.2.1.3. Calor latente	10
2. TRANSFERENCIA DE CALOR	11
2.1. CONDUCCIÓN	11
2.2. CONVECCIÓN	11
2.3. RADIACIÓN	12
3. PSICROMETRÍA	13
3.1. DEFINICIÓN	13

3.2. LA HUMEDAD ABSOLUTA	14
3.3. EL PORCENTAJE DE HUMEDAD ABSOLUTA	15
3.4. EL PUNTO DE ROCIO O TEMPERATURA DE SATURACIÓN	15
3.5. EL CALOR HÚMEDO	15
3.6. EL VOLUMEN HÚMEDO	16
3.7. EL VOLUMEN SATURADO	16
3.8. LA TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO	16
3.9. TEMPERATURA DE SATURACIÓN ADIABÁTICA O LÍNEAS DE ENTALPÍA CONSTANTE	17
3.10. RELACIÓN ENTRE LAS TEMPERATURAS DE BULBO HÚMEDO Y DE SATURACIÓN ADIABÁTICA	18
3.11. TEORÍA DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO	18
3.12. Torres de tiro mecánico	21
3.11.1. Torre de tiro forzado	22
3.11.2. Torre de tiro inducido	22
3.11.1.2.1. Torre de contraflujo	23
3.11.1.2.2. Torre de flujo transversal	23
3.11.2. Tiempo de contacto	25
3.11.3. Concentración de agua	26
3.11.4. Operación de una torre de enfriamiento	27
3.11.5. Potencia del ventilador	29

3.11.6. Potencia de bombeo	32
3.11.7. Abatimiento de neblina y bruma	33
3.11.8. Torre de tiro natural	39
3.11.9. Tanques de rocío	41
3.11.10. Estanques de enfriamiento	42
4. SELECCIÓN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO	44
4.1. CONSUMO DE AGUA Y TEMPERATURA DE TRABAJO	44
4.2. TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO Y BULBO SECO	46
4.3. DATOS PARA LA SELECCIÓN DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO	46
4.4. CALCULO DE LA CARGA TÉRMICA	47
5. CONTROL DE LA CARGA TERMICA	56
5.1. INCRUSTACIONES	57
5.1.1. Factores que afectan la incrustación	58
5.1.1.1. Temperatura	58
5.1.1.2. Ph	58
5.1.1.3. Velocidad de flujo	59
5.1.1.4. Dirección de flujo	59
5.1.1.5. Corrosión	59
5.1.1.6. Sólidos suspendidos	59
5.1.1.7. Actividad microbológica	59

5.1.2. Precipitación del Carbonato de Calcio	60
5.1.2.1. Índice de saturación de langelier	60
5.1.2.2. Índice de estabilidad de ryzner	61
5.1.3. Prevención de incrustación	62
5.2. ENSUCIAMIENTO O FOULING	63
5.2.1. Control de ensuciamiento	64
5.2.1.1. Ajustes mecánicos	64
5.2.1.2. Inhibidores químicos	65
5.2.1.2.1. Dispersantes	65
5.2.1.2.2. Floculantes	65
5.2.1.2.3. Surfactantes	66
5.3. CORROSIÓN	66
5.3.1. Causas de la corrosión	66
5.3.2. Prevención de la corrosión	69
5.3.2.1. Inhibidores anódicos	69
5.3.2.2. Inhibidores catódicos	70
5.3.2.3. Inhibidores anódicos/catódicos orgánicos	71
5.4. DEPOSITOS BIOLÓGICOS	71
5.4.1. Generalidades	71
5.4.2. Control microbiológico	72

6. TRATAMIENTO Y CONTROL DEL AGUA DE ENFRIAMIENTO	75
6.1. TRATAMIENTO	76
6.2 DESCRIPCIÓN Y FORMA DE DOSIFICACIÓN DE LOS PRODUCTOS	77
6.2.1. Betz 2020	77
6.2.2. Betz 2040	77
6.2.3. Slimicide dc-364 y Slimicide j-12	78
6.2.4. Betz 407-c	79
6.2.5. Cloro	80
6.2.6. Acido sulfúrico y soda caústica	80
6.3. CONTROL DE TRATAMIENTO	81
6.3.1. Ph	81
6.3.2. Betz 2020	82
6.3.3. Ortofosfato filtrado	82
6.3.4. Cloruros	82
6.3.5. Dureza total	83
6.3.6. Cloro residuo libre	83
6.3.7. Hierro	84
6.3.8. Aluminio	84
6.3.9. Hidrocarburos (grasas, aceites, etc.)	85
6. EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO	86

8. UBICACIÓN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO	90
8.1. AREA DE ESTUDIO	90
8.2. UBICACIÓN	90
8.3. CLIMATOLOGIA	91
8.3.1. Temperatura	91
8.3.2. Humedad relativa	92
8.3.3. Precipitación	92
8.3.4. Radiación solar	93
8.3.5. Dirección y velocidad del viento	93
8.4. PROPOSITO DE ESTUDIO	94
8.5. AMBIENTE GEOLÓGICO	94
8.5.1. Metodología de interpretación	96
8.5.2. Propiedades físicas de los suelos	97
8.5.3. Propiedades mecánicas de los suelos	98
8.5.4. Carga de contacto	99
8.6. UBICACIÓN DEL OBJETO DE ESTUDIO	100
9. SISTEMA DE RED DE TUBERIA	107
9.1. SISTEMA DE RED DE TUBERÍA	107
9.2. PROYECTO DE LA TUBERIA DE AGUA	109

9.3. DISEÑO DE CIRCUITO	110
9.3.1. Accesorio	111
9.3.2. del sistema	
9.4. CABEZA TOTAL	111
9.5. NPSH DISPONIBLE DE UN SISTEMA	112
9.6. NPSH REQUERIDO DE LA BOMBA	113
10. MANTENIMIENTO	121
10.1. FINALIDAD	121
10.2. MANDOS Y CONTROLES	121
10.2.1. Mandos y Controles	122
10.2.2. Ventilador	122
10.3. EN SITIO	123
10.3.1. Tanque y Bomba	123
10.3.2. Ventilador	122
10.4. LUBRICACIÓN	124
10.4.1. Motores de bomba y ventilador	124
10.4.2. Reductor	124
10.5. MANTEMIENTO MECANICO	125
10.5.1 Torre de enfriamiento	125
10.5.2. Ventilador	126

10.5.3. Bomba	126
10.5.4. Red de tuberías	127

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFIA

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Consumo de agua	49
Cuadro 2. Temperatura del aire bulbo seco y temperatura del aire bulbo húmedo.	101
Cuadro 3. Temperatura mensual promedio, máxima y mínima.	102
Cuadro 4. Humedad relativa en Mamonal	103
Cuadro 5. Precipitación mensual en radiación solar medidas en horas estación	104
Cuadro 6. Promedio mensual en radiación solar medidas en horas de estación	105
Cuadro 7. Valores medios mensuales de velocidad del viento en metros por segundo en Mamonal	106
Cuadro 8. Promedio mensual de días con lluvias	107
Cuadro 9. Cálculos de pérdidas por accesorios y longitud de tuberías	117

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Equilibrio térmico	4
Figura 2. Termómetro Celsius y Fahrenheit	6
Figura 3. Dilatación	7
Figura 4. Balance calorífico de una torre de enfriamiento	20
Figura 5. Arreglo de trayectoria en paralelo para el abastimiento de bruma	35
Figura 6. Torre de tiro natural	36
Figura 7. Torre de tiro inducido	37
Figura 8. Torre de tiro forzado	38
Figura 9. Controlador de corrosión eléctrico	89

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Copias de los catálogos del consumo de agua para la refrigeración	132
Anexo B. Cotizaciones de la Torre de Enfriamiento	133
Anexo C. Controlador de PH	134
Anexo D. Carta para la selección de los diámetros de tuberías.	135

## RESUMEN

El objetivo de este estudio es darle solución a los problemas de sedimentación, obstrucción y corrosión en la tubería de recirculación de agua enfriante, y recalentamiento de equipos que necesitan refrigeración por agua en la planta.

Mediante la implementación de una Torre de Enfriamiento se realiza un estudio del calor generado por dichos equipos los cuales presentan a su vez condiciones de trabajo como: Temperatura de entrada y de salida, diámetro de tubería, caudal y presión de trabajo. Con estos datos y teniendo en cuenta la temperatura del aire bulbo húmedo y bulbo seco, temperatura mínima de entrada y con el caudal total necesario para todos los equipos se procede a seleccionar la Torre de Enfriamiento.

Para evitar la formación de incrustaciones fouling y depósitos en general se diseña un plan de ataque químico para el agua de enfriamiento. Para un buen control se describe la dosificación y periodicidad de cada uno de los productos químicos utilizados para este fin. Para un monitoreo continuo se recomiendan equipos especiales que facilitaran los datos que se requieran en cualquier momento.

Para evitar que se produzcan paradas inesperadas de los equipos por fallas mecánicas de la Torre de Enfriamiento se diseño un plan de mantenimiento a sus ventiladores, motores, bombas, estructura, caja reductora, tanque y red de tubería.

En cuanto a la ubicación se tuvieron en cuenta los estudios de suelo, radiación solar, carga de contacto dirección y velocidad del viento.

Se diseñó la red de tubería, la cual de acuerdo con las características y condiciones de la distribución de los equipos, se definió como un sistema de recirculación abierto con colector de retorno inverso con tramos de verticales de retorno libre.

## INTRODUCCION

La refrigeración mecánica es el proceso mediante el cual se reduce la temperatura de una sustancia por debajo de la que prevalece en su ambiente. La industria de cementos es uno de los usuarios más importante de las instalaciones de refrigeración para equipos. Y es por dicho proceso que se realiza el estudio para implementar una Torre de Enfriamiento en la Compañía Colombiana de Clinker S.A.

En el procedimiento de implementar la Torre de Enfriamiento intervienen muchos factores que hay que tener en cuenta como:

Transferencia de calor la cual puede realizarse de tres maneras diferentes, Conducción, Convección y Radiación.

En la Psicometría encontramos las propiedades de las mezclas de un gas y un vapor, conceptos de humedad absoluta, punto de rocío, temperatura de bulbo húmedo, teorías para el diseño de Torres de Enfriamiento, y tipos de torre de enfriamiento.

El consumo de agua, la temperatura de trabajo, temperatura de bulbo húmedo y de bulbo seco, son factores fundamentales para la selección de la Torre de Enfriamiento.

El control de incrustaciones, ensuciamiento o fouling, depósitos biológicos y corrosión se logran a través de un plan de ataque químico al agua de enfriamiento.

Estudios de suelo, radiación solar dirección y velocidad del viento son factores importantes para la ubicación de la Torre de Enfriamiento, al igual que el tipo de red de tubería.

## 1. CONCEPTOS DE CALOR

### 1.1 GENERALIDADES DE TEMPERATURA.

La *energía térmica* representa la energía interna total de un objeto, es decir, la suma de sus energías moleculares cinética y potencial.

Cuando tocamos un objeto, utilizamos nuestro sentido para atribuirle una propiedad denominada *temperatura*, que determina si se percibe caliente o frío al tacto.

Cuando dos objetos con diferente energía térmica se ponen en contacto se transfiere energía de uno a otro. Finalmente se puede alcanzar un estado en el que ya no se produce ningún intercambio térmico. Y esto se llama *equilibrio térmico* (ver figura 1).

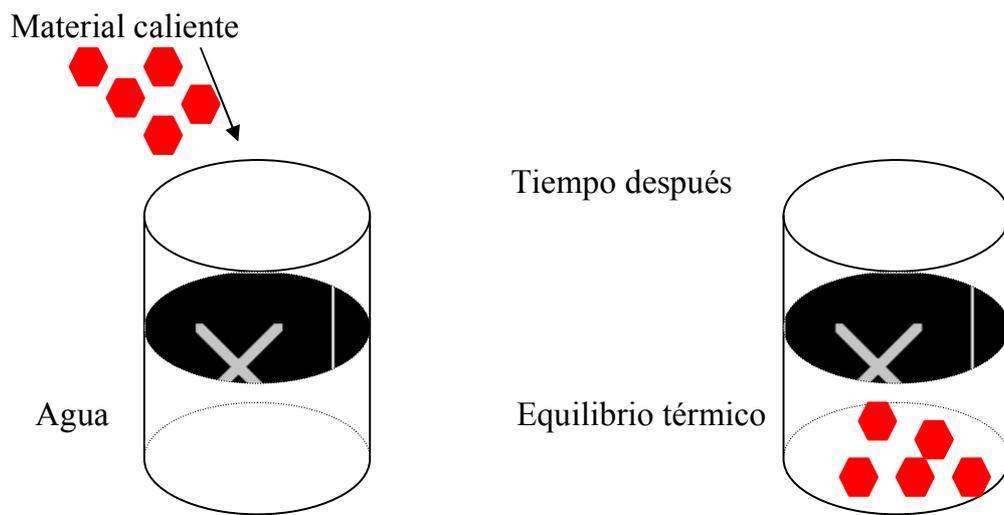


Figura 1. Equilibrio térmico.

La ciencia que estudia la medición de la temperatura se llama termometría. En general, la temperatura se determina al medir alguna cantidad mecánica, óptica o eléctrica que varía con la misma. La variación puede usarse como calibración al medir temperatura. Tal dispositivo se llama termómetro. De esta manera es posible medir la temperatura de otro objeto al colocar el termómetro en contacto con el y permitiendo que ambos alcancen equilibrio térmico. Un *termómetro* es un dispositivo que, por medio de una escala marcada, puede dar una indicación de su propia temperatura. Para la construcción de un termómetro es necesario tener en cuenta, una condición que es *equilibrio de fases*, y la temperatura a la que este puede existir, para una sustancia determinada, donde sus principales puntos son el cambio de estado (punto de congelación y ebullición). Que son sólido, líquido y gaseoso.

Las principales escalas de los termómetros son: Celsius ( $C^{\circ}$ ) y Fahrenheit ( $F^{\circ}$ ).

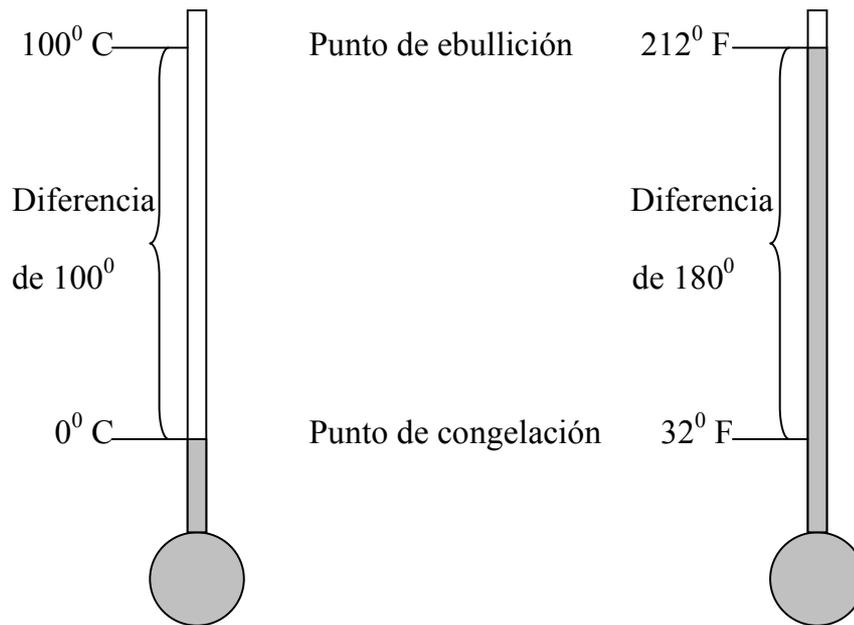


Figura 2. Termómetros Celsius y Fahrenheit

El termómetro más conocido y utilizado es el mercurio (ver figura 2).

1.1.1. Dilatación. Es el efecto más común que produce un cambio de temperatura y se nota en el cambio de tamaño. Los átomos de material se mantienen unidos en un arreglo debido a la acción de fuerzas eléctricas. A cualquier cambio de temperatura los átomos vibran con cierta frecuencia y amplitud, esta dilatación se va a notar ya sea en la longitud, superficie y volumétrica (ver figura 3).

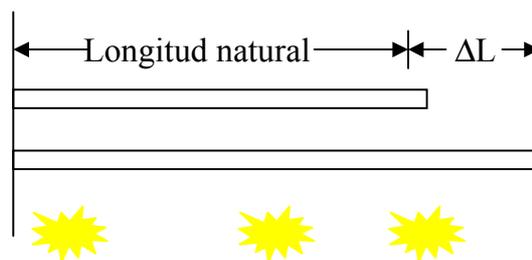


Figura 3. Dilatación

## 1.2 NATURALEZA DEL CALOR

1.2.1. Calor. Es la cantidad de energía que se transfiere de un objeto a otro, y el objeto que tiene mayor temperatura ha cedido energía térmica al objeto de menor temperatura.

El calor es simplemente otra forma de energía que puede medirse solo en función del efecto que produce. Los mecanismos en virtud de los cuales puede fluir el calor son tres: conducción, convección y radiación, que se hablarán de ellos más adelante.

Sus unidades son la caloría ( cal ) y la unidad térmica británica ( BTU = British thermal unit ).

- Una caloría ( cal ) es la cantidad de calor necesaria para elevar en un grado Celsius la temperatura de un gramo de agua.
- Una unidad térmica británica ( BTU ) es la cantidad de calor necesaria para elevar en un grado Fahrenheit la temperatura de una lb de agua.

1.2.1.1. Capacidad calorífica. La capacidad calorífica de un cuerpo es la razón de la cantidad de calor suministrado con el correspondiente incremento de temperatura del cuerpo.

$$\text{Capacidad calorífica} = \frac{Q}{\Delta t}$$

Sus unidades son: ( cal/C<sup>0</sup> ), ( BTU/F<sup>0</sup> )

1.2.1.2. Calor sensible. La capacidad calorífica específica, calor específico o calor sensible de un material es la cantidad de calor necesario para elevar un grado la temperatura de una unidad de masa. Este es el calor que causa un cambio en la temperatura de una sustancia, pero no un cambio en el estado de ella misma. La sustancia bien sea estado sólido, líquido o gaseoso.

$$C = \frac{Q}{m * \Delta t} \quad Q = m * C * \Delta t$$

1.2.1.3. Calor latente. Para sustancias puras, los efectos caloríficos que acompañan a los cambios de estado a presión constante se conocen como efectos latentes. Por que no se manifiestan cambios de temperatura.

## 2. TRANSFERENCIA DE CALOR

### 2.1. CONDUCCIÓN.

Si una sustancia continua existe un gradiente de temperatura, el calor puede fluir sin que se produzca un desplazamiento observable en la materia. La conducción tiene lugar a escala molecular, y el mecanismo corresponde a un transporte de la cantidad de movimiento de las moléculas individuales a lo largo del gradiente de temperatura. El ejemplo más corriente de conducción se presenta en el flujo de calor a través de sólidos opacos, tales como ladrillos de las paredes de un horno o la pared de un tubo metálico.

### 2.2. CONVECCIÓN.

Cuando una corriente o partícula macroscópica de un fluido atraviesa una determinada superficie, tal como la envoltura de un volumen de control, lleva consigo una definida cantidad de entalpía. Este flujo de entalpía se llama flujo convectivo de calor o, simplemente, convección.

La convección es un fenómeno macroscópico, sólo puede tener lugar cuando actúan sobre la partícula o corriente de fluido fuerzas, que son capaces de mantener el movimiento, venciendo las fuerzas de fricción. La convección está íntimamente relacionada con la mecánica de los fluidos. Desde el punto de vista termodinámico, la convección no se considera de hecho como un flujo de calor, sino como una densidad de flujo de entalpía.

En la práctica es difícil separar la convección de la conducción verdadera cuando ambas se engloban conjuntamente bajo el nombre de convección. Ejemplo: la corriente de aire caliente que circula en un radiador ordinario de calefacción.

### 2.3. RADIACIÓN.

Radiación es la denominación que recibe la transmisión de energía a través del espacio mediante ondas electromagnéticas. Si la radiación se transmite a través del vacío no se transforma en calor u otra forma de energía ni sufre desviaciones en su trayectoria. Sin embargo, si encuentra materia en su camino, la radiación puede ser transmitida, reflejada o absorbida. Solamente la energía absorbida se transforma en calor, siendo esta transformación cuantitativa. Por ejemplo, una superficie negra o mate absorbe casi toda la radiación que recibe, transformándose la energía absorbida cuantitativamente en calor.

### 3.PSICROMETRIA

#### 3.1. DEFINICIÓN.

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

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

durante el periodo de secado a velocidad constante, aunque la temperatura y la humedad de la corriente varíe.

### 3.2. LA HUMEDAD ABSOLUTA.

Es igual a las libras de vapor de agua transportadas por una libra de aire seco. si se presupone un comportamiento de gas ideal tenemos.

$$H = \frac{M_w * p}{[M_a(P - p)]}$$

en donde  $M_w$  = peso molecular del agua

$M_a$  = peso molecular del aire

$p$  = presión parcial del vapor de agua en atm.

$P$  = presión total en atm.

Cuando la presión parcial  $p$  del vapor de agua en el aire, a una temperatura dada, es igual que la presión de vapor de agua  $p_s$ , a la misma temperatura, el aire está saturado y la humedad absoluta se designa como la humedad de saturación  $H_s$ .

### 3.3. EL PORCENTAJE DE HUMEDAD ABSOLUTA. (Porcentaje de saturación).

Se define como la razón de la humedad absoluta a la saturación y está dada por.

$$\frac{100 * H}{H_s} = \frac{100 * p(P - p_s)}{p_s(P - p)}$$

### 3.4. EL PUNTO DE ROCÍO O TEMPERATURA DE SATURACIÓN.

Es la temperatura a la que una mezcla dada de vapor de agua y aire se satura, es decir, la temperatura a la que el agua ejerce una presión de vapor igual a la presión parcial del vapor de agua en la mezcla dada.

3.5. El calor húmedo,  $c_s$ . Es la capacidad calorífica de 1 lb de aire seco y la humedad que contiene. Para mayor parte de los cálculos de ingeniería.

$$c_s = 0.24 + 0.45 * H$$

en donde 0.24 y 0.45 son las capacidades caloríficas del aire seco y el vapor de agua, respectivamente, y se supone que ambas son constantes.

3.6. El volumen húmedo. Es el volumen en pies cúbicos de 1 lb de aire seco y el vapor de agua que contiene.

3.7. El volumen saturado. Es el volumen húmedo cuando el aire está saturado.

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

$$k_g \lambda (p_s - p) = hc(t - t_w)$$

en donde  $k_g$  = coeficiente de transferencia de masa,  $\text{lb}/(\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{atm})$

$\lambda$  = calor latente de evaporación,  $\text{Btu}/\text{lb}$

$p_s$  = presión de vapor de agua a la temperatura de bulbo húmedo en atm.

$p$  = presión parcial del vapor de agua en el ambiente en atm.

$hc$  = coeficiente de transferencia de calor,  $\text{Btu}/(\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F})$

$t$  = temperatura de la mezcla de aire - vapor de agua (temperatura de bulbo seco) en  $^{\circ}\text{F}$

$t_w$  = temperatura de bulbo húmedo en  $^{\circ}\text{F}$

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

$$H_s - H = \frac{c_s}{\lambda}(t - t_s)$$

3.10. Relación entre las temperaturas de bulbo húmedo y de saturación adiabática. Se ha demostrado experimentalmente que, para sistemas de aire-agua, el valor de  $h_c/h'_{cs}$ . La razón psicrométrica es aproximadamente igual a 1. En estas condiciones, las temperaturas de bulbo húmedo y las de saturación adiabáticas son

más o menos iguales y se utilizan de manera intercambiable. La diferencia entre la temperatura de saturación adiabática y la de bulbo húmedo aumenta al incrementarse la humedad; pero este efecto no es muy importante en la mayoría de los cálculos de ingeniería.

Para sistemas que no sean de aire-vapor de agua, el valor de  $h_c/k'c_s$  difiere apreciablemente de la unidad y las temperaturas de bulbo húmedo y saturación adiabática dejan de ser iguales. Para estos sistemas.

3.11. Teoría de la torre de enfriamiento. La teoría del proceso de transferencia de calor en una torre de enfriamiento que ha merecido una aceptación más generalizada es la que desarrolló Merkel. Este análisis se basa en la diferencia del potencial de entalpía como fuerza impulsora.

Se supone que cada partícula de agua está rodeada por una película de aire y que la diferencia de entalpía entre la misma y el aire circundante proporciona la fuerza impulsora para el proceso de enfriamiento. La ecuación de Merkel se expresa en forma de la integral siguiente:

$$\frac{K * a * V}{L} = \int_{T_2}^{T_1} \frac{dT}{h' - h}$$

en donde  $K$  = coeficiente de transferencia de masa en lb de agua/(h\*ft<sup>2</sup>)

$a$  = área de contacto en ft<sup>2</sup>/ft<sup>3</sup> de volumen de torre

$V$  = volumen de enfriamiento activo en ft<sup>3</sup>/ft<sup>2</sup> de área plana

$L$  = velocidad del agua lb/(h\*ft<sup>2</sup>)

$h'$  = entalpía del aire saturado a la temperatura del agua en Btu/lb

$h$  = entalpía de la corriente de aire en Btu/lb

$T_1$  y  $T_2$  = temperaturas del agua de entrada y salida en °F

El lado derecha de la ecuación se expresa por completo en términos de las propiedades del aire y el agua y es independiente de las dimensiones de la torre.

En la siguiente figura se ilustran las relaciones del agua y el aire y el potencial impulsor que existe en un torre de contraflujo, en donde el aire fluye en sentido paralelo, pero siguiendo una dirección opuesta al flujo del agua. La comprensión de este diagrama constituye una base importante para entender el proceso de la torre de enfriamiento.

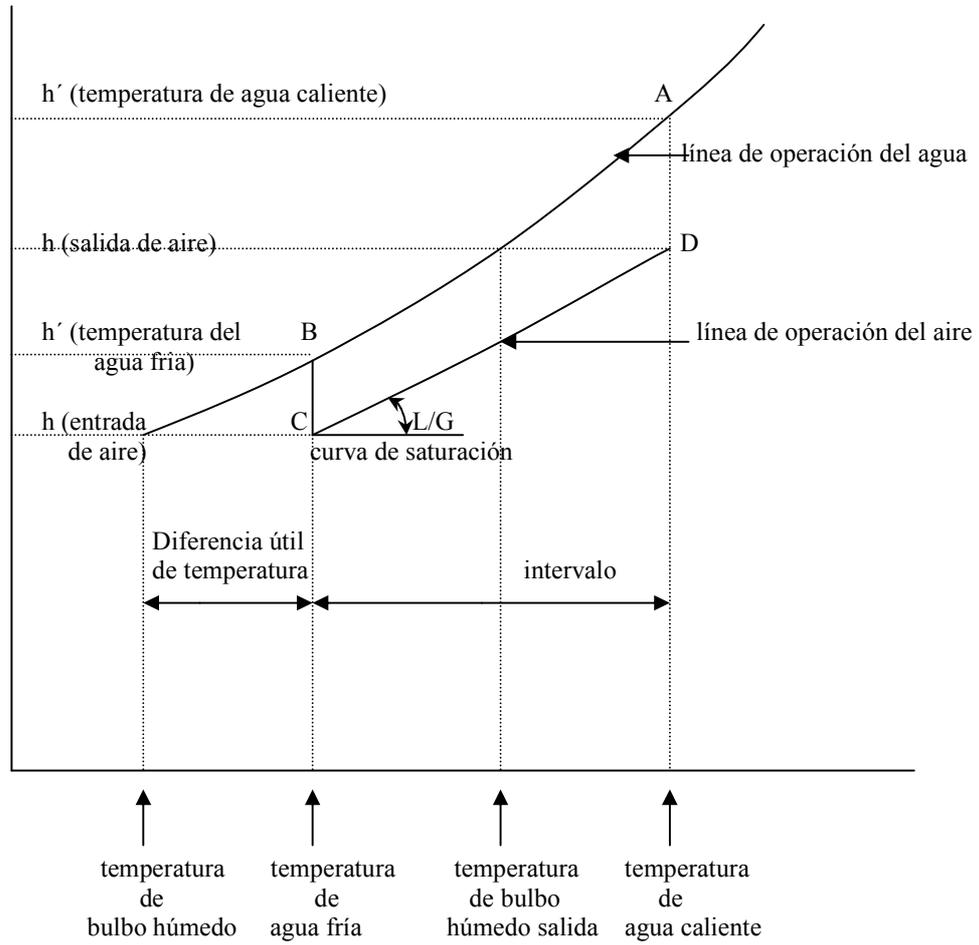


Figura 4. Balance calorífico de una torre de enfriamiento.

La línea de operación del agua está representada por la línea  $AB$  y se especifica por medio de las temperaturas del agua de la torre en la entrada y la salida. La línea de operación del aire principia en  $C$ , verticalmente por debajo de  $B$ , y en un punto que tiene una entalpía correspondiente a la temperatura de entrada del bulbo húmedo. La línea  $BC$  representa la fuerza impulsora inicial ( $h' - h$ ). Para enfriar el agua  $1^\circ\text{F}$ , la entalpía por libra de aire aumenta  $1\text{Btu}$  multiplicada por la razón de libras de agua por libra de aire. La relación líquido/gas  $L/G$  es la pendiente de la línea de operación. El aire que sale de la torre se representa por medio del punto  $D$  y la gama de enfriamiento es la longitud proyectada de la línea  $CD$  sobre la escala de temperatura. La diferencia útil de temperatura en la torre de enfriamiento se ilustra en el diagrama, como la diferencia entre la temperatura del agua fría que sale de la torre y la temperatura de bulbo húmedo del ambiente.

3.11.1 Torres de tiro mecánico. En la actualidad se emplean dos tipos de torres de tiro mecánico; el de tiro forzado y el de tiro inducido.

3.11.1.1. Torre de tiro forzado, el ventilador se monta en la base y se hace entrar el aire en la base de la misma y se descarga con baja velocidad por la parte superior. Esta disposición tiene la ventaja de ubicar el ventilador y el motor propulsor fuera de

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

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

3.11.1.2.1 Torre a contraflujo. Desde el punto de vista termodinámico, la configuración a contraflujo es más eficaz, ya que el agua más fría entra en contacto con el aire más frío, obteniendo así un potencial máximo de entalpía. Cuanto mayores son los intervalos de enfriamiento y más difícil la diferencia útil de

temperaturas, tanto más evidentes serán las desventajas del tipo de contraflujo. Por ejemplo, con una razón L/G de 1, una temperatura ambiente de bulbo húmedo de 25.5°C (78°F), la torre de contraflujo requiere una característica  $KaV/L$  de 1.75 para una diferencia útil de temperaturas de 2.8° (5°F), mientras que la torre de flujo transversal precisa una característica de 2.25 para lograr la misma diferencia útil de temperaturas. No obstante, si el acercamiento se aumenta a 3.9°C (7°F), los dos tipos de torre tiene más o menos el mismo valor requerido de  $KaV/L$  (menor que 1%).

3.11.1.2.2. Torres de flujo transversal puede reducir con eficacia la característica de torre a acercamientos muy bajos incrementando la cantidad de aire para proporcionar una razón L/G más baja. El aumento en el flujo de aire no se logra necesariamente incrementando la velocidad del mismo, sino sobre todo alargando la torre para aumentar el área de corte transversal para el flujo de aire. Así pues, es obvio que el llenado para flujos transversales se hace progresivamente más largo en la dirección perpendicular al flujo de aire y más corto en la dirección de éste, hasta que casi pierde su desventaja inherente de la diferencia de potencial. Con todo, al lograr esto se incrementa el consumo de potencial de ventilador.

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

El resultado del funcionamiento de un tipo específico de torre de enfriamiento está dictaminado por la razón de los pesos de aire y agua y el tiempo de contacto entre uno y otra. En la práctica comercial, la variación en la razón de aire a agua se obtiene primeramente manteniendo constante la velocidad del aire a 350 ft/(min · ft<sup>2</sup> de área activa de la torre) y haciendo variar la concentración de agua, gal/(min · ft<sup>2</sup> de área de torre).

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

3.11.2. El tiempo de contacto, entre el agua y el aire se dictamina en mayor grado por el tiempo necesario para que el agua se descargue por las boquillas y caiga a través de la torre hasta el depósito. En consecuencia, el tiempo de contacto se obtiene en un tipo determinado de unidad haciendo variar la altura de la torre. Si el tiempo de contacto es suficiente, ningún incremento en la relación de aire a agua generará el enfriamiento deseado. Por tanto, es necesario mantener cierta altura

mínima en las torres de enfriamiento. Cuando se requiere un acercamiento de temperaturas de bulbo húmedo entre 8 y 11°C (15 a 20°F) y un intervalo de enfriamiento de 13.9 a 19.4°C (25 a 35°F), bastará con una torre relativamente baja. Dicho de otra manera, una torre en la que el agua se desplaza de 4.6 a 6.1 m (15 a 20 ft) desde el sistema de distribución hasta el depósito será suficiente. Cuando se necesita un acercamiento moderado de temperaturas y un intervalo de enfriamiento de 13.9 a 19.4°C (25 a 35°F) una torre en la que el agua recorra de 7.6 a 9.1 m (25 a 30 ft) es adecuada. Cuando se tiene una diferencia útil de temperatura más crítica, de 4.4°C (8°F) con un intervalo de enfriamiento de 13.9 a 19.4°C (25 a 35°F), se necesitará una torre en la que el agua recorra de 10.7 a 12.2 m (35 a 40 ft). En general no resulta económico diseñar una torre de enfriamiento con una diferencia útil de temperaturas menor que 2.8°C (5°F), pero esto se logra con éxito si se cuenta con una torre en la que el agua se desplace de 10.7 a 12.2 m (35 a 40 ft).

3.11.3. Concentración de agua. El funcionamiento de enfriamiento de cualquier torre que tiene una profundidad dada varía con la concentración del agua. Se ha encontrado que el máximo contacto y el mejor rendimiento se obtienen con torres que poseen una concentración de agua de 2 a 5 gal/(min · ft<sup>2</sup> de área de suelo). Por ende, el problema de calcular el tamaño de una torre de enfriamiento consiste en determinar la concentración apropiada de agua que se necesita para alcanzar los

resultados deseados. Después de determinar la concentración de agua necesaria, el área de torre se calcula dividiendo los gal/min que circulan entre la concentración del agua expresada en gal/(min)(ft<sup>2</sup>). El tamaño de torre necesario es, pues, una función de lo siguiente:

1. Intervalo de enfriamiento (temperatura del agua caliente menos temperatura del agua fría).
2. Diferencia útil de temperaturas a la temperatura de bulbo húmedo (temperatura del agua fría menos temperatura de bulbo húmedo).
3. Cantidad de agua que se va a enfriar.
4. Temperatura de bulbo húmedo.
5. Velocidad del aire a través de la celda.
6. Altura de la torre.

3.11.4. Operación de una torre de enfriamiento. Los requisitos de acondicionamiento para una torre de enfriamiento consisten en la suma de las pérdidas de evaporación, pérdidas por arrastre y pérdidas a causa del viento; entonces,

$$W_m = W_e + W_d + W_b$$

En donde.  $W_m$  = agua de acondicionamiento

$W_d$  = pérdidas por arrastre

$W_b$  = pérdidas a causa del viento.

Las pérdidas por evaporación se pueden estimar mediante la ecuación:

$$W_e = 0.00085 W_c(T_1 - T_2)$$

En donde  $W_c$  = flujo de agua circulante, gal/min en la entrada de la torre.

$T_1 - T_2$  = temperatura del agua de entrada menos temperatura del agua de salida, °F.

El arrastre tiene lugar en los vapores de descarga de la torre. Las pérdidas por arrastre son una función del diseño del eliminador del arrastre, cuya variación usual es entre 0.1 y 0.2% del agua suministrada a la torre. Los nuevos desarrollos en el diseño del eliminador hacen posible reducir las pérdidas por arrastre en valores hasta por debajo de 0.1%.

Las deposiciones a cambio del viento se refieren a una parte del agua circulante que es desechada a consecuencia del proceso de evaporación, con objeto de disminuir la concentración de sólidos en el sistema. La cantidad de pérdidas puede calcularse de acuerdo con el número de ciclos de concentración requeridos para una formación a escala límite. Los ciclos de concentración son la relación de sólidos disueltos en el agua recirculante respecto a los sólidos disueltos en el agua de acondicionamiento. Como los cloruros permanecen solubles en la concentración, los ciclos pueden expresarse mejor como la relación del contenido de cloruros del agua respecto a las corrientes de recirculación y acondicionamiento. De acuerdo con esto, las cantidades de pérdidas a causa del viento se determinan de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\text{Ciclos de concentración} = (W_e + W_b)/W_b$$

o

$$W_b = W_e/(\text{ciclos} - 1)$$

Los ciclos de operación incluidos en la operación normal de las torres de enfriamiento se encuentran entre tres y cinco. Cuando se tienen menos de tres ciclos de concentración se requieren cantidades excesivas de flujo que se pierde a causa del viento, además de considerar la adición de ácido a escala límite.

3.11.5. Potencia del ventilador. Cuando se lleva a cabo un análisis del costo de una torre de enfriamiento y los costos de operación de la misma, uno de los factores más significativos debe ser el establecimiento de la potencia del ventilador. A través de las torres de enfriamiento circulan grandes cantidades de aire, con velocidades en la salida de hasta 10.2 m/s (2000ft/min) como máximo para torres de tiro inducido.

Las cantidades de flujo de aire en los ventiladores dependen de los factores de diseño del ventilador, entre las que se incluyen cuestiones tales como el tipo de relleno, la configuración de la torre y las condiciones de comportamiento térmico.

La salida eficaz del ventilador es la potencia del aire estático (SAHP), establecida de acuerdo con la expresión siguiente:

$$SAHP = \frac{Q(h_s)d}{33000(12)}$$

En donde  $Q$  = volumen de aire,  $\text{ft}^3/\text{min}$

$h_s$  = carga estática, pulgadas de agua

$d$  = densidad del agua a temperatura ambiente,  $\text{lb}/\text{ft}^3$ .

La potencia del ventilador de la torre de enfriamiento puede sufrir una reducción sustancial a causa de un decrecimiento en la temperatura de bulbo húmedo del ambiente, cuando se emplean motores de doble velocidad en los ventiladores. En teoría, cuando la operación se realiza a la mitad de la velocidad, la reducción en el flujo de aire es de 50% ocasionada por una reducción de un octavo de la potencia del motor, respecto a la operación a velocidad total. Sin embargo, la velocidad media real de operación requerirá aproximadamente el 17 % de la potencia a velocidad total, ya que existen pérdidas inherentes en el motor, cuando se registran cargas excesivas.

Los desarrollos más recientes en lo que se refiere al control de la energía para torres de enfriamiento también incluyen ventiladores de tipo hélice de inclinación variable y dispositivos del tipo inversor para permitir velocidades variables en los ventiladores. Estos esquemas incluyen el seguimiento de la carga a una temperatura *constante* del agua de salida.

El arreglo de inclinación variable en motores de velocidad constante cambia la inclinación de las aspas a través de una señal neumática originada en la temperatura del agua de salida. Como existe disminución en la carga térmica y/o temperatura de bulbo húmedo ambiente. La inclinación del aspa reduce el flujo de aire y se requiere menor energía en el ventilador.

Los inversores hacen posible controlar un ventilador de velocidad variable cambiando la modulación de frecuencia. Los motores de corriente alterna estándares para ventiladores pueden ser de velocidad regulada entre 0 y 60 Hz. Si se emplean inversores para esta aplicación es importante evitar frecuencias que puedan causar velocidades críticas en el ventilador.

A pesar de que se cree que el ahorro en energía puede tenerse a partir de estos arreglos, estos podrían no constituir el mejor sistema. Como un ejemplo, considérense los condensadores de vapor en una planta de energía y las unidades de refrigeración que pueden aprovechar el agua más fría de la torre para reducir el consumo de energía. Por lo general, estos ahorros son mayores que los obtenidos con ventiladores de torre con temperaturas constantes del agua de salida. Un condensador de la unidad de refrigeración puede utilizar las temperaturas del agua de entrada, por abajo y hasta  $12.8^{\circ}\text{C}$  (  $55^{\circ}\text{F}$  ) para reducir el consumo de ahorro de energía en un 25 a 30%.

3.11.6. Potencia de bombeo. Otro factor importante en el análisis de una torre de enfriamiento, en especial para torres de tamaño mediano y grande, es la parte de la potencia de la bomba atribuida directamente a la torre de enfriamiento. Cuando se trata de torres de enfriamiento con boquillas de aspersion, la carga estática de bombeo será igual a la ascensión estática más la pérdida de presión en las boquillas. Una torre del tipo de flujo cruzado o transversal con flujo por gravedad permite que la carga de bombeo sea igual a la elevación estática. Una reducción en la altura de la torre reducirá la elevación estática y esta reducción de potencia se obtiene de acuerdo a la expresión:

$$\text{Bomba } bhp = \frac{\text{gal/min}(h_t)}{3960(\text{eficiencia de la bomba})}$$

En donde  $h_t$  = carga total, ft

3.11.7. Abatimiento de neblina y bruma. Un fenómeno que ocurre con frecuencia en la operación de una torre de enfriamiento es la formación de neblina, que produce una bruma muy visible y con posibilidades muy altas de formación de hielo. La formación de neblina es ocasionada como resultado de la mezcla de aire caliente que abandona la torre con aire ambiente de enfriamiento, que carece de capacidad para

absorber toda la humedad como vapor. Aunque la formación de bruma no había sido considerada como un factor indeseable, la adecuada ubicación de las torres en tal forma que la fuente de quejas quede reducida al mínimo ha recibido en la actualidad la atención necesaria. En algunas ocasiones utilizan chimeneas en los ventiladores para reducir la neblina en la parte inferior de la torre. Aunque las chimeneas de gran altura minimizan los efectos de formación de bruma, es posible que no contribuyan en nada para evitar la saturación con vapor de agua y mejorar la visibilidad. La persistencia de la bruma es mayor en periodos de temperaturas bajas en el ambiente.

En los últimos tiempos, el aspecto ambiental ha recibido mayor atención, aunque aún existen personas que creen, en forma equivocada, que las descargas de las torres de enfriamiento son dañinas. Esto ha provocado que se diseñe un sistema de abatimiento de la bruma conocido como configuración de enfriamiento húmedo-seco. La reducción de la humedad relativa o contenido de la humedad en la corriente de descarga de la torre reducirá la frecuencia de formación de bruma.

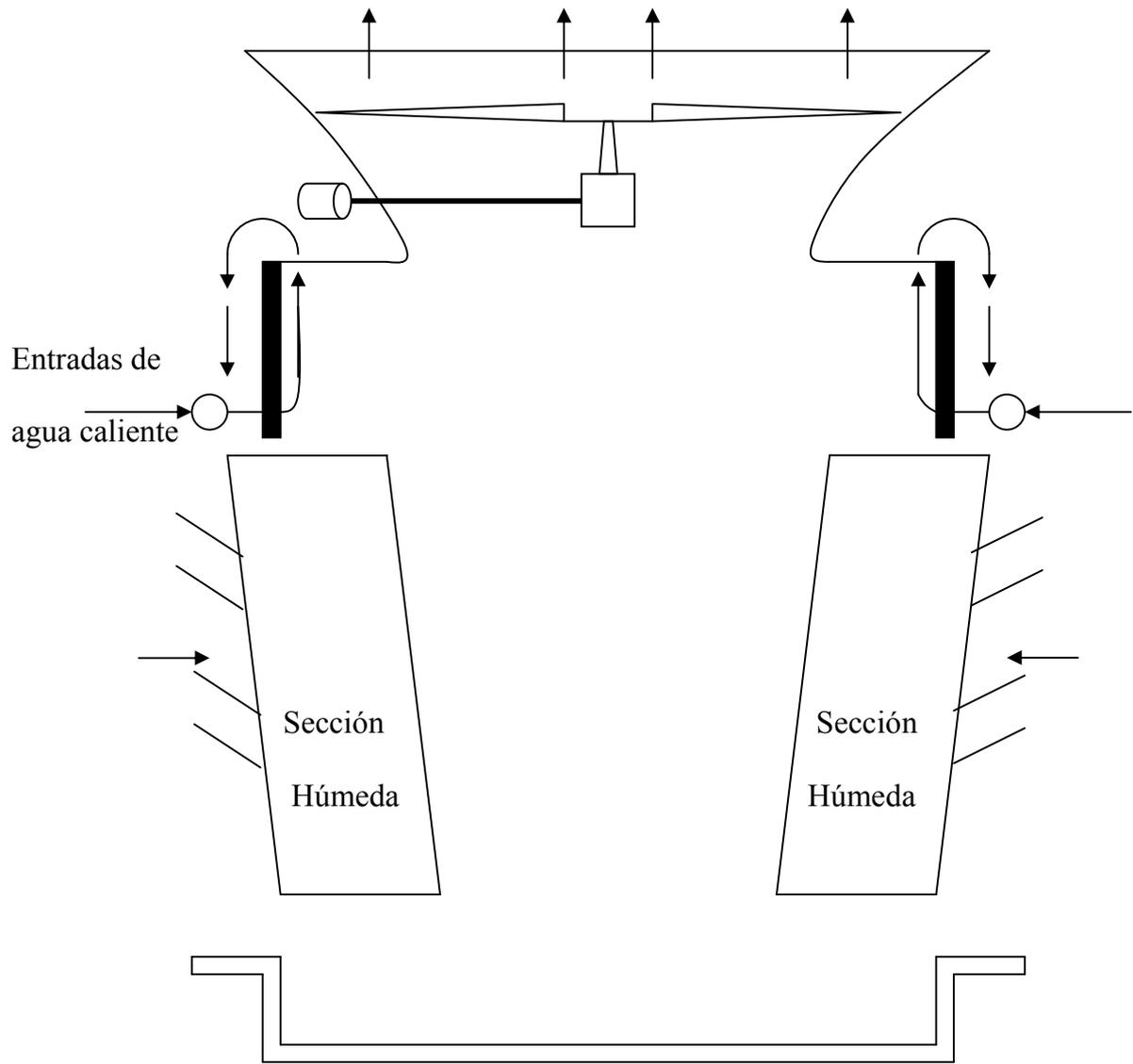


Figura 5. Arreglo de trayectoria en paralelo para el abatimiento de bruma

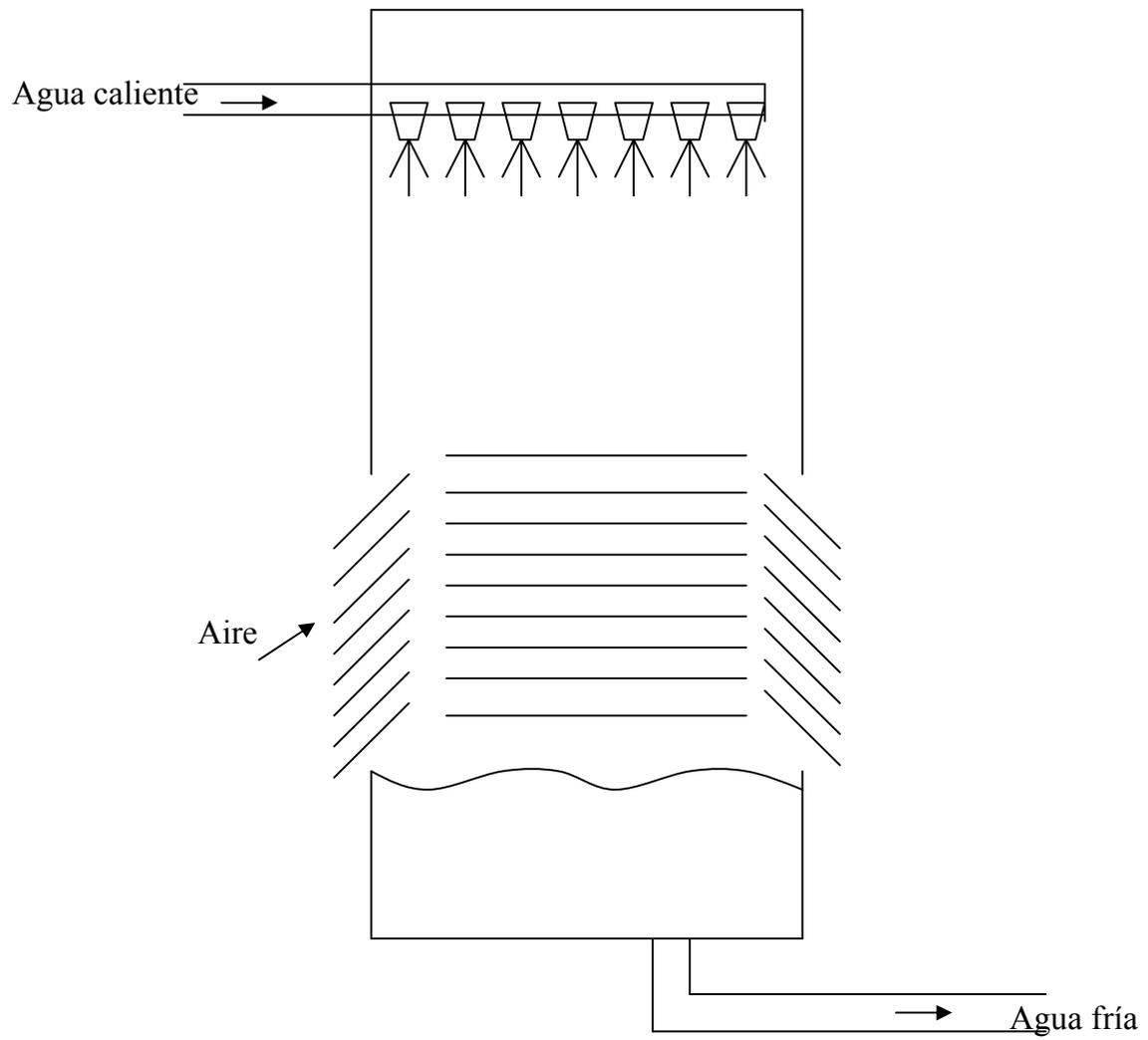


Figura 6. Torre de tiro natural.

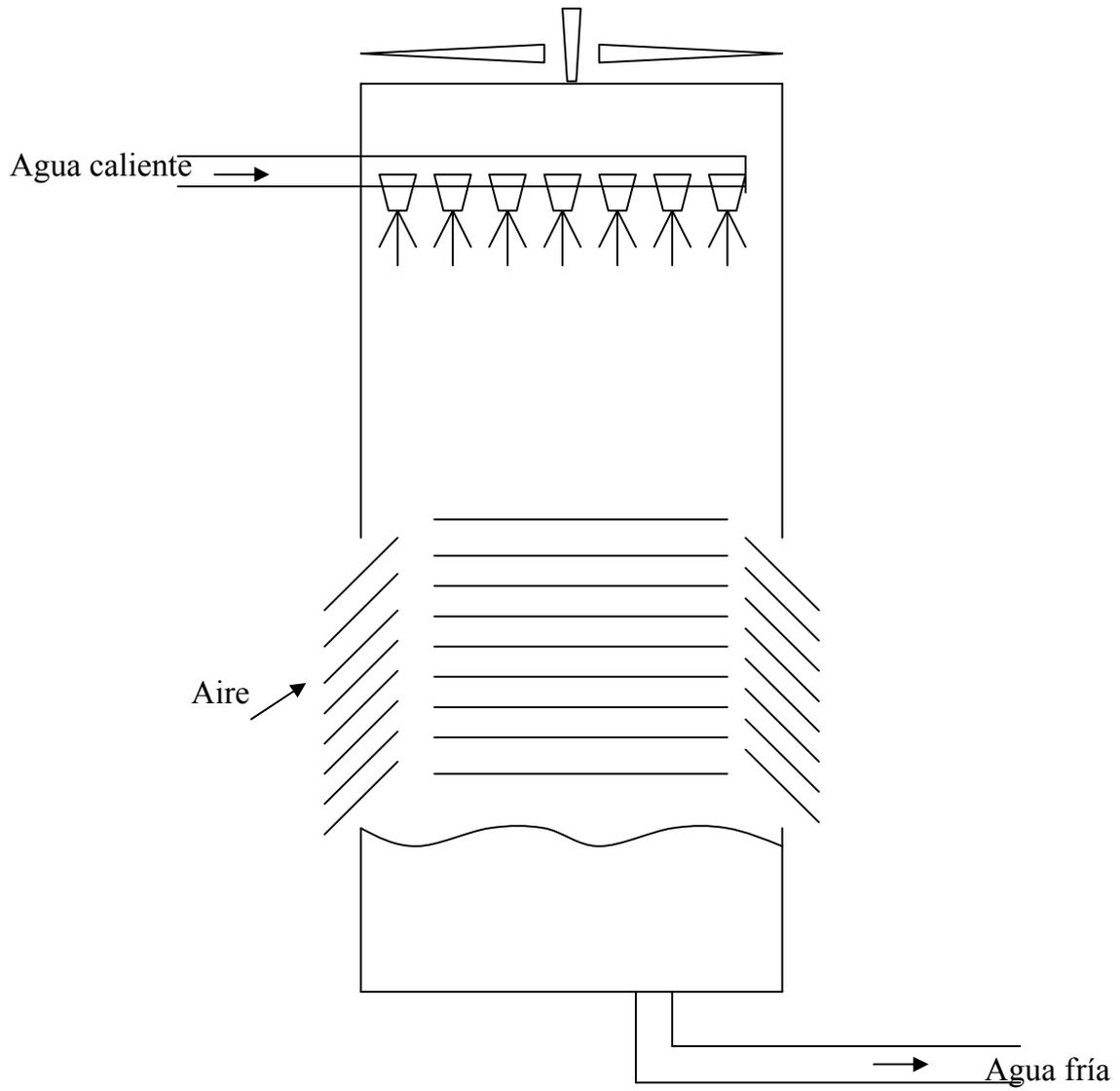


Figura 7. Torre de tiro inducido.

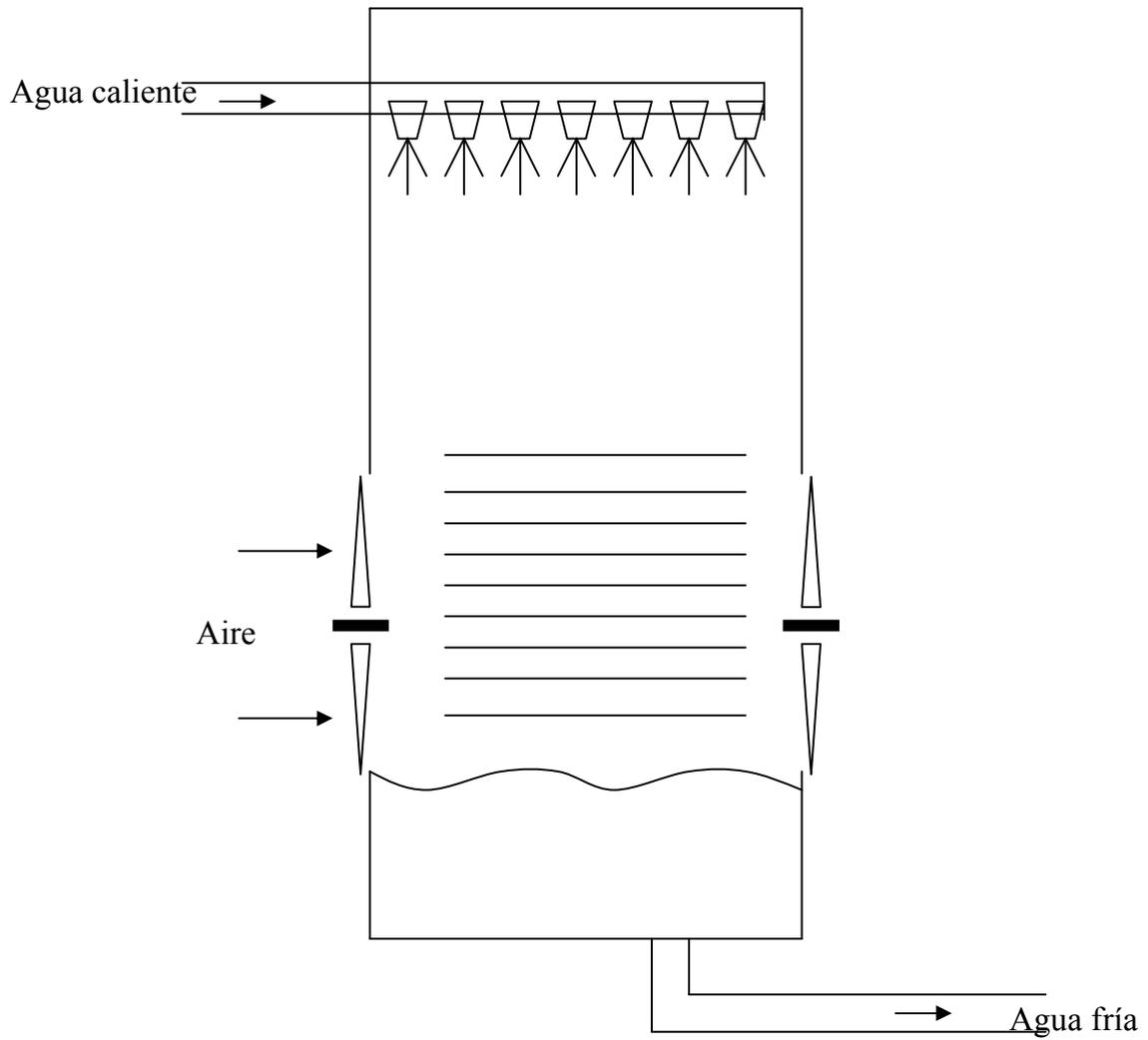


Figura 8. Torre de tiro forzado.

En la figura se muestra un arreglo de "trayectoria en paralelo" que ha demostrado su factibilidad técnica para cumplir la función de abatimiento, pero a la vez es motivo de un incremento sustancial en la inversión monetaria para la torre. El aire ambiente viaja en corrientes paralelas a través de la sección seca y la sección de evaporación. Estas secciones se benefician térmicamente gracias a la recepción de aire ambiente de enfriamiento con las corrientes húmeda y seca mezclándose después de abandonar su respectiva sección. El flujo del agua se arregla en serie, primero hacia la sección seca y después a la de evaporación.

3.11.8 Torres de tiro natural. (ver figura 6). Las torres de tiro natural o de tipo hiperbólico comenzaron a utilizarse en Europa a partir de 1916, aproximadamente, y se han convertido en una práctica estándar para los requisitos de enfriamiento de agua de las estaciones generadoras de Gran Bretaña. Estas son esenciales apropiadas para cantidades muy grandes de enfriamiento y las estructuras de concreto reforzado que se acostumbra utilizar llegan a tener diámetros del orden de 80.7 m (265ft) y alturas de 103.6 m (340ft).

La conveniencia de diseño obtenida gracias al flujo constante del aire de las torres de tiro mecánico no se logra en un diseño de torre de tiro natural. el flujo de aire a través de la torre de tiro natural se debe en su mayor parte a la diferencia de

densidad entre el aire fresco de la entrada y el aire tibio de la salida. El aire expulsado por la columna es más ligero que el del ambiente, y el tiro se crea por el efecto de chimenea, eliminando con ello la necesidad de ventiladores mecánicos. McKelvey y Brooke observan que las torres de tiro natural operan comúnmente con diferencias de presión de aire en la región de 0.2in de agua manométrica, cuando se someten a una carga plena. La velocidad media del aire por encima del relleno de torre, es por lo común, 1.2 a 1.8 m/s (4 a 6 ft/s).

El rendimiento de la torre de tiro natural difiere del de la torre de tiro mecánico en que el enfriamiento depende de la humedad relativa tanto como de la temperatura de bulbo húmedo. El tiro aumenta a través de la torre en condiciones de gran humedad, debido al incremento en la diferencia de presión estática disponible para promover el flujo del aire venciendo las resistencias internas. Por lo tanto, cuanto mayor sea la humedad a una temperatura de bulbo húmedo en particular, tanto más fría será el agua de salida para un conjunto de condiciones específicas. Esta relación fundamental se ha utilizado con gran provecho en Colombia, en donde las humedades relativas son por lo común de 80 al 95%. Por lo tanto, en las etapas de diseño es de vital importancia determinar correctamente y especificar la densidad del aire que entra y sale, además de las condiciones usuales del diseño de torre, de la gama, la diferencia útil de temperaturas y la cantidad de agua. La relación de

rendimiento con las condiciones de humedad permite un control exacto de la temperatura del agua de salida que es difícil lograr en una torre de tiro natural.

3.11.9. Tanques de rocío. Los tanques de rocío constituyen un medio para reducir la temperatura del agua mediante el enfriamiento por evaporación y, al hacerlo, reducen enormemente la superficie de enfriamiento necesaria en comparación con un estanque de enfriamiento. El tanque de rocío emplea varias boquillas para rociar el agua y establecer contacto entre ésta y el aire del ambiente. Una boquilla de rocío bien diseñada debe suministrar gotas finas de agua, pero sin producir un rocío que el viento arrastre con facilidad, ya que esto equivale a una pérdida excesiva de flujo.

El tanque se debe situar de tal modo que su eje más largo forme un ángulo recto con el viento dominante de verano. El tanque rectangular es más eficaz que el cuadrado, de modo que si se reduce la anchura del mismo y se incrementa su longitud, se obtendrá un mejor rendimiento. El rendimiento se perfecciona más aún reduciendo la cantidad de agua rociada por unidad de área de tanque, aumentando la altura y la finura de las gotas de rocío, e incrementando la altura de la boquilla sobre los lados del tanque.

Se debe dejar suficiente distancia en relación con las boquillas exteriores, para evitar que el rocío se derrame sobre los lados del tanque.

Los diseños físicos y las condiciones de operación de las instalaciones de tanques de rocío varían enormemente, y es difícil desarrollar datos de clasificación exactos que puedan servir para determinar el rendimiento de enfriamiento en todos los casos.

3.11.10. Estanques de enfriamiento. Cuando se tienen superficies terrestres grandes, los estanques de enfriamiento ofrecen un método satisfactorio para eliminar el calor del agua. El estanque se puede construir con una inversión relativamente pequeña levantando un dique de tierra de 1.8 a 3.1 m (6 a 10ft) de altura. Para lograr una buena instalación de estanque, el suelo debe ser razonablemente impermeable y conviene que la ubicación se haga en una zona plana. En el enfriamiento en un estanque abierto se comprende cuatro procesos principales de transferencia de calor: éste se pierde por evaporación, convección y radiación, o se recupera por radiación solar.

El área de estanque necesaria dependerá de la cantidad de grados de enfriamiento necesaria y la pérdida neta de calor de cada  $\text{ft}^2$  de superficie de estanque.

En condiciones atmosféricas específicas, un cuerpo de agua alcanza finalmente una temperatura a la que la pérdida del calor es igual que la ganancia del mismo. Esta temperatura se conoce como de equilibrio.

El área de estanque necesaria para una carga de enfriamiento dada es casi independiente de la profundidad del mismo. En general, es conveniente tener una profundidad de 0.9 m (3ft) por lo menos, con el fin de evitar una canalización excesiva de flujo en estanques que cuentan con estanques irregulares, y para evitar cambios notables en la temperatura de salida entre el día y la noche.

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

## 4. SELECCIÓN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO

### 4.1. CONSUMO DE AGUA Y TEMPERATURAS DE TRABAJO.

En muchas plantas de la costa atlántica el agua fría tratada es cada vez más escasa y de altos costos, de manera que muchas plantas tengan un uso limitado de agua para sus procesos industriales de refrigeración. Por lo que a tal necesidad se han visto en la tarea del uso de las torres de enfriamiento para los equipos que necesitan agua de refrigeración, disminuyendo el consumo de agua tratada y mejorando la calidad del agua.

Este consumo de agua esta dado por el diseñador de los equipos pertenecientes a las plantas para la elaboración de un producto, en este caso cemento. En donde encontramos gran diversidad de equipos como: Compresores, camisas de cámara de T.V., chumaceras de molinos, chumaceras de hornos, intercambiadores de calor, equipos de refrigeración, etc.

En Colclinker encontramos 78 equipos de consumo de agua de refrigeración que son adecuados para la recirculación de agua por medio de una torre de enfriamiento.

Por medio de los catálogos y personal encargado a cada uno de los equipos que necesitan agua de refrigeración pertenecientes a Colclinker, se llegó a un consumo de 750 Gpm y unas temperaturas de trabajo de 85 a 110 ° F. Cuadro 1.

En los Anexo A se suministran copias de los catálogos ya mencionados.

#### 4.2. TEMPERATURAS DE BULBO HÚMEDO Y BULBO SECO.

Estas temperaturas son suministradas por la aeronáutica civil de Cartagena. Se promedio las temperaturas antes mencionadas y se obtuvieron:

temperatura de aire bulbo húmedo	77.4 ° F
temperatura de aire bulbo seco	81.73 ° F

Ver Cuadro 2.

#### 4.3. DATOS PARA LA SELECCIÓN DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO.

Flujo total de agua	750 GPM
Temperatura de entrada de agua caliente	110 ° F
Temperatura de salida de agua fría	85 ° F
Temperatura de aire bulbo húmedo	77.4 ° F
Temperatura de aire bulbo seco	81.73 ° F
Voltaje	440 V

#### 4.4. CALCULO DE LA CARGA TÉRMICA.

$$\dot{m} = \frac{750 \text{ gal}}{1 \text{ min}} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} * \frac{62.4 \text{ lbm}}{1 \text{ ft}^3} * \frac{0.133681 \text{ ft}^3}{1 \text{ gal}} = 375376.248 \frac{\text{lbm}}{\text{h}}$$

$$C = 1 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm } ^\circ\text{F}} \text{ calor específico del agua}$$

$$Q = \dot{m} * C * \Delta t$$

$$Q = 375376.248 \frac{\text{lbm}}{\text{h}} * 1 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm } ^\circ\text{F}} * (110 - 77.4)^\circ\text{F} = 12'237,265.68 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

$$\text{Carga térmica } Q = 12'237,265.68 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

Se hicieron dos cotizaciones que se encuentran en los Anexo B.

## 5. CONTROL DE DEPOSITOS

La formación de incrustaciones y depósitos en general son críticas en la Torre de enfriamiento, porque esencialmente:

- Reducen la transferencia de calor, con las consecuentes pérdidas de eficiencia del enfriamiento.
- Reducen el flujo de agua a través del equipo, acompañado por disminución de velocidad.
- Son causa de formación de celdas de concentración y/o celdas de aireación, las cuales aceleran el proceso corrosivo.
- Sirven de soporte para el desarrollo de microorganismos, especialmente del tipo anaeróbico, los cuales son causantes de corrosión.

## 5.1 INCRUSTACIONES.

El termino se aplica a depósitos que resultan de cristalización o precipitación de sales, que han excedido su solubilidad. Las incrustaciones son duras, densas y sobre todo muy adherentes. La precipitación de estas ocurre cuando las solubilidades son excedidas debido a altas concentraciones o incrementos de la temperatura. Frecuentemente un aumento de temperatura es suficiente para causar la precipitación del material incrustante sobre las superficies.

En las aguas de enfriamiento, los constituyentes más comunes son: Carbonato de Calcio, Sulfato de Calcio, Sales de Magnesio y Sílice. A diferencias de otras sales presentes en el agua, la solubilidad del Carbonato de Calcio y Magnesio disminuye al aumentar la temperatura; por eso se dice que son sales de solubilidad inversa.

El Carbonato de Calcio es usualmente el principal elemento de incrustación formada. El Carbonato de Calcio es más insoluble que el Silicato de Calcio y el Sulfato de Calcio.

5.1.1. Factores que afectan la incrustación. La formación de incrustaciones esta afectada por:

- Temperatura
- PH
- Velocidad de flujo
- Dirección del flujo
- Corrosión
- Sólidos suspendidos
- Actividad microbiológica

5.1.1.1. Temperatura. Muchos compuestos que forman incrustación, disminuyen solubilidad con al aumento de la temperatura. Ejemplos:  $\text{CaCO}_3$  ,  $\text{RgCO}_3$ .

5.1.1.2. PH. Con el aumento del PH se aumenta la tendencia incrustante para la mayoría de los compuestos.

5.1.1.3. Velocidad de flujo. Bajas velocidades de flujo ( menores de 2 pies/seg ) dan tiempo para la nucleación y crecimiento de los cristales de precipitado.

5.1.1.4. Dirección del flujo. Cambios de dirección de flujos dan lugar a la acumulación de sólidos.

5.1.1.5. Corrosión. Aumenta el potencial de incrustación porque aumenta la rugosidad de la superficie del metal y porque los productos de corrosión aumentan los sitios de nucleación.

5.1.1.6. Sólidos suspendidos. Aumentan los sitios de nucleación.

5.1.1.7. Actividad microbiológica. Aumentan los sitios de nucleación y actúan como aglutinantes de incrustación y depósitos.

Las bacterias pueden degradar los inhibidores de incrustación.

5.1.2. Precipitación del carbonato del calcio. Es el componente que con más frecuencia se presenta en incrustaciones de sistemas de enfriamiento.

La tendencia incrustante del carbonato de calcio se predice mediante los índices de Langelier y de Ryzner.

5.1.2.1. Índice de saturación de Langelier. El índice de Langelier es una medida de la tendencia que tiene el carbonato de calcio a precipitar del agua y depende de ciertas condiciones tales como: Dureza del calcio, alcalinidad, ph, temperatura y sólidos disueltos totales. La ecuación para el cálculo del índice de Langelier, es:

( IL) Índice de Langelier =  $ph - ph_s$

$ph$  = ph actual del agua.

$Ph_s$  = ph de saturación, al cual el agua está en equilibrio químico.

Cuando

$IL > 0$ , el carbonato de calcio tiende a depositarse;

$IL < 0$ , el carbonato de calcio tiende a disolverse;

$IL = 0$ , el agua está en equilibrio.

El índice de Langelier no puede ser utilizado como una medida cuantitativa. Dos aguas diferentes, una con baja dureza y más corrosiva, y la otra de alta dureza y con tendencia a incrustaciones, pueden tener el mismo índice. Para obviar la siguiente dificultad, se utiliza más a menudo el índice de estabilidad de Ryzner.

5.1.2.2. Índice de estabilidad de Ryzner. Este es más exacto que el Langelier y nos muestra hasta que grado puede un agua formar carbonato de calcio bajo condiciones establecidas.

Índice de Ryzner ( IR ) =  $2p_h - p_h$

Cuando

IR < 6.0, el agua es incrustante;

IR > 6.0, no hay tendencia de incrustación.

<u>IR</u>	<u>TENDENCIA DEL AGUA</u>
4.0 - 5.0	Muy incrustante
5.0 - 6.0	Débil incrustación
6.0 - 6.5	Débil incrustación y corrosión
6.5 - 7.5	Corrosiva
7.5 - 9.0	Fuertemente corrosiva

5.1.3. Prevención de incrustaciones. Los principales métodos para evitar deposición y/o incrustaciones en los sistemas de agua enfriante, son:

- A) Limitando las concentraciones de las especies iónicas críticas, manteniendo bajos ciclos de concentración o utilizando agua suavizada como make-up.
- B) Reduciendo la alcalinidad con ácido para destruir  $\text{CO}_3$  y  $\text{HCO}_3$ , manteniendo el ph por debajo del  $\text{pH}_s$ .
- C) Aplicando agentes químicos inhibidores de incrustación, que operan mediante una variedad de mecanismos a saber: Sobresaturación, Modificación de cristales, Secuestro, Dispersión o acondicionamiento de lodos.

Los productos inhibidores de incrustación principales son: Compuestos orgánicos fosforados, polifosfatos y acvilatos.

De las tres alternativas, la C es preferida para prevenir las incrustaciones cuando se dispone de un agua tratado, donde los índices de impurezas están dentro de los valores normales, pero que sin embargo pueden causar problemas en un sistema de enfriamiento.

El tratamiento A requiere hacer nuevas instalaciones de equipos de tratamiento del agua que encarecen el proceso; y el tipo B puede generar otros tipos de inconvenientes dentro del intercambiador.

## 5.2. ENSUCIAMIENTO O FOULING.

El ensuciamiento es usualmente definido como deposición pero sin formación de materiales de incrustación. El fouling son generalmente depósitos blandos y se diferencian de la incrustación en que éstas son de naturaleza dura y se adhieren más fuertemente a las superficies del sistema.

Los materiales causantes de fouling pueden estar presentes en sistemas de enfriamiento en cinco formas:

- a) Crecimientos biológicos
- b) Material coloidal procedente de productos de corrosión
- c) Cieno, barro, arenas finas, suspendidas en el agua de reposición
- d) Impurezas sólidas y partículas presentes en el aire que entran en contacto con el agua de enfriamiento
- e) Contaminación del agua con materiales del proceso, por ejemplo: aceite.

Algunas características que ejercen gran influencia en el ensuciamiento de un sistema son: la velocidad de flujo, las características del agua, la temperatura, los crecimientos microbiológicos y la contaminación con el proceso.

5.2.1. Control de ensuciamiento. Básicamente hay dos métodos o combinaciones de estos, que son: ajustes mecánicos e inhibidores químicos.

5.2.1.1. Ajustes mecánicos.

- A) Empleando agua clarificada o filtrada como agua de reposición, reduciendo los sólidos suspendidos.
- B) Filtrando una parte del agua de recirculación, para mantener los sólidos suspendidos en un cierto límite.
- C) Instalando baffles en el lado de la coraza de los intercambiadores, para que se establezca un flujo que ayude a la transferencia de calor y evitar zonas muertas donde se depositen sólidos.

D) Retrolavando, con los cuales se desprende la materia suspendida que ha sedimentado en las zonas de bajo flujo.

#### 5.2.1.2. Inhibidores químicos.

5.2.1.2.1. Dispersantes. Como su nombre lo indica son compuestos que mantienen en suspensión partículas insolubles, evitando que se depositen en las superficies metálicas; operan por refuerzo de cargas sobre partículas coloidales o por reducción en la tensión superficial.

Entre los dispersantes que operan por este mecanismo tenemos los poliacrilatos y polimetacrilatos, los cuales son excelentes dispersantes de sólidos suspendidos y hierro en suspensión.

5.2.1.2.2. Floculantes. Se utilizan polímeros de alto peso molecular para controlar la deposición promoviendo la formación de flóculos. Estos posteriormente son removidos a través de purgas y/o filtros

5.2.1.2.3. Surfactantes. Los surfactantes activos son usados en sistemas de enfriamiento petroquímico con el fin de emulsificar hidrocarburos contaminantes.

### 5.3. CORROSIÓN.

La corrosión es la tendencia que tienen los materiales metálicos a reaccionar con el medio que los rodea para convertirse en una forma más estable que normalmente es la de un óxido.

La corrosión de metales ferrosos en sistemas de distribución y enfriamiento es un problema serio por el costo total del reemplazo. Los productos de corrosión también reducen la capacidad de flujo de las líneas, aumentan la resistencia a la fricción y los costos de bombeo. El óxido de hierro formado ocupa un volumen mayor que el metal original y eventualmente puede resultar en completo bloqueo.

5.3.1. Causas de la corrosión. El íntimo contacto del agua enfriante con el aire crea problemas de corrosión debido al continuo reemplazo de oxígeno. En general, las causas de la corrosión son: la temperatura ( gradientes ), la concentración de oxígeno, la velocidad de flujo, el ph, sólidos disueltos, crecimiento microbiológico, sólidos en suspensión y la presencia de pares metálicos.

A) Temperatura.

Aumentos de temperatura aumentan la velocidad de corrosión.

B) Concentración de oxígeno.

A mayor contenido de oxígeno, mayor corrosión.

C) Velocidad de flujo.

El incremento en la velocidad del agua también influye sobre la aceleración de la corrosión debido a que pone en contacto un mayor volumen de oxígeno sobre las superficies metálicas.

D) PH.

El agua, que tiene un ph menor que 6.0 o acidez, tiene una mayor tendencia a la corrosión.

E) Sólidos disueltos.

A mayor contenido de sólidos, mayor conductividad del agua, con el consecuente aumento de la corrosión. El tipo de sólido también influye.

F) Crecimientos microbiológicos.

Estos dan lugar a celdas de corrosión. Subproductos de algunos organismos que son corrosivos. Ejemplo, la bacteria del tipo sulfato-reductoras producen  $H_2S$  corrosivo.

G) Sólidos suspendidos.

Forman depósitos, donde se presentan celdas de concentración o celdas de aireación, que son causa de picado.

H) Presencia de metales distintos.

Los efectos galvánicos son importantes cuando diferentes metales tienen contacto con una solución de naturaleza corrosiva.

Esto es particularmente importante en sistemas que incluyen intercambiadores de calor con aleaciones de cobre, así como tuberías y otros equipos fabricados con metales diferentes.

5.3.2. Prevención de la corrosión. El control de la corrosión en sistemas de transferencia de calor, es llevado a cabo manteniendo pequeñas cantidades de aditivos químicos ( inhibidores de corrosión ) en el agua enfriante. Los inhibidores de corrosión retardan la destrucción de los metales por reacciones químicas o electroquímicas con su medio ambiente.

Existen muchas opciones para minimizar la corrosión, mediante un mejor diseño, consideraciones metalúrgicas, mejor diseño y construcción, etc. Por razones económicas la mayoría de los sistemas se fabrican de tal manera que se necesitan inhibidores químicos para controlar la corrosión.

Los inhibidores para sistemas de enfriamiento se clasifican en tres grupos de acuerdo con la forma como afecta la celda de corrosión.

5.3.2.1. Inhibidores anódicos. Funcionan impidiendo la reacción anódica, rompiendo el circuito electroquímico.

Es importante mantener bastante inhibidor anódico en el agua todo el tiempo para prevenir el picado. Los inhibidores anódicos típicos son: cromato, nitrito, ortofosfato y silicato.

Al principio el cromato se aplicaba en dosis muy altas (200- 300mg/L) como  $\text{CrO}_4$ . Se añadía ácido para bajar el pH (6-7) y evitar la precipitación de carbonato de calcio. Este tratamiento era muy efectivo tanto para evitar incrustaciones como para proteger contra la corrosión, pero tenía el inconveniente de producir ataques por picaduras si el residual de cromato disminuía. El cromato combinado con inhibidores catódicos (zinc y polifosfato) permitió trabajar con bajos niveles de cromato (20-30mgr/L como  $\text{CrO}_4$ ) dando un excelente inhibidor de corrosión. Sin embargo, las crecientes presiones ambientales forzaron el desarrollo de formulaciones inhibidoras con bajo cromato y de otros inhibidores.

5.3.2.2. Inhibidores catódicos. Reducen la tasa de corrosión por formación de una película en el sitio catódico, restringiendo la migración de iones hidrogeno ( $\text{H}^+$ ) u oxígeno hacia la superficie catódica para completar la reacción catódica.

Algunos ejemplos de inhibidores catódicos son: carbonato de calcio, polifosfatos, zinc, etc.

5.3.2.3. Inhibidores anódico/catódicos orgánicos. Son productos orgánicos que forman películas aceitosas sobre el metal. Esta película evita que el agua esté en contacto con el metal y rompe el circuito electroquímico, deteniendo la corrosión. Ejemplo: mercaptobenzotriazole como inhibidor de corrosión del cobre.

#### 5.4 DEPOSITOS BIOLOGICOS

5.4.1. Generalidades. En un sistema de enfriamiento con recirculación, el crecimiento microbiológico es a menudo fuente de problemas, ya que los depósitos formados por el mismo restringen el flujo del agua y afectan la transferencia de calor.

Los crecimientos de algas están formados por millones de organismos microscópicos que se reproducen rápidamente formando grandes masas en poco tiempo.

Los crecimientos de lamas están compuestos de masas gelatinosas de microorganismos que se adhieren a todas las superficies del sistema. En esta forma atrapan materia orgánica y mineral para formar productos que se depositan como incrustación.

Las bacterias reductoras de sulfatos y las que atacan el hierro son a menudo origen de la corrosión. Las bacterias que atacan el hierro producen sales insolubles que de ordinario son depositadas en las superficies metálicas. La aireación diferencial bajo estos depósitos producen corrosión. Las bacterias reductoras de sulfatos originan la formación de sulfuros y ácido sulfhídrico que, en contacto con el metal, producen corrosión.

5.4.2. Control microbiológico. El principal propósito de un biocida es matar y/o inhibir el crecimiento exagerado de microorganismos evitando así la formación de lama.

Los biocidas requieren de una concentración residual que debe mantenerse en el sistema durante un cierto tiempo.

Mientras mayor sea el residual, menor será el tiempo de contacto.

Los factores más importantes que se consideran en la escogencia de un biocida son:

- a) La efectividad contra los microorganismos que prevalecen en el sistema, tipo y cantidad de éstas.

- b) Tipo de problema microbiológico.
- c) PH del agua.
- d) La compatibilidad con el tratamiento contra la corrosión y el ensuciamiento.
- e) Consideraciones sobre protección al medio ambiente.
- f) Tiempo de residencia del agua en el sistema. Existen biocidas de acción lenta y acción rápida.

Dentro del grupo de biocidas empleados en el tratamiento de agua de enfriamiento, los más importantes son:

- a) El cloro y los compuestos liberadores de cloro: el cloro es el biocida más conocido y más ampliamente usado.
- b) Clorofenoles.
- c) Retilenbistiocinatos.

d) Aminas.

e) Aminas cuaternarias.

f) Dibromonitrilopropionamida.

## 6. TRATAMIENTO Y CONTROL DEL AGUA DE ENFRIAMIENTO

Existen en el mercado muchos productos comerciales para el tratamiento del agua de enfriamiento, pero básicamente cada uno de ellos corresponde a un producto genérico y por lo tanto son equivalentes entre sí.

A continuación se hace el diseño del sistema de tratamiento y mantenimiento del agua de enfriamiento según el análisis químico suministrado ( ver anexo ), se hace la descripción genérica y el nombre de uno de los productos presentes en el mercado.

## 6.1. TRATAMIENTO

No.	PRODUCTO	GENERICICO	DOSIFICACION	ACCION
1	Betz 2020	Compuesto orgánico - fosforado (fosfonatos) - HEDP*	20 ppm en Recirculación	AntiIncrustación y AntiFouling
2	Betz 2040	Ortofosfato 50% Polifosfato 50%	80 ppm en Recirculación	Inhibidor de corrosión y antiIncrustante
3	Betz Slimicide DE-364	-Sal de amonio cuaternario	24 ppm 1 vez/mes	Biocida
4	Betz Slimicide J-12		24 ppm 1 vez/mes	Biocida
5	Betz 407 C		2 - 5 ppm si existe presencia de grasas - aceites	AntiFouling Surfactante
6	Cloro	Cloro	0.4 - 0.6 como residual	Biocida
7	Acido sulfúrico Soda cáustica	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> NaOH	Hasta que el ph (7.0-7.5)	Modificador PH

## 6.2. DESCRIPCIÓN Y FORMA DE DOSIFICACIÓN DE LOS PRODUCTOS.

6.2.1 Betz 2020. Es un producto orgánico para controlar la formación de fosfato de calcio, este producto permite trabajar con altas concentraciones de ortofosfato, para una apropiada protección contra la corrosión de materiales ferrosos.

6.2.2 Betz 2040. Es un inhibidor de corrosión y controla la formación de incrustaciones. Es compatible con el Betz 2020. Es una mezcla de ortofosfato y polifosfato para protección de los metales ferrosos, fosfonato para prevenir el carbonato de calcio (incrustante) y un inhibidor de corrosión.

En el agua de recirculación debe mantenerse 80 ppm; se dosifica continuamente desde el tanque donde se tiene almacenado por medio de una bomba o la piscina de la torre.

El polifosfato es un término genérico usado para especificar varios químicos como: tripolifosfato o hexametafosfato. Son inhibidores catódicos, trabajando formando una película muy fina sobre el metal.

Los polifosfatos no reaccionan con otros agentes reductores en el agua de recirculación, aceites pesados, ni otros productos orgánicos interfieren con su efectividad.

6.2.3. Slimicide de-364 y Slimicide j-12. Ambos son biocidas para controlar el desarrollo de lamas originales por bacterias, hongos y algas, y complementar la acción del cloro.

Su dosificación es en choques de 24 ppm para asegurar niveles mayores a las tolerancias de las especies microbiológicas normalmente encontradas, durante un tiempo suficiente en el sistema, se adicionan a un punto de buena agitación y distribución.

Para un buen control del crecimiento de lamas, es muy importante considerar lo siguiente:

- a) Que se siga exactamente el programa de cloraciones (residual, tiempo, frecuencia).
- b) Que se alternen los biocidas y que se adicionen en las cantidades recomendadas.

El programa de control microbiológico mensual es así:

	<b>Martes</b>	<b>Viernes</b>
<b>Semana 1</b>	Cloro	Cloro
<b>Semana 2</b>	Slimicide J-12	Cloro
<b>Semana 3</b>	Cloro	Cloro
<b>Semana 4</b>	Slimicide DE-364	Cloro

6.2.4. Betz 407-c. Es un dispersante de hidrocarburos.

Este producto solo debe ser usado si el agua de enfriamiento sufre contaminación con hidrocarburos en su paso por el sistema. Dependiendo del grado de contaminación, se mantendrá 2 - 5 ppm en la recirculación, dosificando en forma continua por goteo desde el tanque de almacenamiento hasta tener los niveles de hidrocarburos en el mínimo posible.

La necesidad de usar Betz 407-C, depende de la frecuencia de contaminaciones que tenga el sistema, cuando se tenga más de 10 ppm de hidrocarburo.

6.2.5. Cloro. Es uno de los biocidas más efectivos que se emplean en aguas de enfriamiento. Deberá usarse de acuerdo con el programa de control microbiológico, clorando hasta obtener un residual de 0.4 - 0.6 ppm y manteniéndolo así durante 4 horas en el retorno caliente. Se debe disponer de un equipo clorinador, el cual toma agua para su eyector por una línea de 4 pulgadas, que se desprende del cabezal de descarga de una bomba adaptada para este fin.

Cuando el gas es introducido en el agua, éste hidroliza para formar ácido e hipoclorito, que tiene un efecto biocida primario.

6.2.6. Acido sulfurico y soda caustica. Para un buen control de la corrosión y el ensuciamiento, además del control en la dosificación de los productos anteriormente mencionados, es necesario un buen control del ph.

Para lograr lo anterior, en la línea de agua al eyector del clorinador se debe instalar un controlador de ph, con sus respectivas alarmas al tablero de control de alto o bajo ph, este controlador envía una señal neumática dependiendo de si el ph está alto o bajo para que arranque la bomba dosificadora de ácido o de soda según el caso.

El sistema de dosificación de ácido sulfúrico está construido por su respectivo tanque de almacenamiento, y sus bombas dosificadoras, siempre hay una lista a arrancar, para esto se debe tener un swiche selector.

El sistema de dosificación de soda cáustica opera de la misma manera que el sistema de ácido sulfúrico.

### 6.3. CONTROL DE TRATAMIENTO.

Para un buen control del tratamiento se deben realizar las siguientes pruebas

6.3.1. PH. Se debe mantener siempre entre 7.0 - 7.5 para:

- a) Buen control del ensuciamiento
- b) Mayor eficiencia del tratamiento
- c) Limpieza

Frecuencia una vez por turno.

6.3.2. Betz 2020. Se debe mantener en 20 ppm para obtener un buen control del ensuciamiento.

Frecuencia una vez por turno.

6.3.3. Ortofosfato filtrado.

- a) Mantener entre 10 - 14 ppm
- b) Controlar eficientemente la corrosión
- c) En las limpiezas se usa el rango alto de fosfatos

Frecuencia una vez por turno.

6.3.4. cloruros. Se debe determinar para establecer los ciclos de concentración del sistema. Es necesario realizar en dos puntos del sistemas:

- a) Agua de recirculación
- b) Agua de reposición (clarificada)

Los cloruros tiene la ventaja de que no cambian químicamente dentro del sistema y normalmente todos provienen del agua de reposición.

Frecuencia una vez por turno.

#### 6.3.5. Dureza total.

Es usada para:

- a) Medir la tendencia depositante del sistema y comprobar la efectividad del tratamiento
- b) Establecer los ciclos de concentración del sistema cuando el nivel de cloruros es muy bajo

Frecuencia una vez por turno.

6.3.6. Cloro residual libre. Esta prueba se debe realizar cada media hora durante el tiempo que dure la adición de cloro, de acuerdo con el programa de control microbiológico.

Una vez obtenido un residual entre 0.4 - 0.6 ppm, se debe mantener igual por cuatro horas.

Frecuencia de acuerdo con el programa de control.

6.3.7. Hierro. Se usa para determinar tendencias depositantes o corrosivas dentro del sistema, comparando medidas realizadas en diferentes épocas y tomando como base el contenido de hierro en el agua de reposición.

Frecuencia dos veces por semana.

6.3.8. Aluminio. Se debe mantener máximo en 0.3 ppm, su control se establece debido a la alta probabilidad de escape desde los clorificadores. Como éste es un flucolante, acelera la precipitación en las zonas de velocidad baja como la base de la

torre. Su medida se debe realizar principalmente en la entrada de agua de reposición al sistema.

Frecuencia una vez por semana.

6.3.9. hidrocarburos (grasas, aceites, etc.). Se debe determinar con una frecuencia de una vez por semana.

## 7. EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO

Para asegurar que el sistema esté adecuadamente protegido con el programa implementado, además de los análisis anteriormente señalados, se debe implementar un método de monitoreo. Dadas las características químicas de las torres de enfriamiento, los más recomendados son: Cupones de corrosión y Probadores LPR.

El concepto del cupón envuelve el concepto de inmersión de un espécimen metálico de la misma metalúrgica con que está construido el sistema de enfriamiento. El cupón es prepesado y tiene un área superficial conocida; después de la prueba, ésta es limpiada y se vuelve a pesar. La diferencia entre los dos pesos representa la cantidad de metal perdido y se expresa como una rata de corrosión.

Los inconvenientes de trabajar con cupones es que estos deben mantenerse tiempo relativamente largos (30 - 60 días) dentro de una derivación del sistema para poder valorar el programa, por lo tanto, muchos problemas pueden ocurrir en este lapso de tiempo. Para este propósito son más adecuados los dispositivos de monitoreo

electivo, los cuales son de dos tipos: Resistencia (ER) y Probadores resistencia polarización lineal (LPR).

El método de resistencia (ER) usa la resistencia eléctrica creciente de un conductor con área transversal decreciente comprometida en la corrosión. Tales probadores incorporan elementos en forma de varillas o tubulares construidas de metales usados en el sistema de enfriamiento. Estos son insertados en el sistema en puntos seleccionados. La calibración de flujo de corriente contra elementos de sección transversal da las bases para estimar la corrosión acumulada. Además los probadores son convenientes al no requerir su remoción para examinarlos. La corrosión localizada y deposición pueden dar resultados engañosos, por esta razón los probadores ER no encuentran su uso en sistemas de enfriamiento.

Los probadores o sondas LPR proveen un estimativo instantáneo de la rata de corrosión de una superficie metálica por interacción eléctrica con las pequeñas corrientes, como resultado de la ionización de los átomos metálicos en el proceso de corrosión. El instrumento opera por impresión de voltajes muy pequeños de C.D. entre dos electrodos (del mismo metal) en el ambiente corrosivo, percibiendo la corriente resultante. El cambio de corriente entre los electrodos es un indicativo de la rata de corrosión general.

Las sondas LPR proveen indicadores más precisos de la actividad corrosiva. Ellos son particularmente útiles para monitorear la corrosión en sistemas de enfriamiento. Por ejemplo su rápida respuesta puede ser usada para optimizar rápidamente entre los niveles de tratamiento ( Vg. 5 - 10 ppm de inhibidor ). Ellos pueden servir de alarma del sistema cuando la rata de corrosión es alta. Caídas de ph son fácilmente detectadas, además la unidad puede alertar a los operadores los cambios potenciales de daños. Esta es una ventaja adicional si otras alarmas fallan. El continuo reporte de corrosión provisto por estos equipos pueden ayudar a la localización de fuentes de problemas de corrosión. Un repentino incremento en los datos del equipo es indicativo de severos cambios o imprevistos en el tratamiento, como una sobrealimentación ácida, o como una deflexión en la dosificación del inhibidor.

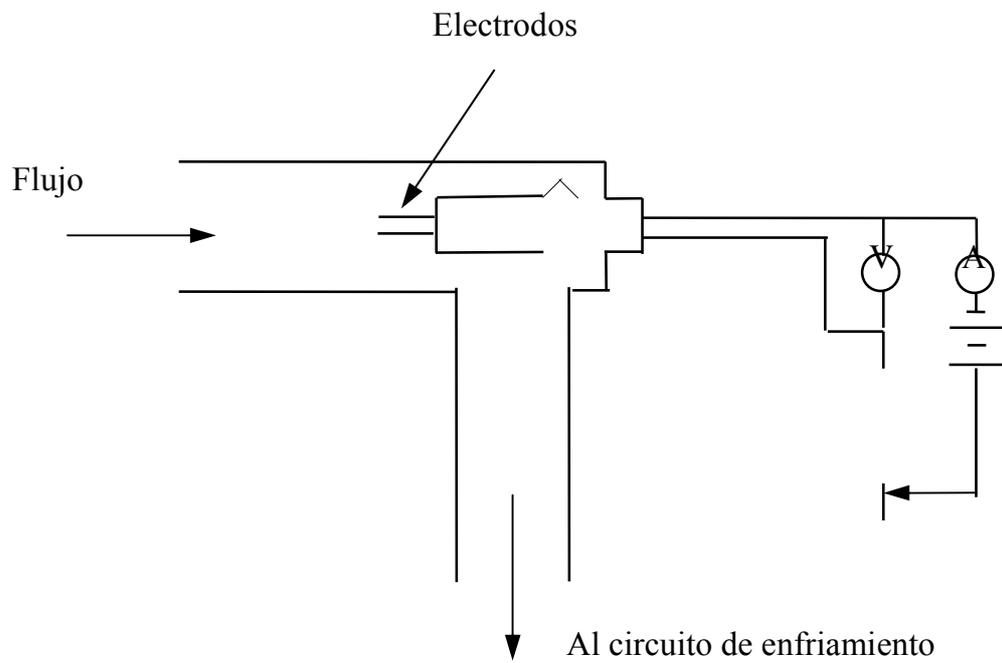


Figura 9. Controlador de corrosión electrico.

En el Anexo C, se muestra el controlador de PH.

## 8. UBICACIÓN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO.

### 8.1. AREA DE ESTUDIO.

Corresponde sólo a las aguas que utiliza la empresa COLCLINKER para el enfriamiento de los diferentes equipos que necesitan transferir el calor que generan a otro medio para seguir operando. Los equipos a que nos referimos corresponden a todas las chumaceras refrigeradas con agua, a las recamaras de los compresores, a las cámaras de TV de los hornos, a los intercambiadores de calor de los aceites para la lubricación y los condensadores de los aires acondicionados.

### 8.2. UBICACIÓN.

Las instalaciones de Colclinker en el complejo industrial de Mamonal en las cercanías de Cartagena se encuentra situadas sobre el costado sur oriental del Kilometro # 7 de la vía que conduce a Pasacaballos en el sitio denominado Cospique, en un lote continuo a las instalaciones de almacenamiento de Ecopetrol ..

### 8.3. CLIMATOLOGÍA.

La climatología de la región, así como todos los informes meteorológicos fueron suministrados por el Aeronáutica Civil, Ubicada en el aeropuerto Rafael Nuñez de la ciudad de Cartagena.

8.3.1. Temperatura. Los datos suministrados por la Aeronáutica Civil muestran que para el área que nos ocupa, se presenta una fluctuación en la temperatura de  $81.73^{\circ}$  F variando la temperatura entre una media de  $79.88^{\circ}$  F como valor mínimo y  $83.58^{\circ}$  F como valor alto. El Cuadro 3 muestra los rangos de temperatura media, máxima y mínimas que se registraron durante los distintos meses del año.

Esta variación en la temperatura obedece a la dirección y velocidad de los vientos así como el brillo solar que son factores meteorológicos que influyen en la estabilidad atmosférica.

Como puede verse en la Cuadro 3 hubo meses en que la temperatura ambiente alcanzo un valor de  $89.6^{\circ}$  F y meses en donde se registró una temperatura mínima de  $71.38^{\circ}$  F.

8.3.2. Humedad relativa. La humedad relativa que se han registrado señalan un valor alto, esto puede deberse a la proximidad que tiene el área al mar, el cual debido a la influencia de los vientos arrastran grandes masas de agua hacia el continente que hacen que el aire ambiente se torne húmedo. La humedad relativa oscila entre un valor mínimo de 77 % y un valor alto de 82 % en promedio.

El mes que presentó menos humedad relativa fue el mes de Marzo con 77 % y los meses de Septiembre, Octubre y Noviembre se mostraron más húmedos con 82 % lo cual coincide con los meses más lluviosos. En la Cuadro 4 se muestran estos valores.

8.3.3. Precipitación. En la región se presentan dos épocas bien definidas: la época de verano y la época de invierno. La época de verano comprende los meses de diciembre hasta abril, y la época de invierno comprende los meses de agosto hasta noviembre.

En la Cuadro 5 se muestran los valores de precipitación captada por la estación meteorológica más cercana a la región, y en ella se muestra un valor anual de precipitación de 1022 mm, presentando los meses de febrero y marzo con menos

precipitación , 1 mm y un valor de 244 mm para el mes de octubre siendo este el mes más lluvioso.

8.3.4. Radiación solar. Este es otro factor meteorológico que influye en el clima de la región. La estación meteorológica anteriormente mencionada registró un promedio de 2640 horas de brillo solar promedio en el año, siendo el mes de octubre el de menor brillo solar 173 horas, coincidiendo con el mes más lluvioso, y el mes con mayor brillo solar es enero con 285 horas.

En la Cuadro 6 se registran los valores promedios de radiación solar en los distintos meses del año.

8.3.5. Dirección y velocidad del viento. Con los datos suministrado por la Aeronáutica Civil, la dirección prevaleciente del viento son los que vienen del norte, con una frecuencia del 53 % siguiendo los vientos provenientes del oeste con una frecuencia del 13.8 % y los provenientes del sur con una frecuencia del 9.2 %. En las demás direcciones las frecuencias son bajas.

En cuanto a la velocidad, podemos notar en la Cuadro 7 que el promedio anual de velocidad del viento es de 2.57 m/seg. Con un mínimo de 1.5 m/seg. y un máximo de 4.21 m/seg.

### 8.3. PROPÓSITO DEL ESTUDIO.

El propósito de este estudio fue el de investigar las condiciones del subsuelo en el área del proyecto y utilizar la información obtenida con el fin de desarrollar un criterio detallado para guiar la posición de la Torre de Enfriamiento.

### 8.4. AMBIENTE GEOLÓGICO.

Toda el área está cubierta por rocas sedimentarias del terciario superior (Plioceno) y por depósitos cuaternarios de naturaleza arcillosa. A grandes rasgos se pueden diferenciar tres formaciones diferentes que son:

Unidad detrítica del Popa

Calizas arrecifales de la formación Popa

Depósitos cuaternarios

La unidad detrítica se encuentra representada por una secuencia de arcillas limolíticas y niveles arenosos que ocupan casi la totalidad de la zona plana, se tratan de rocas de poca dureza.

Las calizas arrecifales del popa se localizan exclusivamente en las zonas de colinas al oriente del área y están poco intervenidas por el proyecto, se trata de calizas de color crema - amarillento de regular dureza con una vocación especialmente minera.

Los depósitos cuaternarios se localizan en el extremo occidental del proyecto. Estos depósitos se encuentran representados por suelos arcillosos con algo de material orgánico que le confieren coloración oscura.

El área industrial de Mamonal, como casi todo el sur - sureste de Cartagena hasta Pasacaballos, está asentada sobre un leve plegamiento anticlinal formado por el nivel inferior, arcilloso de la formación Cartagena - Plioceno - y por depósitos cuaternarios resistentes en las zonas bajas que conforman la costa oriental de la Bahía,

El plioceno reposa en esta zona sobre plegamientos miocenos, por lo cual evidencia fallas y doblamientos que representan factores de riesgos sísmicos para el área.

El nivel arcilloso plioceno que conforma el basamento del área, se caracteriza por su coloración gris plomo a negruzco y su alto contenido limoso y micáceo; es frecuente la presencia de lentes areno - limosos y eventualmente gravas y concreciones de yeso. Su consistencia es en general muy firme y poco compresible, sin embargo son susceptibles de liberar altos potenciales expansivos o de ablandarse y agrietarse en sus niveles más superficiales como resultado de la intemperización.

Los depósitos cuaternarios superficiales son eminentemente coluvio - aluviales, originados en las mismas arcillas patronas con eventuales arenas, gravas o caracolejo y fósiles coralíferos. Son sedimentos poco consolidados cuyo mapeo y análisis paramétrico debe ser cuidadoso.

8.5.1. Metodología de interpretación. Es bien sabido que la mecánica de los suelos no es una ciencia exacta, ni podrá serlo nunca puesto que su sujeto es la naturaleza misma, que a golpes de hechos físicos totalmente aleatorios y erráticos ha modelado sus materiales. Por tanto la observación técnica de la historia de su comportamiento es uno de sus mejores recursos para orientar la prospección del futuro y en este proceso la estadística se ha convertido en una herramienta insustituible. En este marco nuevo la investigación ha racionalizado el empirismo de antaño en busca de la relevancia y la interdependencia de las propiedades índices o básicas.

En este contexto tiene más valor una gran población de parámetros básicos que unos escasos y costosos parámetros determinados con lujo de sofisticación. Ese valor no obstante depende en gran medida del rigor en los procedimientos de la calidad en la evaluación y de la paciencia en el ordenamiento para identificar tendencias de comportamiento.

8.5.2. Propiedades físicas de los suelos. La variación de un grupo de propiedades físicas con profundidad humedad natural, límite natural, límite plástico y peso inutario total medidos en Colclinker.

Varias anotaciones pueden hacerse:

- El basamento terciario (profundidades mayores de 5 a 6 m) es muy uniforme.
- Las arcillas cuaternarias superficiales son más erráticas.
- Predominan las arcillas limosas de plasticidad media a alta.
- La plasticidad del cuaternario superficial es más baja que la del terciario inferior.

- La humedad natural es consistentemente más baja que el límite plástico (o sea el Índice de Liquidez es negativo), por consiguiente se trata de materiales altamente deseados que seguramente son preconsolidados y muy resistentes.
  
- El peso unitario es alto y relativamente uniforme.
  
- Los materiales del perfil de la planta son claramente similares a los medios en áreas cercanas por consiguiente es de esperar que también lo sean sus propiedades de comportamiento mecánico.

8.5.3. Propiedades mecánicas de los suelos. Sobre esta información se pueden hacer las siguientes anotaciones:

- Es claro que la resistencia del horizonte cuaternario superficial es mucho menor que la de los materiales terciarios presentes a partir de 5 a 6 m. de profundidad. Además es variable dada la variedad gradacional de este depósito. No obstante son suficientemente altas para manejar competentemente sollicitaciones menores. Especialmente hacia el lado de la piscina

- El horizonte terciario de arcillas limosas grises exhibe una alta capacidad debido a su historia de cargas geológicas. No obstante su capa superior 5 a 9 m exhibe el deterioro causado por la intemperización durante la deposición del cuaternario. También es claro el efecto del contenido de arenas variables, así como los pequeños lentes evidenciados en el proceso de exploración, que se traduce en un rango de variación de la resistencia ( $\pm 100\%$ ).
  
- Las tendencias observadas en las planta confirman la uniformidad del proceso geológico del área al compararlos con los de otras experiencias en el área de Mamonal.
  
- De los anteriores comentarios se desprende claramente que para tener una información de parámetros confiable a partir de ensayos complejos se requeriría una inversión muy alta.

8.5.4. Carga de contacto. Con base en la exploración del subsuelo, los resultados de los ensayos de campo y laboratorio, los análisis de capacidad portantes y los cálculos de asentamientos en la superficie del suelo de.  $\sigma_a = 12 \text{ Ton/m}^2$ .

## 8.5. UBICACIÓN DEL OBJETO DE ESTUDIO.

Para la ubicación de la Torre de Enfriamiento, en una empresa de cemento hay que tener en cuenta las posibles emisiones de polvo. Algunas de las gotas de agua llegan a tener contacto con estas partículas de polvo llegando a formar un sedimento al fondo de la piscina y estas emisiones de polvo se concentran en gran parte en la zona de los molinos. Por lo que en el lado de las piscina hay menos emisiones de polvo y teniendo en cuenta la dirección predominantes de los vientos ( NORTE - SUR ) se tomó ésta zona como referencia para la ubicación de Torre de Enfriamiento.

Cumpliendo con todos los estudios ya antes mencionados.

## 9. DISEÑO DE RED DE TUBERIA

### 9.1 SISTEMAS DE RED DE TUBERÍA.

Los sistemas de red de tuberías se dividen en dos tipos: de agua que circula una sola vez y de agua recirculada. En el primero el agua pasa a través de los equipos una vez y es descargada. En el segundo el agua no se descarga, sino que circula en un circuito repetidor desde la Torre de Enfriamiento hasta los equipos a refrigerar, volviendo nuevamente a la Torre de Enfriamiento.

Ambos tipos de sistemas se dividen en sistemas abiertos o cerrados. El *sistema abierto* es aquel en el que el agua circula por el interior de un depósito en comunicación con la atmósfera, como ocurre en las Torres de Enfriamiento. El *sistema cerrado* es aquel en el que el caudal de agua no está expuesto en ningún punto a la atmósfera; este sistema contiene normalmente un vaso de expansión en comunicación con la atmósfera, siendo insignificante la superficie de agua en contacto con ella.

Sistemas de retorno de agua. Para el regreso del agua de dos o más unidades que estén conectadas entre si, puede usarse uno de los siguientes sistemas:

- Tubería de retorno inverso.
- Colector de retorno inverso, con tramos verticales de retorno directo.
- Tubería de retorno directo.

Tubería de retorno inverso. Es recomendable en la mayoría de las instalaciones de sistema cerrado; en cambio no puede utilizarse en sistemas abiertos, siendo generalmente el más económico en las nuevas construcciones.

Colector de retorno inverso, con tramos verticales de retorno directo. En este sistema, el caudal no es el mismo en todas las unidades. La diferencia de caudales depende de la caída de presión de las tuberías de suministro y tubería de retorno.

Tubería de retorno directo. Es necesaria en los sistemas abiertos y recomendable en algunos sistemas cerrados. Se recomienda un retorno directo para un sistema de recirculación cerrado, donde todas las unidades requieren válvulas auxiliares y tienen diferentes caídas de presión (varias unidades de fan-coil). El sistema de tubería de retorno directo siempre es desequilibrado y exige válvulas auxiliares o

bocas y elementos para medir la caída de presión. La ventaja es que los costos de materiales son menores.

## 9.2. PROYECTO DE LA TUBERÍA DE AGUA.

En cualquier tubo por el cual circule agua, la irreversibilidad se expresa a través de las pérdidas de carga o por medio de la caída de la línea de cargas piezométricas.

Esta pérdida depende de los siguientes factores:

- Velocidad del agua  $V$ .
- Diámetro del tubo  $D$ .
- Rugosidad de la superficie interior  $\epsilon$ .
- Longitud del tubo.

Las pérdidas se hallan utilizando la fórmula Darcy-Weisbach:

$$hf = f \frac{L * V^2}{Di * 2g} \quad (9.1)$$

$hf$ , es la pérdida de carga, o caída en la línea de cargas piezométricas, a lo largo de la longitud  $L$ , de la tubería de diámetro  $D$ , y con velocidad promedio  $V$ . Las dimensiones de  $hf$  son de longitud.

El factor de fricción  $f$  es el factor adimensional necesario para que la ecuación produzca el correcto valor de las pérdidas. El factor de fricción  $f$  debe seleccionarse de tal modo que la ecuación ( 9.1) dé el valor correcto para las pérdidas de carga.  $f$  se determina en el Diagrama de Moody y/o por fórmula:

$$f = \frac{1}{\left(1.14 - 2 * \log\left(\frac{\epsilon}{Di}\right)\right)^2}$$

Para la selección de los diámetros de tuberías principal, entramos a la carta de pérdidas por rozamiento ( Anexo D ), con el caudal de ese tramo y con una velocidad recomendable para el agua de 7 ft/s.

### 9.3. DISEÑO DEL CIRCUITO.

De acuerdo a las condiciones de distribución de los equipos y a las diferentes necesidades que presentan estos, el circuito diseñado se define como: un *Sistema*

*de recirculación abierto con colector de retorno inverso con tramos verticales de retorno directo* ( ver Plano general de planta ). Se utilizo para este diseño

tubería de succión y descarga: Acero galvanizado con un  $\epsilon = 0.0005$

*D sch 40*

9.3.1. Accesorios del sistema. En el diseño de la red de tubería se utilizaron los siguientes accesorios ( ver Plano general de planta ):

- Válvula globo.
- Válvulas de compuerta.
- Codos 90° y 45°.
- Tés.
- Reducciones de tuberías.

#### 9.4. CABEZA TOTAL.

La cabeza total desarrollada por la bomba a una capacidad Q dada, debe ser igual a la cabeza total requerida por el sistema a esa capacidad deseada. La cabeza total

dinamica desarrollada por una bomba, se determina por pruebas de acuerdo a estándares del *Instituto Hidraulico*.

La cabeza total requerida es la energía que necesita ser impartida al fluido por la bomba:

$$H_T = \left( Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2 * g} \right) - \left( Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2 * g} - hf_{1-2} \right)$$

#### 9.5. NPSH DISPONIBLE EN UN SISTEMA.

Es una de las características del sistema o instalación en que se emplea la bomba, representa la diferencia entre la carga absoluta de succión existente y la presión de vapor del líquido a la temperatura que prevalece. El valor del  $NPSH_D$  tiene que ser mayor que cero.

$$NPSH_D = \left( \frac{P_a'}{\gamma} - \frac{P_{VAPOR}}{\gamma} \right) - hf_{a'-a} + Z_{a'}$$

## 9.6. NPSH REQUERIDO DE LA BOMBA.

Es una función del diseño de la bomba, representa el margen mínimo requerido, entre carga de succión y la presión de vapor del líquido.

$$NPSH_D > NPSH_{REQ.}$$

Cálculos tipos.

Procedimiento de la Cuadro 9.

$$Diámetro = Diámetro de la tubería Standar$$

$$Di(in) = Diámetro interno Sch. 40 tomado tabla CRANE$$

$$Di(ft) = \frac{Di(in)}{12}$$

$$\varepsilon = \text{tubería galvanizada} \Rightarrow \varepsilon = 0.0005$$

$$\text{Factor de fricción } f = \frac{1}{\left(1.14 - 2 * \log\left(\frac{\varepsilon}{Di(ft)}\right)\right)^2}$$

$$Q\left(\frac{ft^3}{seg}\right) = Q(gpm) * \frac{2.23 * 10^{-3} ft^3 / seg}{gpm}$$

$$A = \pi \frac{Di^2}{4} (ft^2)$$

$$V = \frac{Q}{A} (ft / seg)$$

$$Perdida \text{ por codos} = \# \text{ codos} * 30 * Di(ft)$$

$$Perdida \text{ por té} = \# \text{ té} * 60 * Di(ft)$$

$$Perdida \text{ por válvula compuerta} = \# \text{ válvulas} * 8 * Di(ft)$$

$$Long = Longitud \text{ total de tubería}$$

$$Z = Altura \text{ en } ft.$$

$$Leq. = Long + perdidas \text{ por accesorios} + Z$$

$$hf = \frac{f * Leq * V^2}{Di * 2 * g} (ft)$$

Ecuación de Bernulli.

$$H_T = \left( Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2 * g} \right) - \left( Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2 * g} - hf_{1-2} \right)$$

$$Z_1 = 1.5 ft \quad \frac{P_1}{\gamma} = \frac{0 psi}{62.4} = 0 \quad \frac{V_1^2}{2 * g} = \frac{0^2}{2 * g} = 0 \quad Z_2 = 860 ft$$

$$Z_2 = 92 ft \quad \frac{P_2}{\gamma} = \frac{4320 lb / ft^2}{62.4} = 69.23 ft \quad \frac{V_2^2}{2 * g} = \frac{4.294^2}{2 * g} = 0.28 ft$$

$$H_T = 1020 ft$$

$$NPSH_D = \left( \frac{P_a'}{\gamma} - \frac{P_{VAPOR}}{\gamma} \right) - hf_{a'-a} + Z_{a'}$$

$$\frac{P_a'}{\gamma} = 1.24 ft$$

$$\frac{P_{VAPOR}}{\gamma} = \frac{14.7 * 14}{62.4} = 33.92 ft$$

$$hf_{a'-a} = k \frac{V^2}{2 * g} = 0.78 \frac{8.33^2}{2 * 32.2} = 0.84 ft$$

$$Z_{a'} = 1.5 ft$$

$$NPSH_D = 33.34 ft. > 0, \text{ no cavita.}$$

*Para la selección de la bomba  $H_T = 1020$  ft.*

$$Q = 750 \text{ gpm.}$$

*$NPSH_D = 33.34$  ft. Tiene que ser mayor que  $NPSH_R$ .*

## 10. MANTENIMIENTO

### 10.1. FINALIDAD.

Adecuar las condiciones de temperatura de todos los equipos que necesitan agua de refrigeración.

El ventilador va a suministrar aire para refrigeración del agua que se encuentra en la Torre de Enfriamiento.

Proporcionar agua a presión y caudal para ser suministrado al circuito de refrigeración de agua.

### 10.2. MANDOS Y CONTROLES.

Controles desde consola.

#### 10.2.1. Tanque y Bomba.

- Interruptor para abrir o cerrar el controlador del flujo de agua de todo el circuito de refrigeración de agua.

- Indicador del flujo de agua (GPM).
- Indicador de temperatura en  $^{\circ}$  F aire antes de la Torre de Refrigeración.
- Indicador de temperatura en  $^{\circ}$  F aire después de la Torre de Refrigeración.
- Indicador de temperatura en  $^{\circ}$  F en la entrada de agua caliente de la Torre de Refrigeración.
- Indicador de temperatura en  $^{\circ}$  F en la salida de agua fría de la Torre de Refrigeración.
- Amperímetro y voltímetro del motor de la bomba.

#### 10.2.2. Ventilador.

- Indicador de marcha y paro.
- Indicador de CFM o RPM.
- Indicador de temperatura  $^{\circ}$  F para la caja reductora del ventilador.
- Amperímetro y voltímetro del motor del ventilador.

#### 10.3. En sitio.

### 10.3.1. Tanque y Bomba.

- Interruptor de marcha y paro de las bombas de agua del circuito de refrigeración de agua.
- Interruptor para seleccionar la bomba de agua.
- Manómetros para presión de agua, a la entrada y salida de la Torre de Enfriamiento.
- Manómetros para presión de aire a la entrada y a la salida de la Torre de Enfriamiento.
- Manómetros después de las bombas,
- Indicador manual de flujo de agua (GPM).
- Sistema de by-pass de inyección de agua.
- Sistema de by-pass de inyección de aire.
- Compuerta para selección de filtros de agua.

### 10.3.2. Ventilador.

- Arrancador local.
- Persiana para regular flujo de aire.
- Controlador de flujo.

## 10.4. Lubricación.

### 10.4.1. Motores de bomba y ventilador.

- Reengrasar rodamientos de la caja reductora.
- Usar tipo de lubricante recomendado.

### 10.4.2.Reductor.

- Verificar nivel del reductor de esté y rellenar si es necesario.
- Usar tipo de lubricante recomendado.

## 10.5. Mantenimiento mecánico.

- A cargo un supervisor del departamento, en caso de modificación o avería debe comentar con otras personas profesionales y con jerarquía igual o superior.
- Una vez convencido de la necesidad de la situación, debe presentar al jefe del departamento de mecánica y demostrar la necesidad.
- El jefe de mantenimiento dará ordenes para que se corrija o modifique el equipo.

#### 10.5.1. Torre de Enfriamiento.

- Observar que todos los spray estén trabajando correctamente.
- Observar que los manómetros estén marcando correctamente.
- Verificar que no existan escapes por flanches tuberías y tornillería.
- Observar que no existan fugas de agua, aire por tuberías y uniones.
- Verificar estado de las chapas o cuerpo de la torre.
- Observar estado de aislamiento.
- Observar estado corrosivo de la base.
- Verificar el buen funcionamiento de la bolla del control del tanqueva.
- Observar estado de limpieza.

#### 10.5.2. Ventilador.

- Medir el desgaste de las aspas y recubrimiento protector.
- Observar posibles grietas en aspas.
- Observar estado del acoplamiento entre la caja reductora con el motor.
- Chequear alineamiento y centrado del eje de aspas.
- Chequear y galgar rodamientos.
- Calibrar desgaste de babitt en caso tal sea de cojinete.

- Chequear desgaste de la carcasa protectora del ventilador.
- Verificar circulación o flujo de aire.

#### 10.5.3. Bomba.

- Verificar alineación del acoplamiento.
- Chequear tornillos de fijación de la bomba.
- Chequear empaques por si hay posibles fugas por carcasa o tuberías.
- Chequear que no existan ruidos normales.
- Chequear vibraciones.
- Verificar presión del agua con manómetro.
- Chequear estado corrosivo de la carcasa, base

#### 10.5.4.Red de tuberías.

- Chequear haciendo el seguimiento de toda la red, que no existan fugas por uniones válvulas, codos, té y demás elementos.
- Revisar estado corrosivo de toda la red.
- Verificar que la tubería este protegida por recubrimiento de pintura y además sea el color del respectivo símbolo.

- Chequear fijación y estado de soportes en tuberías aéreas.

## CONCLUSIONES

Se concluye que:

Comparando el caudal y el sistema de bombeo actual con el calculado respecto a las especificaciones de los fabricantes, el sistema actual esta generando grandes perdidas energéticas y económicas, por tratar de disipar el calor generado en los equipos.

Con el diseño del circuito cerrado y plan de ataque químico, se ahorra agua, la cual representa un costo altísimo para la empresa, y aumentara la eficiencia del proceso de transferencia de calor.

Con el desarrollo del plan de mantenimiento a los equipos que integran la Torre de Enfriamiento, se garantiza alargar la vida útil tanto de los equipos como de la misma Torre.

Es de gran importancia tener en cuenta los factores que influyen en la ubicación de la Torre de Enfriamiento, ya que la implementación de estos equipos conlleva a grandes inversiones.

## BIBLIOGRAFIA

BAUMBACH Ja. Franco Rj. Ensuring Sucess for your Cooling - Walter Treatment Program.

-----Hand book of industrial water conditioning, Betz laboratories Inc. Treuose, 1980.

CONTROL DE CALIDAD Y TRATAMIENTO DEL AGUA. The American Water Works association, Inc Mc Graw Hill, 1980.

CRANE. División de Ingeniería. Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. México: Mc Graw - Hill, 1987.

CREUS J. Alarcon. Tratado practico de refrigeración automática. México: Ed. Alfa Omega, 1997.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y DE CERTIFICACION. Normas Colombianas para la presentación de tesis de grado. Bogotá: ICONTEC., 1997.

KEMMER Frank N. Manual del Agua, su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. Nalco chemical company. Mc Graw Hill, 1995.

KERN Donald. Procesos de Transferencia de Calor. México: Mc Graw Hill, 1974

KNUDSEN J.G, LIBUTTI B.L, MUELLER R.W. The effects of antiscalants on fouling by cooling tower. Corrosión. Revista corrosión, 1984.

MC CABE Smith. Operaciones Básicas de Ingeniería química. México: Ed. Reverte S.A, 1972.

RANALD V, Giles. Mecánica de los fluidos e hidráulica. México: Mc Graw Hill, 1969.

REYNOLDS Perkins. Ingeniería Termodinámica. México: Mc Graw Hill, 1990

SEARS. Física Universitaria. México: Fondo Educativo Interamericano, 1986.

SHELDON D. Strauss, Revista Power Cooling- water Treatment for control of scaling, fouling, corrosion, 1984.

STREETER Victor. Mecánica de los fluidos. México: Mc Graw Hill. 1975.