

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE GUADALAJARA

INCORPORADA A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA DE CIENCIAS QUIMICAS



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

DISEÑO Y CALCULO DE UNA TORRE DE
ENFRIAMIENTO A ESCALA PILOTO CON FINES
EXPERIMENTALES EN LA CENTRAL
GEOTERMoeLECTRICA CERRO PRIETO I

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A

CARLOS ELIAS FAZ MARTINEZ
ASESOR: I.Q. MA. CONSUELO LOPEZ LIMON

GUADALAJARA, JALISCO 1985



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E

INTRODUCCION.	1
<u>CAPITULO 1.</u>	
GENERALIDADES.	
1.1 Sistema de Condensadores-Torre de Enfriamiento de Cerro Prieto.	4
1.2 Tratamiento de Agua	6
- Corrosión	7
- Incrustación.	9
- Depósitos	10
1.3 Ciclo del Azufre.	12
1.4 Análisis y teoría del comportamiento de la madera.	14
- Efectos adversos.	15
- Tipos de deterioro de la madera	16
- Lixiviación	17
- Delignificación	17
- Ataque microbiológico	18
1.5 Descripción de la Torre de Enfriamiento, instalada en Cerro Prieto I	22
<u>CAPITULO 2.</u>	
TEORIA GENERAL.	
2.1 Enfriamiento evaporativo.	24
2.2 Mecanismo de la evaporación	25
2.3 Temperatura de bulbo húmedo	27
2.4 Humidificación.	30
2.5 Definiciones.	30

CAPITULO 3.

DISEÑO Y CALCULO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO	35
3.1 Introducción teórica.	36
3.2 Diseño y cálculo.	42
- Condiciones de diseño	42
- Elección del tipo de relleno	42
- Cálculo de la sección transversal de la torre	42
- Comprobación del caudal del líquido respecto a las condiciones de carga	43
- Evaluación de las condiciones de operación	45
- Cálculo del número de unidades de transferencia del gas	49
- Cálculo del número de unidades de transferencia del líquido	50
- Cálculo de la altura real del relleno	51
- Cálculo de la estructura de la torre de enfriamiento	53
- Inclinación de las columnas y longitud inferior de la torre	62
- Cálculo del espesor de la piletta de la torre	63
- Estimación del diámetro óptimo de la tubería de distribución de agua	64
- Medidas estandarizadas para la estructura de la torre y especificaciones	66

CAPITULO 4.

ESTIMACION DE COSTOS	75
CONCLUSIONES	78
BIBLIOGRAFIA	80
APENDICE	82

INTRODUCCION:

En algunas partes del mundo existen zonas volcánicas, --- que debido a las características del subsuelo y a la existencia de yacimientos de agua, generan grandes cantidades de energía geotérmica en forma de vapor.

El primer uso comercial de la energía geotérmica como --- fuente de electricidad, se llevó a cabo en Italia en el año de 1904. Por muchas décadas, esta fuente natural permaneció sin -- descubrirse, excepto en el campo de Larderello en Toscana Italia.

La explotación de reservas hidrotérmicas empezó en gran - escala, hasta que fué construida la planta de Wairakei, en Nueva Zelanda, en 1958. Desde entonces algunos países han empezado a utilizar sus campos geotérmicos para generar energía eléctrica, incluyendo a Estados Unidos, México, Unión Soviética, - Japón, El Salvador, China, Las Filipinas e Islandia. Algunos - otros países están a punto de explotar sus reservas geotérmicas, estos países son Portugal, Chile, Costa Rica, Guatemala, - Honduras, Indonesia, Kenia, Nicaragua y Panamá.

En México, después de 15 años de detalladas investigaciones, estudios técnicos e ininterrumpido esfuerzo, se construyó la Central Geotermoeléctrica de Cerro Prieto.

Cerro Prieto es uno de los campos geotérmicos más importantes del mundo, debido a la calidad y presión del vapor que se obtiene. Se encuentra situado al Noroeste de la República - Mexicana, en el Estado de Baja California Norte, dentro del Valle de Mexicali. Como referencia geográfica, está en el área volcánica conocida como Cerro Prieto, que alcanza una elevación de 260 m.s.n.m. El clima existente es extremo, ya que

la temperatura varía entre 4°C bajo cero en Invierno y 48°C en Verano. La precipitación pluvial media anual, oscila entre 80-mm y 100 mm.

Actualmente, Cerro Prieto cuenta con 180 000 KW de capacidad, la cual se ha logrado en tres etapas. La primera etapa, se puso en operación en Abril de 1973, con una capacidad instalada de 75 000 KW. En Abril de 1979, se terminó de instalar la segunda, con una capacidad igual a la primera, y con un récord de construcción de solo dos años; la tercera etapa se encuentra en operación desde Agosto de 1981, con una capacidad de -- 30 000 KW.

La Comisión Federal de Electricidad, está desarrollando un programa de construcción de Centrales Geotermoeléctricas en Cerro Prieto, con el cual, para 1985 contará con una capacidad instalada de 620 000 KW.

El vapor que proviene del subsuelo y que se utiliza para generar energía eléctrica, se obtiene por medio de pozos profundos. Actualmente, Cerro Prieto opera con 34 pozos que suministran el vapor requerido por las cinco unidades turbogeneradoras.

El producto de los pozos es una mezcla binaria gas-líquido, que se hace pasar por un separador ciclónico, donde, debido a la fuerza centrífuga, el líquido se separa y es conducido a la laguna de evaporación. El vapor se conduce por medio de tubería hasta las turbinas, haciéndolas girar a 3 600 rpm. El vapor sale de las turbinas a una presión absoluta de 89 mm de Mercurio, y es conducido a una serie de tres condensadores barométricos. El vapor condensado, junto con el agua de enfriamiento utilizada en los condensadores, salen a temperaturas --

elevadas, y con el objeto de recircular esta agua, se hace pasar por una torre de enfriamiento, la cual pone al agua en contacto con el aire, disminuyendo así la temperatura del líquido hasta un valor aceptable.

Una cierta cantidad de gases incondensables, tales como H_2S , NH_3 , CO_2 y aire entre otros, se disuelven en el agua de enfriamiento lo cual ocasiona graves daños a las tuberías y a la torre de enfriamiento, tales como corrosión e incrustaciones.

El problema más serio al que se enfrenta una torre de enfriamiento es el deterioro de la madera con la que está construida.

La madera puede ser atacada por microorganismos, y por sustancias químicas añadidas para el tratamiento o para la exterminación de algas, hongos y bacterias, tales como fungicidas y biocidas, que, en un momento dado, pueden acabar con los microorganismos, pero también pueden dañar la torre.

Es necesario realizar experimentos en cuanto al tratamiento del agua de enfriamiento, el comportamiento de diferentes tipos de madera, su resistencia y durabilidad al ser impregnada o recubierta con diferentes sustancias preservativas, el conocimiento de la vida, obra y medios de proliferación de microorganismos, con el fin de poderlos atacar a tiempo y preservar así la madera de la torre.

El objetivo de esta tesis es diseñar y calcular una torre de enfriamiento a escala piloto, con la cual se podrán realizar diferentes pruebas experimentales, obteniendo así, resultados que servirán para aceptar o rechazar cualquier tipo de producto, ya sea natural o químico, que pueda dañar a la torre de enfriamiento principal. (2).

CAPITULO 1

1.1 SISTEMA DE CONDENSADORES-TORRE DE ENFRIAMIENTO DE CERRO PRIETO I.

Después de que el vapor ha desempeñado su función en cuanto a -- proporcionar energía al turbogenerador, es conducido a una serie de tres condensadores barométricos.

PRIMER CONDENSADOR.- Trabaja a una presión absoluta de 84 mm de Hg, y a una temperatura de 55°C. Recibe el vapor que proviene de la turbina, condensando la mayor parte de él, y el resto queda en forma de vapor y gases incondensables.

SEGUNDO CONDENSADOR.- Trabaja a una presión absoluta de 260 mm de Hg y a una temperatura de 45.8°C. Recibe la mezcla de gases y vapor que viene del primer condensador, por medio de un eyector que trabaja con vapor. Cabe mencionar que el uso de eyectores es debido a que la mezcla de gases se encuentra a una presión de vacío, por lo cual es necesario someterlos a succión para que fluyan en todo el sistema.

TERCER CONDENSADOR.- Trabaja a una presión absoluta de 760 mm de Hg, y a una temperatura de 42.6°C. Recibe dos corrientes de -- de mezclas gaseosas. Una que proviene del vapor de la turbina y otra que proviene del segundo condensador.

La serie de condensadores van despresurizando los gases hasta dejarlos a la presión atmosférica y así poder liberarlos a la atmósfera.

Los condensados de los tres condensadores salen a diferentes temperaturas, y se concentran en un recipiente llamado pozocaliente, con el objeto de homogenizar la temperatura del agua condensada. El agua alcanza una temperatura de 45.1°C. Del pozo es bombeada a la torre de enfriamiento.

El agua enfriada se recircula a los condensadores, utilizándola como agua de enfriamiento, la cual enfría la mezcla gaseosa por contacto directo, completando así el ciclo. (2)

DIAGRAMA GENERAL DEL SISTEMA
CONDENSADORES - TORRE DE ENFRIAMIENTO.

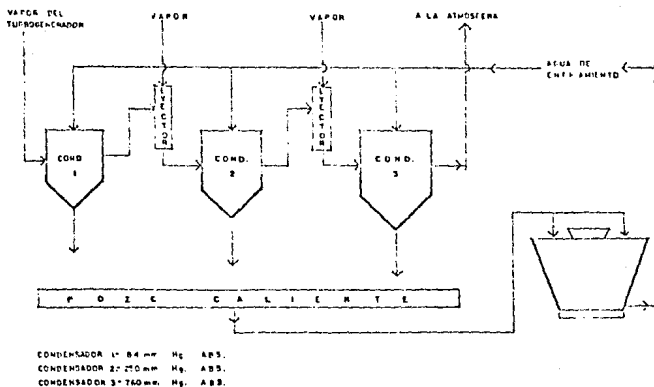


Figura 1-1

1.2 TRATAMIENTO DE AGUA

Es importante que exista un adecuado tratamiento del agua de enfriamiento en cualquier industria con el fin de evitar problemas de operación tales como:

- Reducción de la transferencia de calor.
- Paros no programados de equipos.
- Acortamiento de la vida útil del equipo.
- Aumento de los costos de bombeo.
- Corrosión del equipo.
- Mal comportamiento de los inhibidores de corrosión.
- Pérdida de eficiencia, debido a enfriamiento no efectivo.
- Mayor consumo del agua de repuesto.

La forma de tratamiento varía en cada caso particular, considerando que se tienen tipos diferentes de fuentes de suministro de agua con diferentes características, es decir, el origen del agua de repuesto, puede ser de pozos, ríos, lagunas o bien aguas negras. En el caso de Cerro Prieto el agua proviene de los pozos geotérmicos.

Las causas o motivos por las cuales se efectúan tratamientos de agua en una torre de enfriamiento son los siguientes:

- a) Prevenir la corrosión de los metales en contacto con el agua de enfriamiento.
- b) Prevenir la incrustación en las superficies de enfriamiento del sistema.
- c) Prevenir los depósitos en las superficies de enfriamiento y en la propia torre.
- d) Prevenir el deterioro de la madera de la torre de enfriamiento.

a) CORROSION

Existen varias teorías sobre la causa y el mecanismo de la corrosión; sobre la causa, la teoría más aceptada, es la que establece que, la mayoría de los metales en estado puro, son inestables en ciertos medios y tienden a revertirse a sus óxidos correspondientes u otras combinaciones más estables. La teoría más aceptada sobre el mecanismo de la corrosión, es la llamada teoría electro-química, la cual establece que, para que ocurra la corrosión de los metales deberá existir una diferencia de potencial entre dos o más puntos, que haga fluir una corriente eléctrica.

La corrosión de los metales en un medio acuoso, ocurre por una combinación de reacciones anódicas a catódicas, cuya intensidad puede retardarse por la adición de ciertos compuestos químicos conocidos como inhibidores de corrosión, los cuales, de acuerdo con la polarización que produzcan, pueden clasificarse en anódicos y/o catódicos. La acción inhibidora de corrosión, es producida por la formación de una película insoluble protectora sobre el metal. No existe un inhibidor de corrosión universal, siendo necesario tomar en cuenta, tanto el tipo de equipo por proteger, como el tipo de agua, para seleccionarlo. El inhibidor que da protección a un sistema, puede fallar en otro, o aún puede producir ataques intensivos o áreas restringidas por picaduras produciendo una perforación rápida.

Las impurezas en el agua, la temperatura y el régimen de flujo de agua, son los factores que influyen en la corrosión. Las impurezas en el agua que controlan las características de corrosión son:

- Contenido de Oxígeno disuelto
- Contenido de CO_2
- pH

- Sólidos disueltos (un aumento de cloruros o sulfatos, acrecenta el efecto corrosivo del O_2 y el CO_2)
- Presencia de ácidos minerales libres.
- Sulfatos.

De las impurezas anteriormente mencionadas, el Oxígeno disuelto y el Bióxido de Carbono, son los que causan los principales problemas de corrosión.

Los inhibidores anódicos principales, son los cromatos y dicromatos de Sodio y de Potasio, polifosfatos, silicatos, nitratos, filocianuros y molibdatos.

Los inhibidores catódicos inorgánicos principales, son las sales de Zinc, Níquel, Magnesio y cromato trivalente.

Los inhibidores anódicos y/o catódicos orgánicos principales son la aminas, amidas, paramidas, ácidos carboxílicos y ésteres.

Los compuestos químicos, únicamente pueden proporcionar -- buena protección contra la corrosión a altos niveles de concentración, lo cual aumenta los costos de operación y problemas -- con la formación de incrustaciones y depósitos, por lo que se utilizan combinaciones de inhibidores de corrosión, como la combinación de polifosfatos y Zn. El tratamiento con un polifosfato y un cromato, es llamado dianódico, porque ambos inhibidores son anódicos.

Algunos tratamientos tienen el efecto que, a alta velocidad, son removidos por el agua, y a baja velocidad, ocurre corrosión por picaduras, probablemente por que el inhibidor no alcanza a formar bien la película protectora.

b) INCRUSTACION

La incrustación es un depósito de partículas minerales, adherentes y densas, que forman junto con las superficies metálicas, un compuesto sellado. Los principales materiales que causan problemas de incrustación son los siguientes:

- CARBONATO DE CALCIO, el cual es el más común y tiene una solubilidad inversa con la temperatura.
- SULFATO DE CALCIO, el cual es más soluble que el carbonato, y que, con purgas apropiadas, se puede controlar y no dar problemas de incrustaciones.
- SILICE, que tiene alta solubilidad en función directa con el pH, sin embargo, debe mantenerse abajo de 150 a 200 ppm.
- COMPUESTOS DE MAGNESIO, que usualmente no se encuentran.
- HIERRO O MAGNESIO
- FOSFATOS Y LODOS, que son productos de la reversión de polifosfatos a ortofosfatos, que reaccionan con los minerales presentes en el agua.

Los factores principales que afectan la formación de incrustaciones, son las siguientes:

- TEMPERATURA, normalmente un aumento de temperatura acrecenta la formación de incrustaciones al proporcionar calor para completar la reacción química, o bien disminuye la solubilidad de algunos materiales en el agua.
- CAMBIO EN EL pH O ALCALINIDAD, no tiene la misma tendencia en todos los materiales.
- CONCENTRACION DE SOLIDOS DISUELTOS, altas concentraciones de unos, afectan la solubilidad de otros y acrecentan la tendencia a la formación de incrustaciones.
- ACTIVIDAD DE CIERTOS MICROORGANISMOS.
- ALTA CONCENTRACION DE ALGUNOS INHIBIDORES DE CORROSION.
- CONDICIONES ALTERNADAS DE SECCIONES SECAS Y HUMEDAS.

La prevención de formación de incrustaciones en las superficies de enfriamiento se logra controlando los constituyentes que forman incrustaciones, mediante un tratamiento externo con suavizadores de cal o con suavizadores de intercambio de iones. También se puede evitar la incrustación conservando en solución los elementos que la forman, por medio de un tratamiento interno con ácido para bajar el pH, o bien utilizando agentes en forma de gelatos para secuestrar los constituyentes.

c) DEPOSITOS

Los depósitos se forman de materiales que se encuentran en suspensión en el agua de circulación; a diferencia de la incrustación, la cual se forma por los materiales que se encuentran en solución; ambos fenómenos ocurren frecuentemente juntos y -- los resultados son peores que si ocurrieran solos.

Los depósitos son precipitaciones no adherentes de materiales en suspensión, y los más comunes encontrados en una torre de enfriamiento son:

- Fango, arcilla u otros sólidos en suspensión en el agua de re puesto.
- Polvo en el aire y otras partículas que llegan a la torre por el aire de entrada.
- Sustancias tales como aceites que provienen de fugas en los procesos.
- Deterioro de la madera de la torre.
- Lodos.
- Materia orgánica natural.
- Hierro.
- Arena.
- Basura.
- Productos de corrosión.

- Crecimientos biológicos dentro de la torre (son los mayores problemas y los más difíciles de combatir).
- Cromo trivalente.

Los factores que tienen influencia sobre la formación de depósitos e incrustaciones, son:

- La velocidad del agua, que a un valor de 0.3 m/s o menos -- los acrecenta y de 0.9 m/s o más pueden ocurrir en forma menos severa.
- Las variaciones en las características del agua de repuesto, que pueden ser debidas a las condiciones climatológicas y a características del aire que normalmente introduce contaminantes a través de la torre de enfriamiento.
- La prevención de la formación de depósitos puede hacerse -- eliminando los materiales del agua que causan depósitos, o bien mediante un tratamiento de agua de circulación, para evitar que los materiales y microorganismos se adhieran a las superficies de transferencia de calor, efectuándose este tratamiento por medio de materiales dispersantes o aglomerantes. (1)

1.3 EL CICLO DEL AZUFRE

Entre los ciclos bioquímicos que ocurren en la naturaleza, el ciclo del Nitrógeno y el ciclo del Carbono son familiares para la mayoría de la gente, pero poco se ha oído sobre la importancia del ciclo del Azufre y su papel en la corrosión en la industria.

El ciclo del Azufre es un ciclo continuo de cambio bioquímico, el cual puede ser producido completamente por la acción de una mezcla de microbios colectivamente llamados "Bacteria - Azufre" o también convertidos por plantas autotróficas, las cuales incorporan el Azufre, de sulfato, a su proteína.

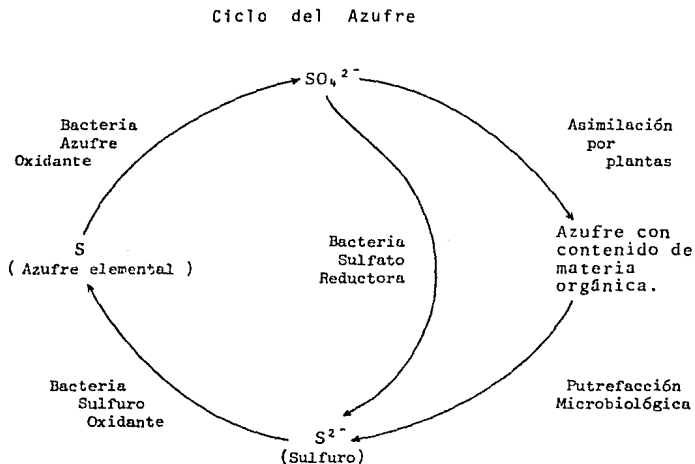
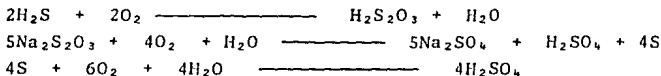


Figura 1-2

Las plantas, o mueren o son consumidas por los animales, y de cualquier manera, la protefna es eventualmente degradada por microbios putrefactantes, para regresar al Azufre a su forma simple reducida.

El género más simple de la bacteria Azufre oxidante es --- Thiobacillus, el cual es responsable de una significativa proporción de la corrosión industrial. La bacteria Azufre oxidante desempeña sus funciones metabólicas aeróbicamente sobre materiales inorgánicos generados a menudo, por bacteria sulfato reductora. No requiere de materia orgánica como fuente de alimento, y algunas especies pueden resistir completamente condiciones extremas de acidez.

En condiciones aeróbicas, el Tiobacilo probablemente oxida al sulfuro, tiosulfato o Azufre, de acuerdo a las siguientes ecuaciones:



En realidad, falta mucho por conocer acerca de los cambios o reacciones químicas que sufre el Azufre durante el proceso, lo que sí se conoce es su gran capacidad para deteriorar el equipo. (7).

1.4 ANALISIS Y TEORIA DEL COMPORTAMIENTO DE LA MADERA.

Por su durabilidad, conveniencia y bajo costo inicial, la madera es el material más común usado en la fabricación de las torres de enfriamiento, o en alguna proporción en el empaque o relleno y en la estructura.

Las maderas generalmente usadas son: Madera roja de California (Redwood), ciprés, pino amarillo, y algunas veces, se usan también el abeto Douglas, roble blanco, pino y cedro.

Un análisis típico de la madera de pino rojo, muestra -- que aproximadamente el 50% de el peso seco, es celulosa y hemicelulosa. El contenido de lignina en la madera se aproxima a un 30% de su peso seco. El resto, que es alrededor de un -- 20%, puede agruparse dentro de una clase llamada EXTRACTIVOS, la cual incluye aquellos componentes que son solubles en solventes tales como agua. En este grupo están una amplia variedad de materiales, que constituyen una de las mayores diferencias entre varias especies de madera.

Cada uno de los tres anteriores componentes de la madera, desempeñan funciones específicas:

El cuerpo de la madera es formado por las fibras de celulosa que dan fuerza a la madera. Enlazando las fibras y contribuyendo a la fuerza de la madera, está la lignina, material que ejecuta una función similar al cemento en la erección de una pared de ladrillo o piedra. El tercer componente, los extractivos, incluyen los materiales que proveen la resistencia natural de la madera al ataque de organismos vivos.

Aunque la madera es altamente durable como material para torres de enfriamiento, no es inmune a la deterioración.

El tipo de deterioración, varía como una condición de las condiciones ambientales, a las cuales la madera es expuesta -- en cualquier sección de la torre de enfriamiento.

Similarmente, la importancia de cada causa de deterioración varía de acuerdo a la localización de la planta industrial. (3)

EFFECTOS ADVERSOS

El propósito principal de las torres de enfriamiento, es proveer un adecuado suministro de agua de buena calidad, a un flujo y temperatura relativamente constantes. El deterioro de la madera se debe prevenir a tiempo, ya que de no hacerlo se - puede dar lugar a:

- Incremento de costos de la torre de enfriamiento.
- Incremento de costos de operación.
- Pérdida de eficiencia de enfriamiento.
- Posible pérdida de tiempo de producción.
- Aumento de riesgos de seguridad.

Mientras que el diseño de la torre de enfriamiento, no parece jugar ningún papel importante en el tipo o cantidad de deterioración encontrada, tiene alguna relación en el problema global. La mayoría de las torres que hoy están siendo construidas, tienen unidades de succión que contribuyen con un peso considerable en la parte alta de la torre. Estas unidades de succión son abanicos, motores y equipo auxiliar. Consecuentemente, éste está involucrado seriamente en el problema del deterioro de la madera, ya que le resta fuerza para soportar el equipo, y resistir el derrumbe como un resultado de las vibraciones que provienen de la operación del equipo. En algunas regiones del país donde prevalecen vientos fuertes, la fuerza requerida es aún más crítica.

Otras consideraciones importantes, son la seguridad de la gente que trabaja dentro, sobre o alrededor de la torre; y la contaminación del agua de enfriamiento con los productos que resultan de la deterioración. Para el hombre confiado que camina atravesando la parte alta de la torre o utilizando una de las escaleras, la presencia de madera debilitada en la torre, presenta una situación muy peligrosa. Si las fibras resultantes del deterioro de la madera caen en el agua de la torre, -- pueden promover emplagamiento y ensuciar el equipo de enfriamiento, persianas, filtros y, como consecuencia, la disminución del flujo de agua. (3).

TIPOS DE DETERIORO DE LA MADERA

El deterioro de la torre puede ser clasificado en función del componente que es atacado o deteriorado. Por ejemplo, el término común delignificación se refiere al deterioro de la lignina. La remoción de extractos solubles es comúnmente llamada lixiviación. Esto representa un problema completamente diferente, ya que la destrucción de la celulosa es usualmente causada aún por otro factor que la delignificación.

Previamente había sido considerado como un factor determinante para incrementar el deterioro de la madera de la torre, la naturaleza corrosiva del agua que es usada en las secciones del relleno y otras secciones de madera. Ahora, sin embargo, el consenso es que mientras que la erosión acarrea material de deteriorado de las superficies de la madera, hay nuevas superficies que quedan expuestas a la deterioración media, la erosión por sí sola, no es un problema en la deterioración de la madera.

En general, el problema del deterioro de la madera es químico o microbiológico en naturaleza. Algunas veces es difícil distinguir uno de otro, y a menudo varios tipos de deterioro se presentan en una pieza de madera dada. (3).

LIXIVIACION

Es el más simple de los diferentes tipos de ataques a la madera, es la remoción de extractos solubles de la madera de la torre a medida que el agua pasa sobre ella. La lixiviación o esparcimiento de color que ocurre con el encendido del sistema de una nueva torre es típico. Normalmente el agua recirculada se tornará café oscuro o negro, color que durará algunos meses después de que la unidad ha sido puesta en operación.

Comúnmente, la lixiviación ocurre durante el inicio de las operaciones, aunque se presenta lixiviación adicional debido a que nuevas superficies de la madera están expuestas a la acción de lixiviación del agua. La fuerza de la madera no parece ser afectada por la lixiviación, sin embargo, como resultado es susceptible a que sean incrementadas otras formas de deterioro.

La lixiviación no produce ningún deterioro visible, en cambio otros tipos de fenómenos sí lo hacen. (3).

DELIGNIFICACION

La delignificación es el más común de otros tipos de ataque químico, el cual puede causar un severo deterioro. Los productos químicos comúnmente involucrados, son agentes oxidantes, como por ejemplo, Cloro y álcalis como Na_2CO_3 . El ataque a los componentes de la lignina de la madera, por medio de reacción u oxidación, deja un residuo con un alto contenido de celulosa. La madera típicamente toma una apariencia blanca, no obstante, las fibras tienen buena fuerza. Sin embargo, no están estrechamente adheridas a las otras fibras, y pueden ser fácilmente removidas de la superficie de la madera. Normalmente, estas fibras deberán estar en cualquier lugar de la torre, y su longitud varía de 1/4 a 1 pulgada aproximadamente. Estas fibras son

similares a las encontradas en el papel o en textiles, por su fuerza y apariencia.

Actualmente, la delignificación puede ser comparada al procesamiento de la madera en la industria del papel y de la pulpa la cual es producida por materiales alcalinos y altamente oxidantes durante el cocimiento de la pulpa. Algunos de estos mecanismos están involucrados en la delignificación de la madera de la torre de enfriamiento, sin embargo la velocidad de reacción en la torre de enfriamiento, es mucho más lenta que la del proceso del papel.

La delignificación ocurre en las áreas de la torre que están constantemente en contacto con el agua, y también en esas áreas en donde alternativamente la madera permanece seca o húmeda, por ejemplo, las persianas, que están expuestas al aire de succión y otras superficies exteriores. También puede ocurrir en las áreas húmedas que no están siendo lavadas por el agua.(3).

ATAQUE MICROBIOLÓGICO

El deterioro microbiológico de la madera de la torre, ocurre bajo condiciones ambientales adecuadas para el crecimiento de organismos microbiológicos, los cuales utilizan la celulosa como fuente de Carbón en su ciclo de crecimiento. Normalmente, la actividad de los organismos microbiológicos está sobre las porciones de celulosa de la madera, dejando un residuo, el cual es alto en contenido de lignina.

Característicamente la madera se vuelve más oscura, suave tiene poca fuerza y usualmente es ligera en peso, comparada con madera sana. Las fibras tienen una longitud generalmente menor que 1/8 ó 1/16 de pulgada. Este tipo de ataque produce una -

madera quebradiza o con agrietamiento cruzado, ya sea en la superficie o en toda ella. El agrietamiento cruzado es el rompimiento transversal de la fibra de la madera. La madera quebradiza es la que se rompe transversalmente a la fibra en una forma plana o uniforme diferente al tipo de astillas que se forman cuando se rompe una madera sana.

Es importante darse cuenta, que los organismos que producen deterioro en la madera de la torre de enfriamiento, son los mismos organismos que en el bosque deterioran los árboles muertos y producen un hongo en forma de repisa que aparece en postes viejos y árboles caídos. La destrucción de las fibras de la celulosa es consumada por la secreción de una enzima extracelular que ataca la celulosa y la convierte en formas solubles las cuales pueden ser absorbidas por organismos llamados Organismos Celulolíticos.

Actualmente hay dos tipos principales de deterioración de la madera por microorganismos: Una de ellas la pudrición profunda o interna, es probablemente la más insidiosa y peligrosa, aunque también puede producirse un deterioro severo como resultado de la pudrición superficial. La pudrición profunda es caracterizada típicamente por una pieza de madera con apariencia sana, que tiene peso ligero, y al quebrarse muestra un severo ataque interno y solamente una cáscara de madera sana.

Los organismos que producen ataque interno o superficial, son hongos de la clase de los Basidiomicetos y también de los Fungi Imperfecti. Estos organismos consumen celulosa, y han sido comúnmente asociados con las llamadas, pudrición café, pudrición blanca, pudrición de bolsa blanca o pudrición cubículo. En la clase de los Basidiomicetos están las lenzites y poria, especies que han sido identificadas de muestras de madera deteriorada. La clase Fungi Imperfecti cubre otras especies de organis-

mos, tales como fusarium y alternaria. Estos organismos crecen - diferentemente dentro de la madera, como significado del patrón de crecimiento. De cualquier forma que sea obtenida la identificación, el organismo es Basidiomiceto o Fungi Imperfecti.

Algunos organismos trabajan en los extremos de la madera - introduciéndose en el lumen y trabajando desde ese punto al interior. Otros penetran la superficie de la madera a través de - la fibra. En ambos casos, los microorganismos obtienen Carbón de la celulosa para uso en su ciclo de vida.

El ataque microbiológico superficial difiere considerablemente del deterioro interno. El ataque ocurre generalmente sobre todas las superficies y parece ser más severo en el Verano. La fuerza de la madera es destruida gradualmente, y, si están -- presentes fuerzas erosivas, ocurre un adelgazamiento general de la madera.

Los organismos responsables de la pudrición superficial, - incluyen miembros de la clase de los Ascomicetos y Fungi Imperfecti. Hay también alguna evidencia para indicar que ciertas -- clases de bacterias que consumen celulosa, juegan un papel importante en la pudrición superficial.

Ambos tipos de organismos son transportados por el aire, - aunque no hay seguridad de que la madera traída del bosque y -- preparada, no esté infectada todavía. No es poco común encontrar ataque interno o profundo en grado avanzado al cabo de 2 ó 3 años después de que la torre ha sido puesta en operación, a - menos que hayan sido tomadas medidas protectoras. Con el tipo de ataque superficial, el deterioro no es tan rápido, pero si - éste va acompañado del deterioro químico, puede ser tan severo, que requerirá renovarse la madera después de 6 u 8 años.

El ataque microbiológico de la madera puede ocurrir en todas las secciones de la torre de enfriamiento donde prevalece la mezcla. Si ocurre el lavado de la madera con agua, el ataque microbiológico es predominantemente superficial. En las áreas calientes y húmedas, tales como las secciones del eliminador de niebla, donde no ocurre un lavado con agua, existirá un ataque de tipo interno. (3).

1.5 DESCRIPCION DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO INSTALADA EN LA CENTRAL GEOTERMoeLECTRICA CERRO PRIETO "I".- MODELO, CAPACIDADES.

Torre de enfriamiento marca Marley.

Tipo: flujo cruzado doble, tiro inducido.

Servicio: dos unidades de 37,500 KW.

CONDICIONES DE DISEÑO

Flujo de agua de circulación = 122 500 GPM = 28 000 m³/h

Temperatura de bulbo húmedo = 78.8°F = 26°C

Rango de enfriamiento = 28.8°F = 16°C

Grado de aproximación = 10.8°F = 6°C

GARANTIAS DE COMPORTAMIENTO A LAS CONDICIONES DE DISEÑO

Flujo de agua enfriado = 122 500 GPM = 28 000 m³/h

Pérdidas en el eliminador de arrastre, en

 % del flujo de agua de entrada = 0.10 %

Temperaturas del agua enfriada = 89.6°F = 32°C

Nivel de ruido a plena capacidad = 76 dbA

Potencia neta absorbida por cada motor = 60.8 KW

Altura de Bombeo en pies con relación a la base = 33.35

CARACTERISTICAS TECNICAS

Número de celdas = 12

Longitud total en pies = 480 = (146.34 m)

Ancho total en pies = 83 = (25.3 m)

Número de ventiladores = 12

Velocidad de los ventiladores a capacidad nominal = 105 rpm

Diámetro de las bridas de los cabezales de

 entrada de agua = 36 pulg = (0.91 m)

Motores tipo inducción, TEFC

Potencia nominal = 75 HP

Número de motores = 12

Voltaje nominal = 440 V

Velocidad nominal a 60 cps = 1170 rpm

MATERIALES

Estructura y relleno de madera roja tratada, envoltura y persianas de lámina de asbesto cemento, chimeneas de los ventiladores de poliester reforzado con fibra de vidrio, las aspas de los ventiladores de poliester reforzado con fibra de vidrio, tornillos, tuercas clavos y flecha de transmisión en acero inoxidable serie 300.

ALCANCE DEL SUMINISTRO

Los equipos y sistemas incluidos en el alcance del suministro, son descriptiva pero no limitativamente los siguientes:

12 ventiladores

12 reductores de velocidad tipo engranes

12 motores eléctricos

12 flechas de transmisión entre los motores y los reductores

12 interruptores limitadores de vibración

12 chimeneas para ventilador

Sistema de distribución del agua, estructura, relleno, cubiertas y persianas

Cabezales de entrada de agua

Válvulas de control de flujo

2 escaleras

1 juego de herramientas

1 juego de refacciones

Así como todo el material, equipos auxiliares y accesorios necesarios para el correcto funcionamiento de la torre de enfriamiento. (4).

CAPITULO 2

TEORIA GENERAL

2.1 ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO

Los procesos de enfriamiento del agua están entre los conocimientos más antiguos del hombre. Usualmente, el agua es enfriada, exponiendo su superficie al aire. Algunos de estos procesos son lentos, tales como el enfriamiento del agua sobre la superficie de una laguna; otras son comparativamente más rápidas, tales como el rociado del agua en el aire. Estos procesos envuelven la exposición de una superficie de agua al aire.

El proceso de transferencia de calor involucra:

- a) Transferencia de calor latente debido a la vaporización de una pequeña porción de agua.
- b) Transferencia de calor sensible debido a la diferencia de temperaturas del agua y del aire.

Aproximadamente el 80% de esta transferencia de calor es debido al calor latente y un 20% al calor sensible.

Teóricamente, la remoción posible de calor por libra de aire circulado en una torre de enfriamiento, depende de la temperatura y el contenido de humedad del aire. Una indicación del contenido de humedad del aire, es la temperatura de bulbo húmedo. Idealmente la temperatura de bulbo húmedo es la temperatura más baja a la cual puede ser enfriada el agua. Prácticamente la temperatura fría del agua se aproxima, pero no iguala a la temperatura de bulbo húmedo en una torre de enfriamiento; esto es debido a que es imposible poner toda el agua en contacto con aire fresco, cuando ésta cae a través de la superficie de relleno, hasta el fondo de la torre. La magnitud de aproximación a la temperatura de bulbo húmedo, depende del diseño de la torre. Los factores más importantes son, el tiempo de contacto agua-aire, cantidad de superficie de relleno, y la fragmentación del agua en pequeñas gotas. En la práctica actual, las torres -

de enfriamiento son rara vez diseñadas para aproximaciones más cercanas de 5°F, por que es incosteable económicamente, construir una torre de tales dimensiones. (9).

2.2 MECANISMO DE LA EVAPORACION

De acuerdo con la teoría cinética, el mecanismo de evaporación de un líquido es el siguiente:

Debido al movimiento térmico desordenado de las moléculas en el líquido, la velocidad de algunas moléculas se desvía mucho de sus valores medios, y parte de las moléculas en la superficie, que poseen la suficiente energía cinética para vencer la fuerza de cohesión, alcanzan el medio gaseoso situado sobre la superficie del líquido; estas moléculas chocan entre sí y con las moléculas del gas, ocasionando que parte de ellas se rechacen hacia la superficie del líquido, en donde, o bien se rechazan de nuevo o son absorbidas por el líquido. Una parte de las moléculas desprendidas o rechazadas de la superficie del líquido, penetran en seguida por difusión y convección en el medio gaseoso; en la evaporación del líquido las moléculas con mayor velocidad de movimiento, se separan del líquido y la energía cinética media se reduce por las moléculas despedidas, o en otras palabras, la temperatura del líquido baja. La energía que las moléculas desprendidas consumen para vencer la fuerza de cohesión y el trabajo mecánico para el aumento del volumen en la evaporación, se conoce con el nombre de calor de vaporización.

En el medio gaseoso, la velocidad de la moléculas de vapor que se separan de la superficie y la siguiente difusión y convección, son despreciables comparados con la velocidad a la cual el líquido emite moléculas; en la interfase se produce una acumulación rápida de moléculas de vapor que alcanzan la saturación y se separan de la superficie siguiendo las leyes de difusión.

Aunque la presión de vapor en la superficie del líquido - sea algo más reducida que la presión de saturación correspondiente a la temperatura en la superficie, en forma práctica, esta diferencia puede desprejarse, puesto que se considera que el vapor en la superficie del líquido está saturado.

La evaporación del líquido se produce cuando la presión -- del vapor saturado a la temperatura de la superficie del líquido, es mayor que la presión parcial del vapor en el medio ambiente, independientemente del hecho de que la temperatura del líquido sea mayor o menor que la del aire sobre la superficie del líquido y de esta forma la evaporación del líquido está ligada a su enfriamiento; por la diferencia de temperatura, la transmisión de calor que se cede por contacto (conducción y convección), puede producirse en el sentido líquido-gas o en el sentido del gas-líquido en función de cualquier medio que tenga la temperatura más alta.

Cuando la temperatura del líquido es más elevada que la del gas, el enfriamiento se produce, siguiendo una acción simultánea de evaporación y cediendo calor por contacto, en este caso la temperatura del aire se eleva. Inversamente, cuando la temperatura del aire es más elevada, el calor cedido por contacto, enfría el aire y transmite una parte del calor hacia el líquido; cuando la cantidad de calor es más pequeña que la cantidad de calor que pierde el líquido por evaporación, el enfriamiento del líquido no se interrumpe y continúa hasta el momento en que - cuando el flujo de calor del gas hacia el líquido (calor cedido por contacto) se hace igual a la pérdida de calor por evaporación. En este estado se alcanza un estado de equilibrio, es decir, el límite teórico de enfriamiento del líquido. (1).

2.3 TEMPERATURA DEL BULBO HUMEDO

La temperatura de bulbo húmedo, es la temperatura de equilibrio, alcanzada por una pequeña cantidad de líquido que se evapora dentro de una cantidad grande de una mezcla insaturada de vapor-gas. Bajo condiciones apropiadas puede ser usada para medir la humedad de la mezcla. Para este propósito, el bulbo de un termómetro se cubre con gasa o tela que está en contacto -- continuo con el líquido, manteniéndolo mojado continuamente, -- después, el bulbo se pone en contacto con la corriente de la mezcla gaseosa. La temperatura indicada por el termómetro alcanzará un valor más bajo que la temperatura de bulbo seco del gas, si éste está insaturado. Conociendo este valor, se calcula la humedad del gas.

Termómetro de Bulbo Húmedo

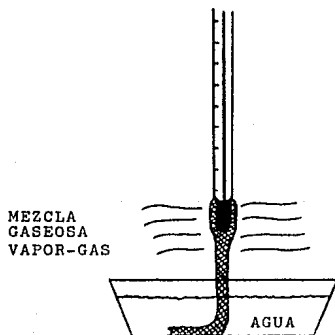
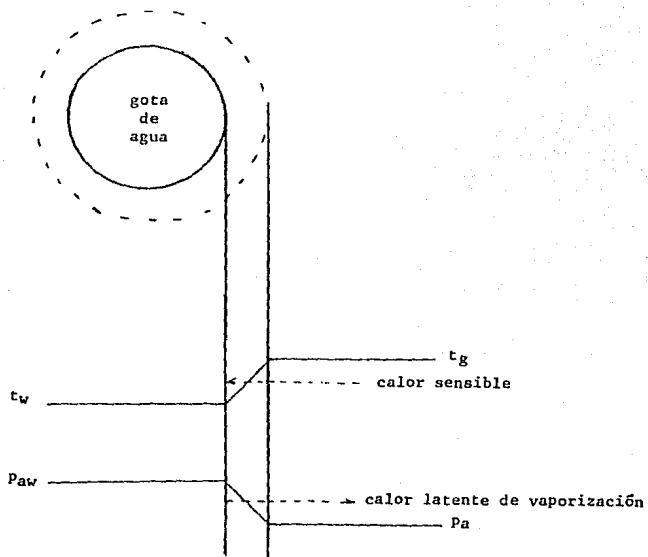


Figura 2-1

Se considera una gota de líquido sumergido en una corriente rápida de mezcla insaturada vapor-gas. Si el líquido está inicialmente a una temperatura más alta que el punto de rocío del gas, la presión vapor del líquido será más alta en la superficie de la gota, que la presión parcial del vapor en el gas, por lo que el líquido se evaporará y se difundirá en el gas. El calor latente requerido para la evaporación será primeramente suministrado por el calor sensible de la gota de agua, la cual se enfriará. Tan pronto como la temperatura del líquido es reducida a un valor más bajo que la temperatura de bulbo seco del gas, el calor fluirá del gas al líquido, a una velocidad que aumenta a medida que la diferencia de temperatura se hace más grande. Finalmente, la proporción de transferencia de calor del gas al líquido igualará a la proporción de calor requerido para la evaporación, y la temperatura del líquido permanecerá constante a un valor bajo, la temperatura de bulbo húmedo, t_w .

El mecanismo del proceso bulbo húmedo para la mezcla aire-agua, es esencialmente el que gobierna la saturación adiabática, excepto que en este caso, se asume que la humedad del aire no cambia durante el proceso. (12).

Evaporación del Agua en el Aire Caliente



- t_w = Temperatura de bulbo húmedo.
- t_g = Temperatura de bulbo seco.
- P_a = Presión parcial del vapor de agua.
- P_{aw} = Presión parcial del agua.

Figura 2-2

2.4 HUMIDIFICACION

La humidificación implica la transferencia de materia entre un líquido puro y un gas permanente que es insoluble en el líquido. Esta operación es más sencilla que la de absorción, debido a que el líquido contiene sólo un componente, y no hay, por consiguiente en este caso, gradientes de concentración ni resistencia a la transferencia en la fase líquida. Sin embargo, tanto la transferencia de materia como la de calor son importantes y se influyen mutuamente. (5).

2.5 DEFINICIONES

En las operaciones de humidificación, especialmente cuando se aplican al sistema aire-agua, se utilizan con frecuencia algunas definiciones especiales. La base habitual para los cálculos de ingeniería, es una unidad de masa de aire seco o aire libre de vapor, denominando "vapor", a la forma gaseosa del componente que también está presente en la fase líquida, en este caso, agua.

Se tomará como base 1 Kg de aire seco. El vapor contenido en la fase gaseosa se tomará como base A y el aire seco como componente B.

Es necesario que la presión total del sistema esté fijada, puesto que las propiedades de una mezcla gas-vapor, varían con la presión total, por lo tanto, se supone que la presión total es 1 atmósfera, además de que las mezclas gas-vapor cumplen con las leyes de los gases ideales. (5).

HUMEDAD ABSOLUTA: H

Es el número de kilogramos de vapor de agua contenidos en un kilogramo de aire seco. Con esta definición, la humedad absoluta depende solamente de la presión parcial del vapor de agua en la mezcla. Si la presión parcial del vapor de agua es \bar{p}_a (atm), y la relación molar de vapor a gas, para la presión total de 1 atmósfera, es $\bar{p}_a/(1-\bar{p}_a)$. La humedad absoluta es, por consiguiente:

$$H = \frac{M_a \bar{p}_a}{M_b (1 - \bar{p}_a)}$$

siendo:

M_a = peso molecular del agua

M_b = peso molecular del aire

La humedad absoluta está relacionada con la fracción molar en la fase gaseosa, mediante la ecuación:

$$y = \frac{H/M_a}{1/M_b + H/M_a}$$

Puesto que H/M_a es generalmente pequeño en comparación de $1/M_b$, y puede con frecuencia considerarse directamente proporcional a H.

GAS SATURADO

Es aquel que está en equilibrio con el líquido a la temperatura del gas. De acuerdo con la ley de Dalton, la presión parcial del vapor en un gas saturado es igual a la presión de vapor del líquido a la temperatura del gas. Si H_s es la humedad de saturación y p_a la presión de vapor del líquido.

$$H_s = \frac{M_a p_a}{M_b (1 - p_a)}$$

HUMEDAD RELATIVA- H_r

Es la relación entre la presión parcial del vapor y la presión vapor del líquido a la temperatura del gas. Generalmente se expresa sobre una base porcentual, de forma que la humedad del 100% corresponda a gas saturado y la del 0% a gas seco.

$$H_r = 100 \frac{\bar{p}_a}{p_a}$$

HUMEDAD PORCENTUAL- H_a

Es la relación entre la humedad absoluta real H y la de saturación H_s a la temperatura del aire. o sea

$$H_a = 100 \frac{H}{H_s} = \frac{\bar{p}_a / (1 - p_a)}{p_a / (1 - p_a)} = H_r \frac{1 - p_a}{1 - \bar{p}_a}$$

Para todas las demás humedades distintas de 0 y 100%, la humedad porcentual es menor que la humedad relativa.

CALOR HUMEDO- C_s

Es igual al número de kilocalorías necesarias para aumentar la temperatura de 1 Kg de aire, más el vapor que le acompaña, - en 1°C. Por consiguiente:

$$C_s = C_{p_b} + C_{p_a} H$$

siendo C_{p_b} y C_{p_a} , los calores específicos del gas y el vapor -- respectivamente.

VOLUMEN HUMEDO - V_h

Es igual al volúmen total en metros cúbicos, de un kilogramo de aire seco, más el del vapor que le acompaña, a 1 atm y a la temperatura del gas. De acuerdo con las leyes de los gases, V está relacionado con la humedad y la temperatura mediante la ecuación:

$$V_h = \frac{22.4 T}{273} \left(\frac{1}{M_b} + \frac{H}{M_a} \right)$$

siendo:

T = temperatura absoluta, °K.

Para el aire seco, $H = 0$ y V_h es igual al volúmen específico del aire permanente. Para el gas saturado $H = H_s$, y V_h se transforma en el volúmen saturado.

PUNTO DE ROCIO

Es la temperatura a la que es preciso enfriar una mezcla de aire y vapor de agua a humedad absoluta constante, para que alcance la saturación. El punto de rocío de un gas saturado es igual a la temperatura del gas.

ENTALPIA TOTAL - I

Es la entalpía de 1 Kg de aire más la del vapor de agua que le acompaña. Para calcular I es necesario elegir dos estados de referencia, uno para el aire y otro para el vapor de agua. Sea T_0 la temperatura de referencia para los dos componentes, basando la entalpía del agua, sobre agua líquida a la temperatura T_0 . Si la temperatura del gas es T y su humedad H , la entalpía total viene dada por la suma de tres términos: El calor sensible del aire seco, el calor latente del agua a la temperatura T_0 , y el calor sensible del vapor de agua. Por consiguiente:

$$I_y = C_{pb}(T-T_o) + H\lambda_o + C_{pa}H(T-T_o)$$

siendo λ_o el calor latente del líquido a la temperatura T_o . Como $C_s = C_{pb} + C_{pa}H$, entonces

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

Referencia: (5).

CAPITULO 3

DISEÑO Y CALCULO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO.

Poniendo en contacto directo agua caliente con aire frío, aquella se enfriará por pérdida de calor sensible y por evaporación. Simultáneamente, el aire se calentará y se humidificará. Por lo tanto, la operación de enfriamiento de agua, representa un caso de transferencia simultánea de materia y de calor. Como en todos los procesos de transferencia de materia y de transmisión de calor, por contacto directo, una de las consideraciones primarias al diseñar la instalación es la creación de una gran área interfaseal. Evidentemente, una torre de relleno constituye una solución para conseguir este propósito.

El enfriamiento de agua es una operación en la que la mayor resistencia a la transferencia corresponde a la fase gaseosa. Por consiguiente, para una transferencia eficiente se requiere una elevada velocidad del aire. Por tanto, la pérdida de presión se hace crítica, y los rellenos se diseñan principalmente desde este punto de vista. Como consecuencia, el tipo de relleno más comúnmente empleado para el enfriamiento de agua, está constituido por las rejillas de madera, tanto de goteo como de película líquida.

Las torres de tiro inducido son más satisfactorias en su funcionamiento, puesto que proporcionan una distribución de aire más uniforme y reducen el peligro de recirculación del mismo. Proporcionando, por consiguiente, un rendimiento más elevado -- por término medio.

La altura de la torre de enfriamiento requerida depende -- considerablemente de las condiciones atmosféricas, particularmente de la temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada. En una determinada localidad, la temperatura de bulbo húmedo varía durante el año, alcanzando su valor máximo sólo muy raras veces.

Así pues, resultaría antieconómico diseñar la torre basándose en la temperatura de bulbo húmedo máxima, por lo tanto se llega a un acuerdo entre los valores máximos y mínimos. (11).

3.1 INTRODUCCION TEORICA

El agua pierde calor por transmisión de calor sensible y por evaporación. Para una altura diferencial de torre $d\zeta$, y área de la sección transversal A, la transmisión de calor sensible será:

$$dQ_s = h_g a (T-t) A d\zeta \quad (3.1)$$

donde:

- h = Coeficiente de transmisión de calor en la fase gaseosa en $\text{Kcal/m}^2\text{h } ^\circ\text{C}$.
- a = Area interfásica por unidad de volumen de la torre, m^2/m^3 .
- T = Temperatura del agua a la altura ζ de la torre, $^\circ\text{C}$.
- t = Temperatura del aire en la misma posición de la torre, $^\circ\text{C}$.

La ecuación anterior es sólo aproximadamente correcta, puesto que el coeficiente individual de transmisión de calor se utiliza junto con la fuerza impulsora global. Se supone, por consiguiente, que toda la resistencia a la transmisión de calor está localizada en la fase gaseosa; es decir que la resistencia a la transmisión de calor en el agua es despreciable. Esta hipótesis es razonable puesto que el coeficiente de transmisión de calor para el agua, es mucho mayor que el correspondiente del aire.

La transmisión de calor por evaporación puede expresarse como producto de la cantidad de agua transferida por difusión a través de la película del aire, por el calor latente de vaporización:

$$dQ_e = \lambda K_g a M_a \frac{P}{(P-p)_{m1}} (p_i - p) A d\zeta \quad (3.2)$$

donde:

λ = calor latente de vaporización, Kcal/Kg.

K_g = coeficiente de transferencia de materia en la fase gaseosa, mol/m h atm.

M_a = peso molecular del agua.

P = presión total, atm.

p = Presión parcial del vapor de agua en el aire, atm.

p_i = presión parcial del vapor de agua en la interfase = presión de vapor saturado a la temperatura del agua.

El término $P/(P-p)_{m1}$ denominado en ocasiones factor de arrastre, representa el efecto del caudal másico del vapor de agua sobrepuesto a la transferencia por difusión.

Por definición, la humedad absoluta, H, viene dada por:

$$H = (M_A/M_a) p / (P-p) \quad (3.3)$$

donde: M_a = peso molecular del aire, por lo tanto,

$$p = (P-p)H(M_a/M_A) \quad (3.4)$$

Substituyendo la ecuación (3.4) en la (3.2), resulta:

$$dQ_e = \lambda K_g a M_a P \frac{P}{(P-p)_{m1}} \{ (P-p_i) H_i - (P-p) H \} A d\tau \quad (3.5)$$

$$= \lambda K_g a M_a P \frac{P-p}{(P-p)_{m1}} \left(\frac{P-p_i}{P-p} H_i - H \right) A d\tau$$

donde H_i = humedad absoluta en la interfase = humedad de saturación a la temperatura del agua.

Los valores $(P-p)/(P-p)_{m1}$ y $(P-p_i)/(P-p)$, son muy próximos a la unidad, por lo que la ecuación (4.5) se simplifica a:

$$dQ_e = \lambda K_g a M_a P (H_i - H) A d\tau$$

$$= \lambda K_h a (H_i - H) A d\tau$$

donde $K_h = K_g M_a P$ = coeficiente de transferencia de materia en la fase gaseosa, a utilizar con una fuerza impulsora expresada en función de las humedades.

Por definición, la entalpía del aire húmedo, I_y , es igual a:

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

donde:

- $C_s = C_{pb} + C_{pa} H$ = calor húmedo.
- C_{pb} = calor específico del aire.
- C_{pa} = calor específico del vapor del agua.
- t_o = temperatura de referencia.
- λ_o = calor latente de vaporización a t_o .

Substituyendo la expresión para λH de la ecuación (3.7) en la (3.6), y suponiendo que λ es aproximadamente constante, se obtiene:

$$dQ_e = K_{HA}((I_i - I) - C_s(T - t))A \, d\tau \quad (3.8)$$

La cantidad de calor eliminada de la sección diferencial, se obtiene sumando las ecuaciones (3.1) y (3.8):

$$\begin{aligned} dQ &= dQ_s + dQ_e \\ &= a(h_H(T-t) + K_H(I_i - I) - C_s(T-t))A \, d\tau \\ &= K_{HA} \left[\left(\frac{h_G}{K_H} - C_s \right) (T-t) + I_i - I \right] A \, d\tau \end{aligned} \quad (3.9)$$

Para el sistema aire-agua, h_G/K_H es aproximadamente igual a C_s , es decir,

$$(h_G/K_H) - C_s = 0$$

Por lo que la ecuación (3.9) se convierte en:

$$dQ = K_{HA}(I_i - I)A \, d\tau \quad (3.10)$$

Al pasar a través de la sección diferencial, la entalpía del aire aumentará y la del agua disminuirá en dQ , por lo que,

$$dQ = G \, dI = LC \, dT \quad (3.11)$$

siendo C = calor específico del agua, G = caudal del aire y L = caudal del agua.

Combinando las ecuaciones (3.10) y (3.11), se obtiene,

$$G dI = K_H a (I_i - I) A d\zeta \quad (3.12 \text{ a})$$

$$LC dT = K_H a (I_i - I) A d\zeta \quad (3.12 \text{ b})$$

Separando variables e integrando,

$$\int_{I_2}^{I_1} \frac{dI}{(I_i - I)} = \frac{K_H a A}{G} Z \quad (3.13 \text{ a})$$

$$\int_{T_2}^{T_1} \frac{CdT}{(I_i - I)} = \frac{K_H a A}{L} Z \quad (3.13 \text{ b})$$

donde Z es la altura del relleno y los subíndices 1 y 2, se refieren a entrada y salida respectivamente.

$dT/(I_i - I)$, se denominará número de unidades de transferencia del gas, N_G .

$CdT/(I_i - I)$, se denominará número de unidades de transferencia del líquido, N_L .

Así, por definición,

$$N_G = \int_{I_2}^{I_1} \frac{dI}{I_i - I} \quad (3.14 \text{ a})$$

$$N_L = \int_{T_2}^{T_1} \frac{CdT}{I_i - I} \quad (3.14 \text{ b})$$

Por analogía con otros procesos de transferencia de materia, se pueden definir las alturas de las unidades de transferencia del gas y del líquido, como sigue:

$$H_G = G/K_H aA \quad (3.15 \text{ a})$$

$$H_L = L/K_H aA \quad (3.15 \text{ b})$$

Por lo tanto, de las ecuaciones (3.13) se definen:

$$Z = N_G \times H_G \quad (3.16 \text{ a})$$

$$Z = N_L \times H_L \quad (3.16 \text{ b})$$

La teoría del enfriamiento de agua por contacto directo, y de los procesos de humidificación en general, se basa en el hecho que,

$$h_G/K_H C_s = 1 \quad (3.17)$$

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

$$N_A = K_H(H_i - H) \quad (3.18)$$

donde, N_A es el flujo de transferencia de materia. (11).

3.2 DISEÑO Y CALCULO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO A ESCALA PILOTO.

CONDICIONES DE DISEÑO:

Flujo de agua = 100 gal/min = 6.31 Kg /seg = 0.3785 m³/min. = L

Razón aire-agua = G/L = 1.25

Flujo de aire = 125 gal/min = 7.89 Kg /seg = 14 642.04 ft³/min. = G

Temperatura del agua caliente = 118.4°F = 48°C. = T₁

Temperatura del agua fría = 89.6 °F = 32°C. = T₂

Temperatura de bulbo húmedo = 78.8°F = 26°C. = T_w

Rango de enfriamiento = 28.8°F = 6°C.

Grado de aproximación = 10.8°F = 6°C.

ELECCION DEL TIPO DE RELLENO:

Se utilizará relleno del tipo de película líquida, y consistirá en rejas aserradas de madera de 2" de altura y 3/8" de ancho, - con un espaciado de 2" entre sí.

CALCULO DE LA SECCION TRANSVERSAL DE LA TORRE:

Area de la sección transversal = A = Gv_s/u

dónde:

v_s = volúmen saturado a T_w = 0.877 m³/Kg

G = 7.89 Kg /seg

u = velocidad del aire = 2.13 m/seg

$$A = \frac{(7.89)(0.877)}{(2.13)} = 3.25 \text{ m}^2$$

$$A [=] \frac{(\text{Kg/seg})(\text{m}^3/\text{Kg})}{(\text{m/seg})} [=] \text{m}^2$$

Las cargas de gas y líquido referidas a esta área son:

$$L'' = \frac{7.89}{3.25} = 2.43 \frac{\text{Kg}}{\text{seg m}^2} = 8734.62 \frac{\text{Kg}}{\text{h m}^2}$$

$$G'' = \frac{6.31}{3.25} = 1.94 \frac{\text{Kg}}{\text{seg m}^2} = 6987.69 \frac{\text{Kg}}{\text{h m}^2}$$

COMPROBACION DEL CAUDAL DEL LIQUIDO RESPECTO A LAS CONDICIONES DE CARGA.

Los cálculos anteriores suponen que la velocidad del aire es la única variable determinante de la sección transversal de la torre. Antes de realizarse otro cálculo debe de estimarse el efecto del caudal del líquido, es decir, ha de comprobarse la capacidad de carga de la torre. Para un buen rendimiento, el caudal del líquido debe ser suficientemente elevado para asegurar un mojado satisfactorio del relleno, pero no debe exceder un límite superior en el que comienza el fenómeno de cascada.

CMH = Caudal mínimo de humectación, es el caudal mínimo de líquido para el cual se alcanza un completo mojado.

Caudal mínimo de líquido = $L''_{\min} = \text{CMH} \times a \times \text{densidad líquido}$

Para rejillas con un espaciado de 5.08 cm (2 pulg) o menor, Morris y Jackson recomiendan 0.08 m²/h m de caudal mínimo de humectación. Puesto que las rejillas aserradas de dimensiones - 2 x 2 x 3/8 pulg tienen $a' = 42.65 \text{ m}^2/\text{m}^3$, por lo tanto el caudal mínimo de líquido será:

$$L''_{\min} = (0.08)(42.65)(1000) = 3412 \text{ Kg/h m}^2$$

No se dispone de una expresión general para los límites superiores del caudal del líquido en las torres con rellenos de rejillas. Sin embargo es razonable suponer que el caudal del líquido no debe exceder del de carga. Este puede determinarse mediante una gráfica dada por Morris y Jackson* en la que se representa la razón de caudales volumétricos gas-líquido en el punto de carga, frente al caudal de humectación. En este caso la razón de caudales volumétricos aire-agua, V_G/V_L es

$$V_G/V_L = (G''/L'')v_{s\rho_L} = (1.25)(0.877)(1000)$$

$$V_G/V_L = 1096.25$$

De la gráfica se deduce que el caudal de humectación requerido para esta razón aire-agua es $0.26 \text{ m}^3/\text{h m}$

$$L''_{\text{max}} = (0.26)(42.65)(1000) = 11089.0 \text{ Kg/h m}^2$$

Por consiguiente la carga de líquido de la torre está dentro de los límites satisfactorios. (11).

*Gráfica localizada en la página 16 de la referencia 11.

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE OPERACION.

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

$$\begin{aligned} \text{calor entrado} &= \text{calor salido} \\ GI_2 + LC(T - t_0) &= GI + LC(T_1 - t_0) \end{aligned}$$

Despejando en esta ecuación de balance de calor, la entalpía, I,

$$I = \frac{L}{G} C(T - t_0) + I_2 - \frac{L}{G} C T_1$$

Y, tomando $t_0 = 0^\circ\text{C}$ como temperatura de referencia, la ecuación anterior se reduce a:

$$I = \frac{L}{G} C T + I_2 - \frac{L}{G} C T_1$$

Existe, pues, una relación lineal entre I y T conocida como ecuación de la línea de operación. En una gráfica de I frente a T, la línea de operación tiene una pendiente L/G, con una ordenada en el origen igual a $(I_2 - LCT_1/G)$; tomando en cuenta que numéricamente, el valor del calor específico del agua es la unidad.

En la mayoría de los cálculos de torres de enfriamiento, se conocen I_2 , T_W y T_1 ; Por lo tanto, puede trazarse la línea de operación, fijando el punto de operación correspondiente a la base, punto A (T_W , I_2), y se traza desde él una línea de pendiente L/G que finaliza en B, punto cuya abscisa es T_1 , tal como se muestra en la Fig. 3-1.

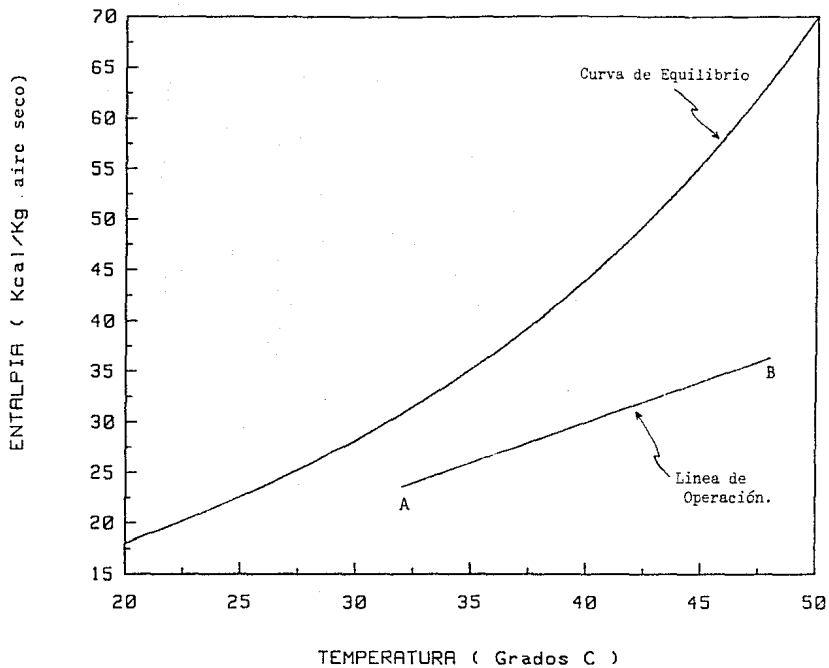


FIG. 3-1

CONDICIONES DE OPERACION.

CALCULO DEL NUMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA

Para el cálculo del número de unidades de transferencia, se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\text{Para el gas, } N_G = \int_{I_2}^{I_1} \frac{dI}{I_i - I} \quad \text{ecuación 3.14 a.}$$

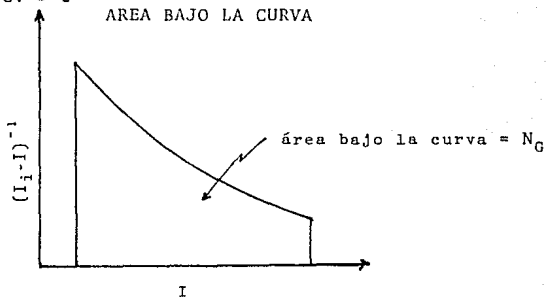
$$\text{Para el líquido, } N_L = \int_{T_1}^{T_2} \frac{CdT}{I_i - I} \quad \text{ecuación 3.14 b.}$$

Es necesario obtener el valor de la integral, ya sea numérica o gráficamente. En este caso la integral se desarrolla gráficamente, calculando el área bajo la curva mostrada en la Fig. 3-2, y utilizando datos de las condiciones de operación de la torre proporcionados por la gráfica de la Fig. 3-1 ---- tomando como método de cálculo el de la regla rectangular.

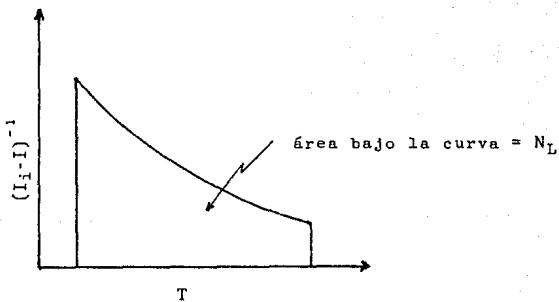
Así, se obtiene el área total bajo la curva, que corresponde al valor de la integral, y por lo tanto, al valor del número de unidades de transferencia, ya sea del gas o del líquido según el caso.

FIG. 3-2

AREA BAJO LA CURVA



$$N_G = \int_{I_2}^{I_1} \frac{dI}{I_i - I}$$



$$N_L = \int_{T_2}^{T_1} \frac{CdT}{I_i - I}$$

Tabla No. 1

CALCULO DEL NUMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA DEL GAS

p	I	ΔI	I_i	$(I_i - I)$	$(I_i - I)_m$	$\Delta I / (I_i - I)_m$
1	23.5	0.8	30.7	7.2	7.50	0.1067
2	24.3	0.8	32.1	7.8	8.10	0.0988
3	25.1	0.8	33.5	8.4	8.85	0.0904
4	25.9	0.8	35.2	9.3	9.70	0.0825
5	26.7	0.8	36.8	10.1	10.55	0.0758
6	27.5	0.8	38.5	11.0	11.45	0.0699
7	28.3	0.8	40.2	11.9	12.40	0.0645
8	29.1	0.8	42.0	12.9	13.50	0.0593
9	29.9	0.8	44.0	14.1	14.70	0.0544
10	30.7	0.8	46.0	15.3	15.95	0.0502
11	31.5	0.8	48.1	16.6	17.30	0.0462
12	32.3	0.9	50.3	18.0	18.75	0.0480
13	33.2	0.8	52.7	19.5	20.40	0.0392
14	34.0	0.8	55.3	21.3	22.25	0.0359
15	34.8	0.8	58.0	23.2	24.20	0.0331
16	35.6	0.74	60.8	25.2	26.23	0.0282
17	36.34		63.6	27.26		

Area total = $N_G = 0.9831$

$$K_{Ha} = 6.72 G^{0.75} = 6.72 (8734.62)^{0.75} = 6071.588$$

$$H_G = G'' / K_{Ha} = 8734.62 / 6071.588 = 1.4386$$

$$Z = H_G N_G = (1.4386)(0.9831) = 1.4143 \text{ m.}$$

Altura del relleno = 1.41 m.

Tabla No. 2

CALCULO DEL NUMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA DEL LIQUIDO

p	T	ΔT	I	I_i	$I_i - I$	$(I_i - I)_m$	$\Delta T / (I_i - I)_m$
1	32	}== 1	23.5	30.7	7.2	}===== 7.50	0.1333
2	33		24.3	32.1	7.8		
3	34	}== 1	25.1	33.5	8.4	}===== 8.85	0.1130
4	35		25.9	35.2	9.3		
5	36	}== 1	26.7	36.8	10.1	}===== 10.55	0.0948
6	37		27.5	38.5	11.0		
7	38	}== 1	28.3	40.2	11.9	}===== 12.40	0.0806
8	39		29.1	42.0	12.9		
9	40	}== 1	29.9	44.0	14.1	}===== 14.70	0.0680
10	41		30.7	46.0	15.3		
11	42	}== 1	31.5	48.1	16.6	}===== 17.30	0.0578
12	43		32.3	50.3	18.0		
13	44	}== 1	33.2	52.7	19.5	}===== 20.40	0.0490
14	45		34.0	55.3	21.3		
15	46	}== 1	34.8	58.0	23.2	}===== 24.20	0.0413
16	47		35.6	60.8	25.2		
17	48	}== 1	36.34	63.6	27.26	}===== 26.23	0.0381

Area total = $N_L = 1.2248$

$$K_{Ha} = 6.72 G''^{0.75} = 6.72 (8734.62)^{0.75} = 6071.588$$

$$H_L = L'' / K_{Ha} = 6987.69 / 6071.588 = 1.1509$$

$$Z = H_L N_L = (1.1509)(1.2248) = 1.4096 \text{ m.}$$

Altura del relleno = 1.41 m.

CALCULO DE LA ALTURA REAL DEL RELLENO

La altura del relleno calculada anteriormente, tiene un valor de 1.41 m (55.68 in), pero esta altura no es definitiva en virtud de que el número de rejillas que constituirá el relleno, multiplicada por la altura de cada unidad de relleno, nos dará la altura real.

Considerando lo anterior, dicha altura no deberá ser inferior a 1.41 m, ni sobrepasar la calculada en demasía.

La altura real la dará la suma de las alturas de las diversas secciones que constituyen el relleno, Fig. 3-3. La altura de las secciones fué calculada haciendo las consideraciones geométricas pertinentes.

En base a la Fig. 3-3.

Altura de la base + altura de las secciones intermedias + altura de la sección superior = altura real del relleno

Base + sección superior = $2 \frac{7}{8} + 1 \frac{5}{8} = 4 \frac{1}{2}$ in = 11.43 cm.

Altura mínima que deben tener las secciones intermedias = altura calculada del relleno - base - sección superior.

Altura mínima de las secciones intermedias = 55.68 - 4.5 (in)

Altura mínima de las secciones intermedias = 51.18 in = 130 cm.

Número de secciones intermedias =

$$= \frac{\text{Altura mínima de las secciones intermedias}}{\text{Altura de la sección intermedia}}$$

Número de secciones intermedias = $51.18 / 2.5 = 20.472 \approx 21$

ALTURA REAL DEL RELLENO = 57 in = 144.78 cm.

CALCULO DE LA ALTURA REAL DEL RELLENO



Sección superior

Profundidad de los barrenos = $3/8$ in = 0.95 cm.

Altura de la sección superior = $16/8 - 5/8 = 13/8$ in.

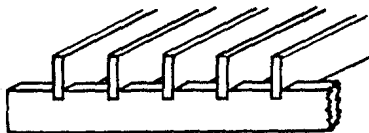
Altura de la sección superior = $1\ 5/8$ in. = 4.13 cm.



Sección intermedia

Altura de la sección intermedia = $32/8 - 4(3/8) = 20/8$ in.

Altura de la sección intermedia = $2\ 4/8$ in = 6.35 cm.



Base

Altura de la base = $32/8 - 3(3/8) = 23/8$ in.

Altura de la base = $2\ 7/8$ in = 7.30 cm.

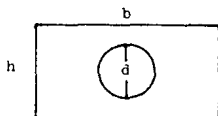
FIG. 3-3 ALTURA REAL DEL RELLENO.

CALCULO DE LA ESTRUCTURA DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO

a) CALCULO DEL PESO TOTAL DE DISEÑO

PESO DEL PISO SUPERIOR DE LA TORRE:

Area total del piso = área del piso - área del abanico



$$b = 3.20 \text{ m} = 10.49 \text{ ft}$$

$$h = 1.95 \text{ m} = 6.396 \text{ ft}$$

$$d = 3h \text{ in} = 2.833 \text{ ft}$$

$$A_T = bh - \pi d^2/4$$

$$A_T = (10.49)(6.396) - (\pi)(2.833)^2/4$$

$$A_T = 67.09 - 6.30$$

$$A_T = \underline{60.79 \text{ ft}} = \underline{8753.76 \text{ in}} = \underline{18.53 \text{ m.}}$$

$$\text{Espesor del piso} = e = 1 \text{ in} = 0.083334 \text{ ft.}$$

$$\text{Volumen del piso} = A_T \times e$$

$$\text{Volumen del piso} = (60.79)(0.083334)$$

$$\underline{\text{Volumen del piso}} = \underline{5.07 \text{ ft}^3} = \underline{0.1437 \text{ m}^3}.$$

$$\text{Peso total del piso} = V_T \times \text{densidad de la madera}$$

$$\text{Peso total del piso} = (5.07 \text{ ft}^3)(40 \text{ lb/ft}^3)$$

$$\underline{\text{Peso total del piso}} = \underline{202.63 \text{ lb.}} = \underline{92.0 \text{ Kg.}}$$

PESO DEL CERCO

Dimensiones de la madera:

Barandales = 2 × 1 in.

Barrotes = 2 × 2 in.

Volúmen del cerco:

$$4 \text{ barandales frontales} = (4)(2/12)(1/12)(10.49) = 0.583 \text{ ft}^3$$

$$4 \text{ barandales laterales} = (4)(2/12)(1/12)(6.396) = 0.355 \text{ ft}^3$$

$$22 \text{ barrotes} = (22)(2/12)(2/12)(3.28) = \underline{2.004 \text{ ft}^3}$$

$$V_T = 2.942 \text{ ft}^3$$

Peso del cerco = $V_T \times$ densidad de la madera.

Peso del cerco = $(2.942 \text{ ft}^3)(40 \text{ lb/ft}^3) = 117.69 \text{ lb.}$

PESO TOTAL DE DISEÑO

200 lb peso del abanico.

300 lb peso de 2 personas encima de la torre.

120 lb peso del cerco.

250 lb peso del piso.

870 lb PESO TOTAL DE DISEÑO.

PESO TOTAL DE DISEÑO = 870 lb = 395 Kg.

TERMINOS UTILIZADOS EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL:

DIAGRAMA DE CORTANTE.- Es la representación gráfica de los valores de la fuerza cortante vertical en toda la longitud de la viga. Se dibuja una línea horizontal directamente debajo del diagrama de la viga, y se grafican los valores de la fuerza cortante en las diferentes secciones de la viga a una escala conveniente, los valores positivos encima y los negativos debajo de la línea de la base.

DIAGRAMA DE MOMENTO.- La tendencia máxima de una viga a fallar por flexión se llama momento flexionante máximo. El momento flexionante representa la energía que ejercen las cargas para flexionar la viga.

La magnitud del momento flexionante varía en toda la longitud de una viga, y se utiliza el valor máximo para determinar el tamaño correcto de la viga que hay que usar. El momento flexionante máximo ocurre en la sección de la viga en la que las fuerzas cortantes cambian de valor positivo a negativo. (8)

FORMULAS UTILIZADAS:

Módulo de Sección = Momento flexionante máximo/ esfuerzo de diseño de la madera.

$$\text{Módulo de Sección} = Z = M/\sigma_D = bh^2/6$$

σ_D = El esfuerzo de cedencia de la madera, aplicándole un factor de seguridad del 33% = 667 lb/in².

b = base de la viga. h = altura de la viga.

(8)

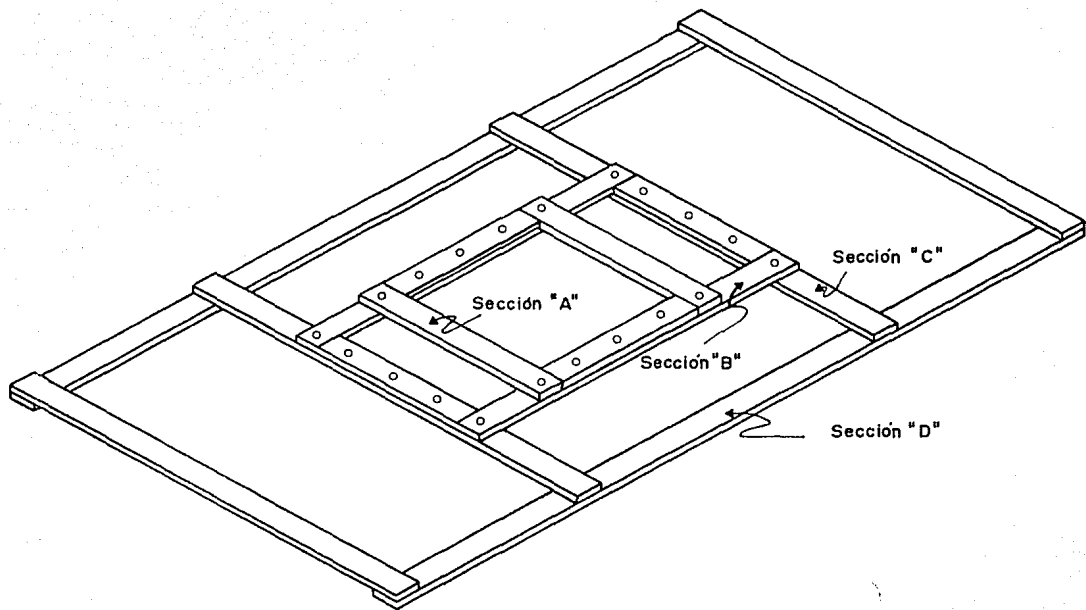
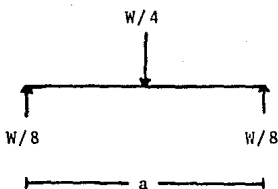


FIG. No. 3.4 ESTRUCTURA DE LA PLATAFORMA DE LA TORRE.

SECCION "A"



W = peso del abanico + el peso de una persona recargada - sobre él.

$$W = 200 \text{ lb} + 150 \text{ lb} = 350 \text{ lb.}$$

$$a = 34 \text{ in.}$$

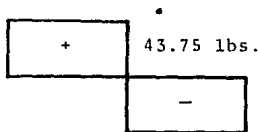


Diagrama de cortante.

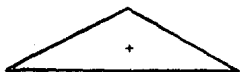


Diagrama de momento:

$$M = (W/8)(a/2)$$

$$M = (43.75)(34/2)$$

$$M = 743.75 \text{ lb-in.}$$

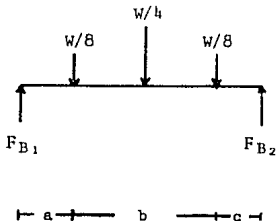
$$Z = M/\sigma_D = 743.75/667 = (1\text{b-in})/(1\text{b/in}^2) = 1.115 \text{ in}^3$$

$$Z = bh^2/6 \quad h = \sqrt{6Z/b}$$

Utilizando estas fórmulas, se tiene que para una viga de 4 in, tendrá una altura de 1.29 in.

DIMENSIONES CALCULADAS DE LA SECCION "A" = 4 × 1.29 pulgadas

SECCION "B"



$$a = 7.6 \text{ in.}$$

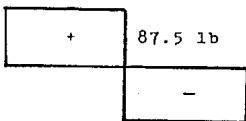
$$b = 34 \text{ in.}$$

$$c = 7.6 \text{ in.}$$

$$+\circlearrowleft \Sigma M_{B_1} = 0$$

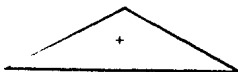
$$\Sigma M_{B_1} = (43.75)(7.6) + (87.5)(24.6) + (43.75)(41.6) - F_{B_2}(49.2) = 0$$

Diagrama de cortante:



$$F_{B_2} = \frac{43.75}{49.20} = 87.5$$

Diagrama de momento:



$$M = (87.5)(24.6)$$

$$M = 2152.5 \text{ lb-in}$$

$$Z = M/\sigma_D = 2152.5 / 667 = 3.23 \text{ in}^3$$

$$Z = bh^2/6$$

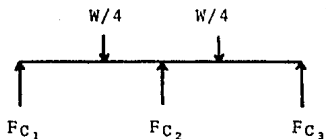
$$b = 6Z/h$$

$$h = \sqrt{6Z/b}$$

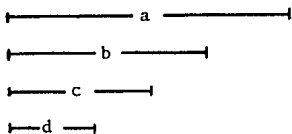
Para una viga de 6 pulgadas de base, le corresponde una altura de 1.79 pulgadas.

DIMENSIONES CALCULADAS DE LA SECCION "B" = 6 x 1.79 pulgadas.

SECCION "C"



$W = 350 \text{ lb.}$

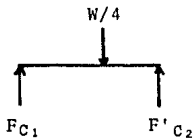


$a = 76.75 \text{ in.}$

$b = 55.40 \text{ in.}$

$c = 38.38 \text{ in.}$

$d = 21.38 \text{ in.}$



$+ \circlearrowleft \Sigma M_{C_1} = 0 = (87.5)(21.38) - F'_{C_2}(38.38)$

$F'_{C_2} = 48.74 \text{ lb.}$

$F_{C_2} = 2F'_{C_2} = 97.48 \text{ lb.}$

$+\uparrow \Sigma F_y = 0$

$+\uparrow \Sigma F_y = F_{C_1} + F'_{C_2} - W/4 = 0$

$F_{C_1} = 87.5 - 48.74 = 38.76 \text{ lb.}$

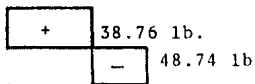


Diagrama de cortante

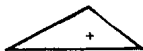


Diagrama de momento

$M = (F'_{C_2})(c-d)$

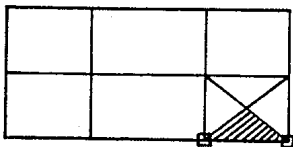
$M = (48.74)(17) = 828.58 \text{ lb-in.}$

$Z = M/\sigma_D = 828.58/667 = 1.242 \text{ in}^3$

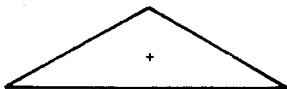
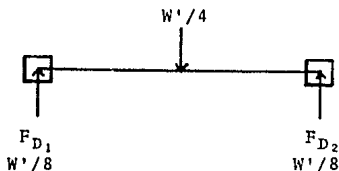
$h = \sqrt{6Z/b}$

DIMENSIONES CALCULADAS DE LA SECCION "C" = 4 x 1.365 pulgadas

SECCION "D"



$$a = 38.376 \text{ in}$$



$$M = (W'/8)(a/2)$$

$$M = (23.01)(19.188) = 441.52 \text{ lb-in}$$

$$Z = M/\sigma_D = 441.52/667 = 0.662 \text{ in}$$

DIMENSIONES CALCULADAS DE LA SECCION "D" = 4 x 0.996 pulgadas



Sección del piso que actuará sobre la parte crítica de la viga "C".

Volumen del piso = $a^2 \times$ espesor del piso.

$$\text{Vol. piso} = (38.376)^2(1)$$

$$\text{Vol. piso} = 1472.72 \text{ in}^3$$

W piso = Vol. piso \times densidad de la madera.

$$W \text{ piso} = (1472.72)(40)(1/12^3)$$

$$W = (\text{in}^3)(\text{lb/ft}^3)(\text{ft}^3/\text{in}^3)$$

$$W \text{ piso} = 34.09 \text{ lbs.}$$

W' diseño = W piso + peso de una persona.

$$W' \text{ diseño} = 34.09 + 150$$

$$W' \text{ diseño} = 184.09 \text{ lbs.}$$

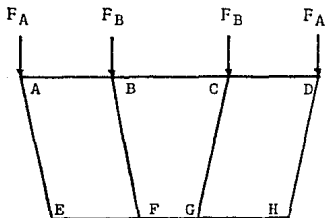
$$+\Sigma M_{D1} = 0$$

$$\Sigma M_{D1} = (46.02)(0.4875) -$$

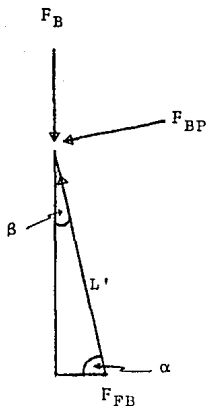
$$(F_{D2})(0.975) = 0$$

$$F_{D2} = 23.01 \text{ lbs.}$$

COLUMNAS



$$F_B = F_{C_2} = 97.48 \text{ lb.}$$



$$\alpha = 80^\circ$$

$$\beta = 10^\circ$$

$$F_{FB} = F_B / \cos \beta$$

$$F_{FB} = 97.48 / \cos 10^\circ$$

$$F_{FB} = 98.98 \text{ lb.}$$

$$F_{BP} = F_B \cos \alpha$$

$$F_{BP} = 97.48 \cos 80^\circ$$

$$F_{BP} = 16.93 \text{ lb.}$$

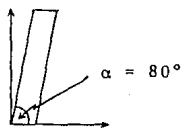
$$\text{Momento, } M = F_{BP} L' = (16.93)(72.03) = 1219.49 \text{ lb-in}$$

$$Z = M / \sigma_D = 1219.49 / 667 = 1.8283 \text{ in}^3$$

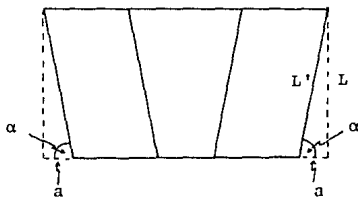
DIMENSIONES CALCULADAS DE LAS COLUMNAS = 6 x 1.35 pulgadas

INCLINACION DE LAS COLUMNAS Y LONGITUD INFERIOR DE LA TORRE

La inclinación de las columnas de la estructura de la torre de enfriamiento, se tomó de acuerdo a la torre principal instalada en la Central Geotermoelectrica Cerro Prieto I, cuyas columnas tienen un ángulo de inclinación de 80° con respecto a la horizontal,



De acuerdo a lo anterior se calcula la longitud inferior de la torre,



$$\tan \alpha = \frac{L}{a}$$

$$\tan 80^\circ = \frac{1.8}{a}$$

$$a = \frac{1.8}{\tan 80^\circ} = 0.3174$$

$$a = 0.32 \text{ m.}$$

$$L' = L / \sin \alpha$$

$$L' = 1.8 / \sin 80^\circ$$

$$L' = 1.83 \text{ m.}$$

$$\begin{aligned} \text{Longitud inferior de la torre} &= \text{longitud superior} - 2a \\ &= 3.05 - 2(0.32) \end{aligned}$$

$$\text{LONGITUD INFERIOR DE LA TORRE} = 2.41 \text{ m.}$$

CALCULO DEL ESPESOR DE LA PILETA DE LA TORRE

$$t = 2.45 L \sqrt{\frac{\alpha H 0.036 G}{S}}$$

t = espesor requerido, pulgadas.

L = longitud del tanque, pulgadas.

α = factor dependiente de la razón H/L.

G = gravedad específica del líquido, agua = 1.

S = valor del esfuerzo en la placa.

$$t = 2.45 L \sqrt{\frac{(0.001)(12)(0.036)(1)}{(13750)}}$$

$$t = 2.45 L (0.0001773)$$

$$t = (2.45)(118.08)(0.0001773)$$

$$t = 0.05128 \text{ pulgadas}$$

Permitiendo un espesor de 1/16 de pulgada por efecto de la corrosión, el espesor será:

$$t = 0.05129 + 0.0625 = 0.1138 \text{ pulgadas.} = 0.91/8 \text{ pulgada.}$$

$$t = 1/8 \text{ pulgada.}$$

De acuerdo al manual Monterrey, el espesor mínimo de planchas de acero es de 3/16 pulgada, por lo tanto, éste será el valor del espesor de la placa a utilizar. (6).

ESTIMACION DEL DIAMETRO OPTIMO DE LA TUBERIA DE DISTRIBUCION DE AGUA.

$$D_{i \text{ opt}} = 3.9 L^{0.45} \rho^{0.13}$$

dónde:

$D_{i \text{ opt}}$ = diámetro interior óptimo = in.

L = flujo de agua = 100 gal/min = 0.223 ft³/seg = 13.37 ft³/min.

ρ = densidad del agua a 118.4 °F = 61.83 lb/ft

$$D_{i \text{ opt}} = 3.9 (0.223)^{0.45} (61.83)^{0.13}$$

$$D_{i \text{ opt}} = 3.394 \text{ in.}$$

NUMERO DE REYNOLDS:

$$Re = \frac{DV\rho}{\mu} = \frac{380\rho L}{D_i\mu} = \frac{(380)(61.83)(13.37)}{(4)(0.568)} = 138 \ 262.98$$

donde:

μ = viscosidad del agua a 118.4 °F = 0.568 cps.

De acuerdo con el Número de Reynolds, se concluye que el flujo es turbulento.

Como el diámetro interior óptimo tiene un valor de 3.394 pulgadas, se compara con dimensiones tabuladas de tubería comercial, y se encuentra que el diámetro interior próximo superior al calculado, tiene un valor de 4.026 pulgadas, que corresponde a un tubo de 4 pulgadas de diámetro nominal, cédula 40.

Por lo tanto, la tubería de distribución de agua deberá tener un diámetro nominal de 4 in, cédula 40 con dos ramificaciones en la parte superior de la torre, de 2 in de diámetro-cédula 40. (10).

Se encontró que el diámetro interior óptimo de la tubería de distribución de agua, tiene un valor de 3.394 in, y debe estandarizarse a los diámetros de tubería comercial. El diámetro interior próximo superior al calculado, tiene un valor de 4.026 pulgadas y corresponde a un tubo de Policloruro de Vinilo (PVC), de 4 pulgadas de diámetro nominal cédula 40.

El área transversal de flujo para este tubo, tiene un valor de 12.73 in², por lo que el área de los orificios de distribución del agua en la plataforma deberá ser igual al área transversal del tubo.

Para perforaciones de 1/2 pulgada de diámetro, el área de cada perforación es 0.196 in².

El número de perforaciones lo dará la división del área transversal de flujo entre el área unitaria de perforación:

$$\text{Número de perforaciones} = \frac{\text{Área transversal de flujo}}{\text{Área de cada perforación}}$$

$$\text{Número de perforaciones} = \frac{12.73}{0.196} = 64.95$$

Con el fin de que haya una adecuada distribución del agua, el número de perforaciones será reducido a 60, dando margen a que se forme una pequeña columna de agua en la plataforma de distribución, correspondiéndole a cada uno de los lados de la torre, 30 perforaciones de 1/2 pulgada de diámetro cada uno.

MEDIDAS ESTANDARIZADAS PARA LA ESTRUCTURA DE LA TORRE

	<u>Pulgadas</u>	<u>Cantidad</u>
Sección "A"	2 × 4 × 46.00	2
Sección "B"	2 × 6 × 57.20	4
Sección "C"	2 × 4 × 84.75	4
Sección "D"	2 × 4 × 128.0	3
Columnas	2 × 6 × 72.00	12

PISO DE LA PLATAFORMA Y DISTRIBUIDOR DEL AGUA.- Consiste de ta
blas de madera ponderosa, con dimensiones de 1 pulgada de espe
sor, 6 pulgadas de ancho y 84.75 pulgadas de largo.

PILETA.- Se construirá de plancha de acero al Carbón recubier-
ta de fibra de vidrio para evitar la corrosión. Sus dimensio-
nes de acuerdo con el manual Monterrey, son placas de acero de
3/16 de espesor y son necesarias para su construcción 3 plan-
chas de acero de 50 × 120 pulgadas.

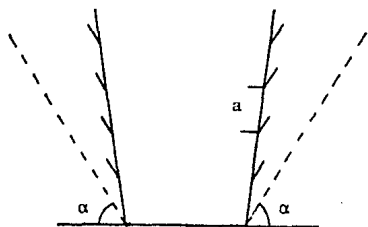
VIGAS DE ASIENTO PARA LA PILETA.- Las vigas de asiento tendrán
dimensiones de 4 × 6 × 118 pulgadas, de acuerdo al manual Mon-
terrey.

APOYOS PARA LAS COLUMNAS.- Se utilizarán 12 vigas de 4 × 6 pul
gadas y 10 pulgadas de largo cada una, las cuales llevan solda-
do en la parte superior un ángulo de lados iguales, de 6 pulga
das de lado, 1/2 pulgada de espesor y 6 pulgadas de longitud.
El acomodo se muestra en los diagramas de construcción.

CORTINA DE ASBESTO.- Consistirá de lámina de asbesto- cemento,
de 120 × 40 pulgadas cada una.

PERSIANAS.- Consistirán de lámina de asbesto de 20 cm de ancho y 90 cm de largo con un espaciado de 20 cm entre sí verticalmente, y con una inclinación de 40° con respecto a la horizontal.

ELIMINADORES DE NIEBLA.- Consistirán de madera de 3 pulgadas de ancho, $3/8$ de pulgada de espesor y 90 cm de largo. Se colocarán con una inclinación de 60° con respecto a la horizontal, como muestra la figura siguiente:



$$a = 1 \frac{1}{2} \text{ in.}$$

$$\alpha = 60^\circ$$

VENTILADOR.- De acuerdo con la Compañía SLAKT VENTILADORES, en México D.F., se utilizará un ventilador de 34 pulgadas de diámetro, que está construido de Aluminio, material que resiste las condiciones críticas de Cerro Prieto.

AGUA DE REPUESTO.- El nivel del agua en la pileta se mantendrá constante, con agua de repuesto suministrada a través de una válvula con flotador, localizada en la pileta de enfriamiento.

VALVULAS DISTRIBUIDORAS DEL AGUA.- Son dos válvulas de hierro fundido, angulares y con recubrimiento interior de hule duro número 10, modelo 2624 de acuerdo con el manual de selección de Válvulas de Diafragma de la compañía ITT Grinnel de México. Las válvulas tienen un diámetro de 2 pulgadas.

MEDIDORES DE FLUJO

Entre los datos más importantes que deben registrarse en la experimentación de Torres de Enfriamiento, se encuentran el flujo de agua que entra y sale de la torre, y el flujo de agua de repuesto, por lo que es necesario instalar medidores de flujo que permitan conocer estos valores. Se recomienda -- instalar placas de orificio para los primeros y un registrador de flujo para el agua de repuesto.

TUBERIA DE SALIDA DEL AGUA

La tubería de salida del agua fría consistirá de tubo de PVC de 4 pulgadas de diámetro.

PURGA Y NIVEL DE LA PILETA

Se instalará una tubería de PVC de 2 pulgadas de diámetro, para mantener el nivel de la piletta, con el fin de evitar los derramamientos. Esta tubería va conectada a la línea instalada para purgas, la cual a su vez, está conectada al drenaje. La tubería para purgas será de PVC de 4 pulgadas de diámetro.

DIAGRAMAS DE CONSTRUCCION

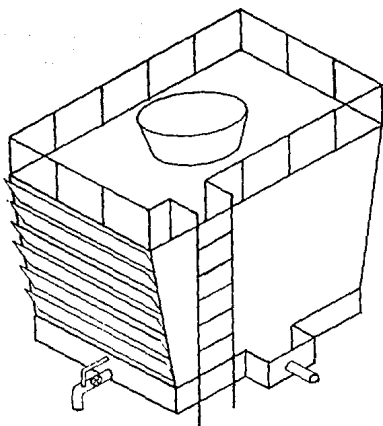


FIG. 3-5

VISTA GENERAL DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO.

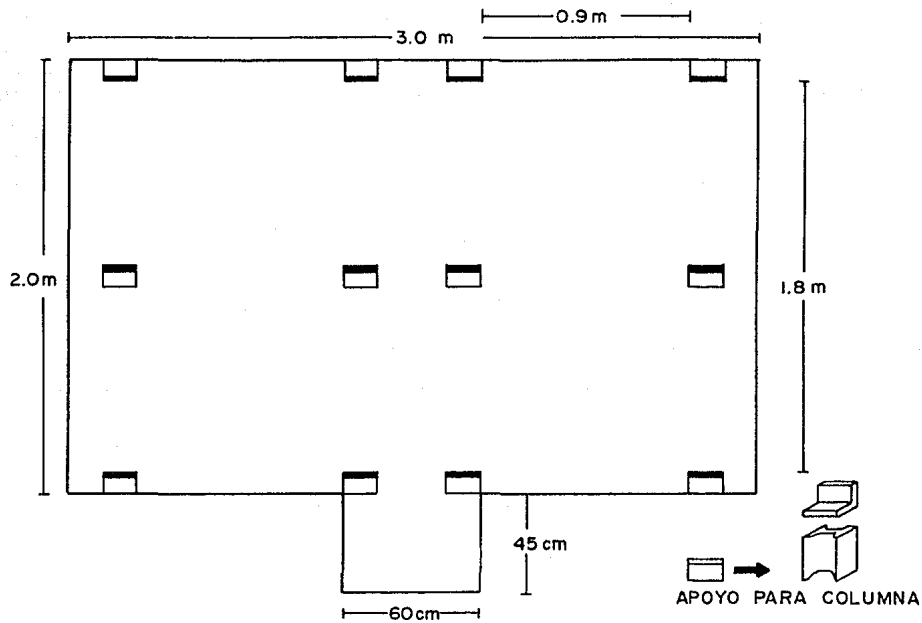


FIG. N.º 3-6 VISTA SUPERIOR DE LA PILETA DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO

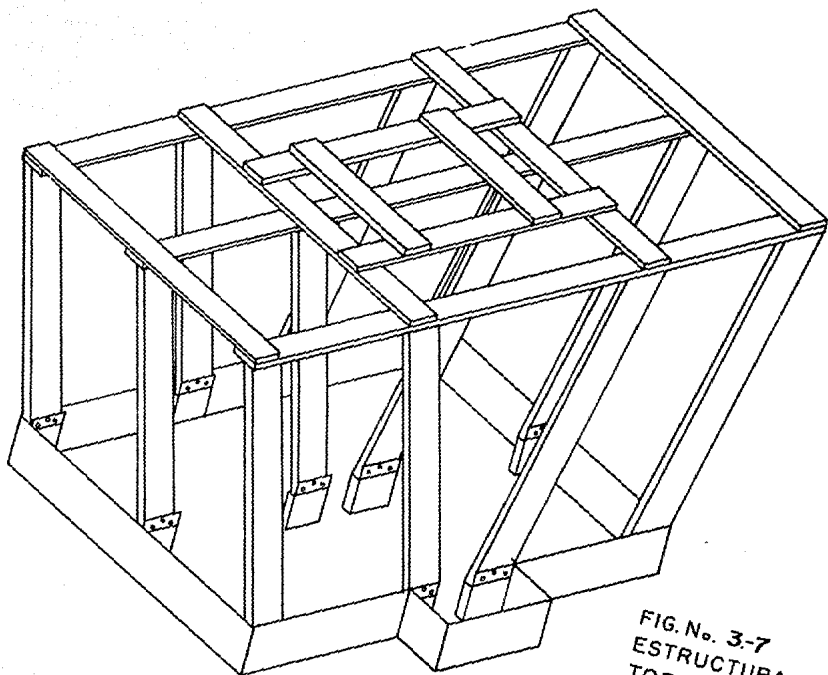
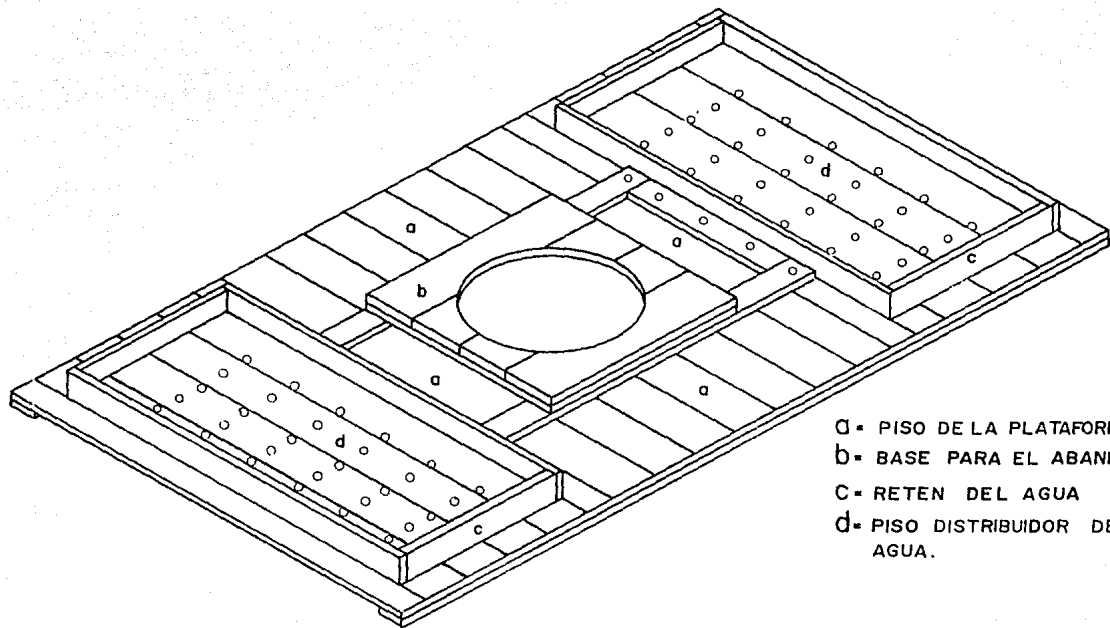


FIG. No. 3-7
ESTRUCTURA DE LA
TORRE DE ENFRIA--
MIENTO.

71



- D = PISO DE LA PLATAFORMA
- b = BASE PARA EL ABANICO.
- C = RETEN DEL AGUA
- d = PISO DISTRIBUIDOR DEL AGUA.

FIG. No. 3-8 PLATAFORMA DE LA TORRE.

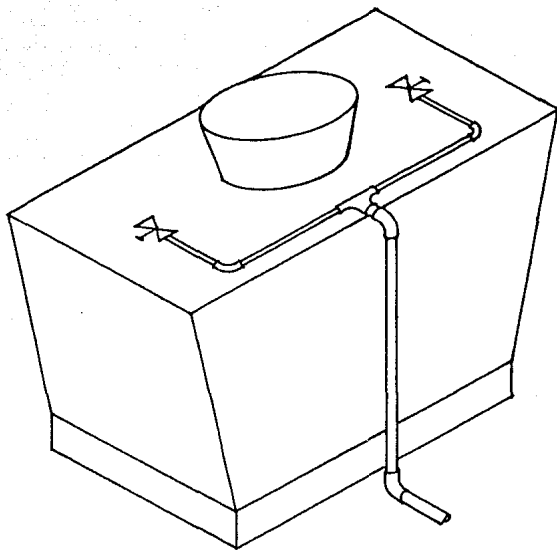


FIG. 3-9

ESQUEMA DE LA TUBERIA DE DISTRIBUCION DEL AGUA.

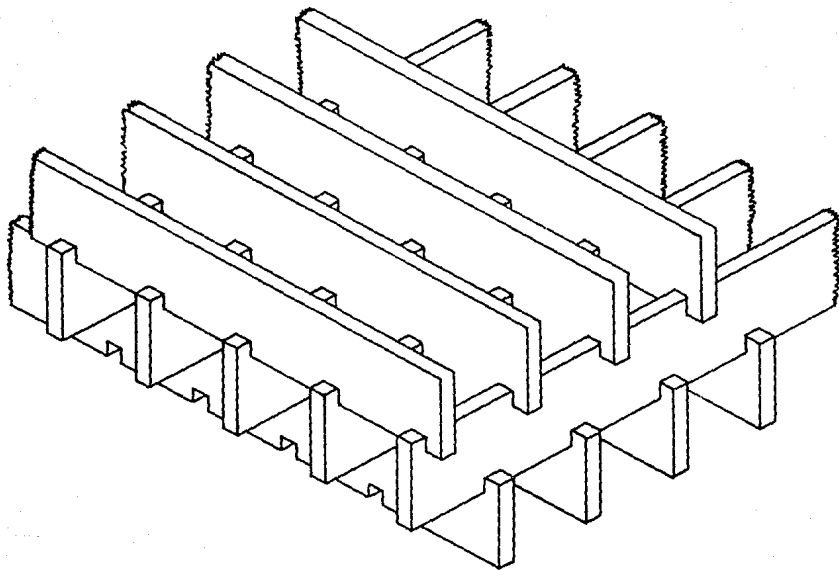


FIG. No. 3-10 DETALLE DEL ACOMODO DEL RELLENO.

CAPITULO 4

ESTIMACION DE COSTOS

Un diseño de equipo cualquiera, debe estar acompañado de un análisis final llamado estimación de costos. La estimación de costos es una porción muy importante de todo proyecto, que ayudará a la empresa a tener una visión más amplia de su disponibilidad para llevar a cabo la culminación del proyecto.

A continuación se presenta la estimación de costos de la torre de enfriamiento calculada en este trabajo, utilizando -- costos de material proporcionados por casas comerciales o por empresas especializadas en material para torres de enfriamiento.

Costo total del material =====	235 685.00	
impuesto 6% (IVA) =====	<u>14 141.10</u>	
	\$249 826.10	
Costo real del material =====	249 826.10	(Cr)
Instalacion del equipo =====	99 930.50	(40% de Cr)
Instrumentación instalada =====	32 477.40	(13% de Cr)
Instalaciones eléctricas =====	12 491.30	(5% de Cr)
Imprevistos =====	<u>24 982.60</u>	(10% de Cr)
	\$419 707.90	

El costo total de la torre, incluyendo material, instalación de equipo y eléctrica, e imprevistos, es de \$419 707.90 - pesos mexicanos. Esta estimación fué llevada a cabo en el mes de Julio de 1983, con una paridad del peso frente al dólar no teamericano, de 150.00 pesos por un dólar. (10).

ESTIMACION DE COSTOS. (madera ponderosa tratada con sales de Cobre)

ARTICULO	DIMENSIONES (pulgadas)	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
Sección A	2 × 4 × 46	2	83.30/ft	638.60
Sección B	2 × 6 × 57.2	4	125.00/ft	2 383.30
Sección C	2 × 4 × 84.75	4	83.30/ft	2 353.20
Sección D	2 × 4 × 128	3	83.30/ft	2 665.60
Columnas	2 × 6 × 72	12	125.00/ft	9 000.00
Barandales frontales del cerco	2 × 1 × 128	4	20.80/ft	887.50
Barandales laterales del cerco	2 × 1 × 85	4	20.80/ft	589.30
Barrotes del cerco	2 × 2 × 40	24	42.00/ft	3 360.00
Barandal de la escalera	2 × 4 × 125	2	83.30/ft	1 735.40
Peldaños	2 × 4 × 24	10	83.30/ft	1 666.00
Retén del agua frontal	6 × 1 × 77	4	62.50/ft	1 604.20
Retén del agua lateral	6 × 1 × 40	4	62.50/ft	833.30
Piso de la plataforma	6 × 1 × 84.75	20	62.50/ft	8 828.10
Soporte del relleno	2 × 6 × 48	6	125.00/ft	3 000.00
Relleno	2 × 3/8 × 71	600	11.50/pza	6 900.00
Relleno	2 × 3/8 × 36	600	5.75/pza	3 450.00
Eliminadores de niebla	3 × 3/8 × 36	200	11.50/pza	2 300.00

Tabla No. 5

ESTIMACION DE COSTOS. (Acero al carbón).

ARTICULO	DIMENSIONES (pulgadas)	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
Lámina negra p/pileta	3/16× 50 × 120	3	6 581.00/pza	19 743.00
Vigas para asiento	4 × 6 × 118	3	506.00/ft	14 927.00
Vigas para apoyo de las columnas	4 × 6 × 10	12	506.00/ft	5 060.00
Angulos para apoyos	6 × 6 × 1/2	12	533.50/ft	3 201.00
(Policloruro de Vinilo-PVC)				
Tubería de distribución de agua	diámetro 4 largo 84	1	207.50/ft	1 452.50
Tubería de distribución de agua	diámetro 2 largo 42	2	121.00/ft	847.00
Codos	diámetro 4	2	1 175.00 c/u	2 350.00
Codos	diámetro 2	2	850.00 c/u	1 700.00
Unión T	diámetro 4	1	1 530.00 c/u	1 530.00
Reducción	4 a 2	2	450.00 c/u	900.00
(Asbesto-Cemento)				
Cortina	120 × 40	8	1 830.00/pza	14 640.00
Persianas	120 × 40	2	1 830.00/pza	3 660.00
(Varios)				
Válvulas	diámetro 2	2	31 740.00/pza	63 480.00
Abanico	diámetro 34	1	50 000.00/pza	50 000.00

COSTO TOTAL DEL MATERIAL = \$235 685.00

CONCLUSIONES.

A continuación se presentan las conclusiones más relevantes del estudio realizado en el presente trabajo.

- Se presenta una metodología para el cálculo de la torre de enfriamiento, la cual se ha demostrado ser razonablemente correcta, debido a que las dimensiones de la torre aquí calculada, se compararon con dimensiones de torres comerciales fabricadas para manejar el mismo flujo de agua y con las mismas condiciones meteorológicas de diseño, dando como resultado una similitud bastante acertada.
- La metodología utilizada puede aplicarse para el cálculo de diferentes tamaños de torres de enfriamiento, o sea que es factible construir torres de diferente capacidad según lo requiera el experimento a realizar.
- Lo anterior nos habilita para el diseño, cálculo y construcción de torres de enfriamiento de tipo experimental donde podamos estudiar el comportamiento de la madera ante productos químicos utilizados o por utilizar en el tratamiento de agua, la duración de la madera al ser sometida a diferentes tipos de recubrimientos con objeto de impedir ataque microbiológico, y probar la efectividad de diferentes bactericidas. Con todo esto podemos pensar que se puede tener un conocimiento más profundo del fenómeno y aportar una solución parcial o total del problema que actualmente ocurre con la mayoría de las torres de enfriamiento, en especial, la de la Planta Geotermo eléctrica Cerro Prieto I.
- La torre está calculada para manejar un flujo de agua de 100 gal/min de agua, con una temperatura de bulbo húmedo de 78.8°F, una temperatura del agua caliente de 118.4°F y la del-

agua fría 89.6°F. Tales condiciones fueron especificadas a las compañías Marley de México, y ECODYNE, empresas especializadas en construcción de torres de enfriamiento, con el fin de conocer las dimensiones y costos de sus torres. Las dimensiones -- son similares y los costos fueron de 340 000.00 y 360 000.00 - pesos mexicanos respectivamente.

- El costo total de la torre que aquí se presenta tiene un valor de 419 707.90 pesos mexicanos. Es muy importante aclarar que las torres comerciales anteriormente citadas no cumplen con -- las características con las que cuenta la torre diseñada en el presente trabajo, ya que ésta estará provista de materiales e instrumentación especiales para que resistan el tipo de agua - que se maneja en Cerro Prieto, lo cual la hace más costosa en cuanto a capital inicial invertido, pero mucho más económica - en durabilidad, ya que las torres comerciales no soportarían - por mucho tiempo estar manejando el tipo de agua de Cerro Prie to.
- Los materiales de los que consta esta torre, son 100% fabricación nacional, lo cual la hace más accesible. El costo fué cal culado en el mes de Julio de 1983, con una paridad del peso me xicano frente al dolar norteamericano de 150.00 pesos por un - dolar.
- Por Último se concluye que es conveniente construir la torre - de enfriamiento, dado que es más económico y además que puede estar localizada en diferentes sitios, ya sea dentro o fuera - de la Planta debido a una de sus principales características, que es una torre móvil gracias al diseño de su pileta, lo cual la hace más versátil que las otras, porque se puede utilizar, -- ya sea como laboratorio en sí, o como parte de un proceso en - cualquier otro proyecto posterior que sea necesaria.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Aguilar Rodríguez Martiniano.
Torres de Enfriamiento,
Diseño Operacion y Mantenimiento.
Instituto de Investigaciones Eléctricas
México, D.F., 1981.
- 2.- Comisión Federal de Electricidad
Central Geotermoelectrica de Cerro Prieto.
Cerro Prieto, B.C., 1982.
- 3.- Hurst, E.D.
Cooling Tower Deterioration... its causes,
sympoms and sugested cures.
NALCO Reprint 85.
Chicago Illinois.
- 4.- Marley Company.
Carta pedido de importación de la torre de
enfriamiento de Cerro Prieto I, 1972.
- 5.- Mc. Cabe, Warren L. and Julian C. Smith.
Operaciones Básicas de Ingeniería Química.
Editorial Reverté,
Barcelona España, p. 705-707, 1978.
- 6.- Megyesy, Eugene F.
Pressure Vessel Handbook.
5a. Edition.
Pressure Vessel Handbook Publishing Inc.
U.S.A., p. 158-161, 1981.

- 7.- Miller, J.D.A.
Microbial Aspects of Metallurgy
Elsevier Publishing Co. Inc.
New York, p. 117-118, 1970.
- 8.- Parker, Harry M.C.
Diseño Simplificado de Estructuras de Madera.
Editorial Limusa.
México, 1978.
- 9.- Perry, Robert H. and Cecil H. Chilton.
Chemical Engineering Handbook.
3a. Edición, Mc. Graw Hill.
U.S.A., 1973.
- 10.- Peters, Max S. and Timmerhaus Klaus D.
Plant Design and Economics for Chemical Engineers,
3a. Edición, Chemical Engineering Series
Mc. Graw Hill, U.S.A., p. 168-176, 381, 1980.
- 11.- Sawistowky H. and Smith H.
Métodos de Cálculos en los Procesos de
Transferencia de Materia,
Editorial Trillas, España, p. 379-398, 1955.
- 12.- Treybal, Robert E.
Mass Transfer Operations.
International Student Edition.
Mc. Graw Hill Book Co, Inc.
Tosho Printing Co., LTD.
Tokyo Japan, p. 166-167, 1955.

APENDICE

Tabla 5

PROMEDIO MENSUAL DE LAS CONDICIONES CLIMATOLOGICAS EN CERRO PRIETO B.C.

		ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO
TBS	°C	12.99	14.84	17.85	21.04	24.97	28.50
	°F	55.37	58.71	64.14	69.88	76.94	83.30
TBH	°C	8.06	9.33	11.94	14.44	17.50	20.55
	°F	46.50	48.80	53.50	58.00	63.50	69.00

		JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
TBS	°C	32.87	31.92	24.57	24.54	17.72	13.23
	°F	91.16	89.46	85.22	76.18	63.90	55.82
TBH	°C	24.33	24.44	29.94	16.94	12.50	8.83
	°F	75.80	76.00	85.89	62.50	54.50	47.90

$$TBS_{\min} = 12.99^{\circ}\text{C} = 55.37^{\circ}\text{F.}$$

$$TBS_{\max} = 32.87^{\circ}\text{C} = 91.16^{\circ}\text{F.}$$

$$TBH_{\min} = 8.06^{\circ}\text{C} = 46.50^{\circ}\text{F.}$$

$$TBH_{\max} = 29.94^{\circ}\text{C} = 87.89^{\circ}\text{F.}$$

TEMPERATURA DE BULBO HUNEDO DE DISEÑO.

$$TBH_{\text{diseño}} = 26^{\circ}\text{C} = 78.8^{\circ}\text{F.}$$

PROBLEMAS DE CORROSION DEBIDO A LAS CARACTERISTICAS DEL AGUA DE ENFRIAMIENTO DE LA GEOTERMoeLECTRICA CERRO PRIETO I.

Los mayores problemas de corrosión en Cerro Prieto se presentan en el sistema de enfriamiento de agua. El agua de enfriamiento es vapor condensado que contiene H_2S , CO_2 , NH_3 , impurezas y bacteria sulfato reductora.

Los problemas de corrosión se han presentado más severamente en las siguientes secciones:

- En los tubos de Aluminio de los intercambiadores de calor -- del sistema de enfriamiento de aceite, presentándose en un alto porcentaje y en el lapso de 15 días. Este problema se controló drenando y secando los tubos, ya que el agua estancada cuando el intercambiador no estaba en operación, aceleraba el crecimiento de bacterias.
- En el condensador barométrico de contacto directo, está construido de acero al carbón recubierto con epóxido en la parte superior y acero inoxidable en la parte inferior. El agua remueve el recubrimiento en algunas áreas y ataca al acero, lo cual no sucede con la sección de acero inoxidable.
- En el canal de concreto que conduce el agua entre el condensador y la torre de enfriamiento, el cual estaba recubierto con alquitrán de hulla, sufrió ataque en la parte superior, degradándose el cemento desalojándose así la arena y la grava. El problema fue resuelto protegiéndolo con cubiertas de PVC.

La combinación de H_2S , vapor y bacterias anaeróbicas, causó la degradación del cemento en la parte no inundada del canal, lo cual no ocurrió debajo de la línea del agua ya que el agua está tratada con bioicidas para controlar las bacterias que oxidan el H_2S a H_2SO_4 , resultando valores bajos de

pH que ayudan a la degradación.

- Durante cuatro años de operación, la madera se degradó ligeramente en la parte alta o zona de distribución y en la zona del nivel del agua. Se le dá mantenimiento con bactericidas y fungicidas en las áreas atacadas.

ANALISIS EFECTUADOS AL AGUA DE ENFRIAMIENTO EN CERRO PRIETO I

Alcalinidad a la Fenolftaleína.

Alcalinidad al Anaranjado de Metilo.

pH.

Conductividad.

Sulfatos.

Cloruros.

Turbidez.

Dureza de Calcio.

Sílice.

Análisis Bacteriológico, conteo en plato. Mantienen menos de 500 000 bacterias por mililitro de muestra.

BACTERICIDAS UTILIZADOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUA DE C.P. I.

Normalmente se utilizan bactericidas no oxidantes como:

Amonio Cuaternario y

Aminas.

También se utilizan Clorofenoles, aunque en menor escala ya que es contaminante.

Cuando el número de bacterias es muy grande se utiliza Cloro, aunque no es recomendable, ya que es un poco oxidante y daña a la madera.

Tabla No. 6

CONDICIONES DEL AGUA DE ENFRIAMIENTO DE CERRO PRIETO I

Análisis	Expresado como	Máximo	Mínimo
Ca	CaCO ₃	5	0
Mg	CaCO ₃	1	0
Na	CaCO ₃	20	5
Fe	Fe	0,3	0.05
NH ₄	NH ₃	600	300
Cl	Cl	16	4
SO ₄	SO ₄	1600	200
NO ₃	NO ₃	30	—
S	S	200	—
Dureza Total	CaCO ₃	6	0
SiO ₂	SiO ₂	3	0.5
PO ₄	PO ₄	—	—
H ₂ S	H ₂ S	10	4
Alcalinidad:			
Fenolftaleína	CaCO ₃	0	0
Anaranjado de Metilo	CaCO ₃	120	140
pH		6,5	7.6
Conductividad	mmhos	3600	700

Temperatura máxima del agua caliente = 52°C.

Temperatura máxima del agua fría = 38°C.

Gases en el vapor: CO₂ 8500 ppm

 H₂S 2000 ppm

 NH₃ 50 ppm

Las condiciones máximas de concentración se dan en la temporada de Verano. El pH y la Alcalinidad se dan en forma inversa. Los derrames o remanentes de las torres varían de 150 toneladas por hora por unidad en el Invierno, hasta casi cero en las horas de máxima temperatura en el Verano.

Tabla No. 7

CONDICIONES DE CRECIMIENTO DE LOS HONGOS

TIPO DE HONGO	EJEMPLOS	CARACTERISTICAS	TEMPERATURA	PH	PROBLEMAS
Filamentous mold	Aspergillus Penicillium Mucor Fusarium Alternaria	Negro, canela, azul Amarillo, verde Blanco, gris Café, canela Rosa, café	32° a 100°F	2 a 8 con 5.6 valor óptimo.	Pudrición superficial de la madera, y lama parecida a la de las bacterias.
Yeast-like	Torula Saccharomyces	Correoso Crece pigmentada	32° a 100°F	2 a 8 con 5.6 valor óptimo.	Lama parecida a la de las bacterias, causa decoloración del agua y de la madera.
Basidiomycetos	Poria Lenzites	Blanco o café	32° a 100°F	2 a 8 con 5.6 valor óptimo.	Pudrición interna de la madera.

Tabla No. 8

CONDICIONES DE CRECIMIENTO DE LAS BACTERIAS

TIPO DE BACTERIA	EJEMPLOS	TEMPERATURA	PH	PROBLEMAS
Aeróbica encapsulada	Aerobacter aerogenes Flavobacterium Proteus vulgaris Pseudomonas aeruginosa Serratia Alcaligenes	68° a 104°F	4 a 8 con 7.4 valor óptimo.	Formación severa de lama.
Aeróbica formadora de esporas	Bacillus mycoides Bacillus subtilis	68° a 104°F	5 a 8	Formación de lama, y producción de esporas difíciles de destruir
Aeróbica Azufre	Thiobacillus thiooxidans	68° a 104°F	0.6 a 6	El Azufre o Sulfuros, son oxidados a Acido Sulfúrico.
Anaeróbica-Sulfato re- ductora	Desulfovibrio desulfu- ricans	68° a 104°F	4 a 8	Crece debajo de lama aeróbica causando co- rrosión. Resulta en - la formación de H S.
Iron	Crenothrix	68° a 104°F	7.4 a 9.5	Precipita Hidróxido Férrico en forma de capas. Forma depósi- tos de lama muy volu- minosos.