



2011

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA TORRE
DE ENFRIAMIENTO PARA LA PLANTA
PILOTO DEL CENTRO DE INGENIERIA Y
DESARROLLO INDUSTRIAL.

T E S I S

Que para Obtener el Título de:

INGENIERO QUIMICO

P r e s e n t a n

Juana Ramírez Rodríguez

Guillermo Huerta Martínez

Director: Dr. Carlos Treviño Torres



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 está 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.

CONTENIDO

	pa9.
CAPITULO I INTRODUCCION.	1
CAPITULO II PLANTEAMIENTO Y SELECCION DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO.	
1.- Generalidades sobre sistemas de enfriamiento.	4
2.- Tipos de equipos industriales más empleados.	7
3.- Bases de diseño.	23
4.- Selección del sistema.	26
5.- Teoría de diseño y operación.	27
CAPITULO III DETERMINACION DEL NUMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA DE MASA.	
1.- Planteamiento experimental.	31
2.- Descripción del prototipo experimental.	35
3.- Descripción del procedimiento experimental.	39
4.- Resultados.	41

	5.- Análisis y discusión de resultados.	48
CAPITULO IV	DISEÑO DE LA TORRE.	
	1.- Escalamiento.	55
	2.- Cálculos:	
	A) Cálculo del número de niveles de empaque.	57
	B) Cálculo del NUT disponible.	59
	C) Cálculo del NUT requerido.	60
	D) Cálculo de la potencia de bombeo requerida.	63
	E) Tratamiento químico del agua.	68
	3.- Diseño mecánico.	
	A) Cálculo de los perfiles estructurales.	78
	B) Detalles de construcción.	81
CAPITULO V	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	91
CAPITULO VI	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.	96
	APENDICE.	

INTRODUCCION

El presente trabajo se desarrolló en el Centro Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) de la Secretaría de Educación Pública. El objetivo principal de este estudio es el de diseñar y construir una torre de enfriamiento, que permita satisfacer las necesidades de agua de enfriamiento para una planta a nivel piloto, que se instalará en dicho centro.

El trabajo se desarrolló siguiendo la política del CIDESI, en el sentido de ser autosuficiente en cuanto al material e infraestructura disponible.

En virtud de lo anterior, un criterio importante para el desarrollo del trabajo, fue el de considerar los recursos materiales con que contaba el centro. Por tal motivo una de las partes integrantes de la torre de enfriamiento, es el empaque, material no convencional, del tipo " Reji- Lux ", asignado por el centro.

Para enfrentar el problema de la caracterización de este material como empaque, fue necesario efectuarla de manera experimental por medio de un prototipo de torre de enfriamiento.

En la fase experimental se encontró una ecuación característica para el tipo de arreglo y empaque utilizado, la cual relaciona el Número de Unidades de Transferencia con los flujos de agua y aire manejados y la altura de empaque.

Para efectuar el diseño se fijaron las dimensiones de la torre de enfriamiento para la planta piloto, de manera que la

sección empacada tuviera la misma relación de área de empaque a volumen de la sección empacada que la del prototipo experimental, para esta torre se calculó el Número de Unidades de transferencia por medio de la ecuación característica encontrada en la fase experimental (NUT disponible). Posteriormente se comprobó este NUT, calculando el NUT requerido con los datos de bases de diseño.

La torre de enfriamiento es una parte integrante del sistema de enfriamiento para la planta piloto, este sistema suministra el agua requerida por los equipos a través de una red de distribución, la cual fue especificada en dimensiones y material para cumplir con este propósito, así mismo fue necesario calcular y especificar el sistema de bombeo requerido.

Para el cálculo de la potencia de bombeo se realizaron dibujos isométricos en base a los planos de elevación y planta, de los sistemas de la planta piloto que requieren del servicio de agua de enfriamiento.

En los sistemas de enfriamiento se requiere de un tratamiento químico del agua, para asegurar un funcionamiento adecuado, por tal motivo se evaluaron las cantidades de reactivos químicos necesarios para el sistema de agua de enfriamiento propuesto.

En lo que respecta a la construcción de la torre de enfriamiento, se presentan los detalles de las partes constituyentes y el cálculo del soporte estructural.

El equipo diseñado, además de proporcionar el Número de Uni-

dades de transferencia requerido, opera en un intervalo de flujos definido por medio de la experimentación y su construcción permite facilidad de mantenimiento, además de ser desmontable.

El trabajo realizado cumple con la política interna del CIDESI, y puede ser la base para futuros estudios técnico-económicos con miras a fabricar este tipo de equipo a un nivel industrial.

CAPITULO II PLANTEAMIENTO Y SELECCION DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO.

Existen diferentes configuraciones en el arreglo de sistemas de enfriamiento. La selección del sistema de enfriamiento es importante, ya que permite la definición del equipo utilizado.

En este capítulo se analizan los sistemas de enfriamiento más comunes, se dan las definiciones requeridas para comprender la terminología usada en el diseño, se presentan las partes constituyentes de una torre de enfriamiento y se analizan las ventajas y desventajas que presentan los diferentes tipos de torre de enfriamiento más empleados en la industria actual.

El análisis que se presenta en este capítulo tiene como fin seleccionar el sistema y el tipo de torre de enfriamiento más adecuado para la planta piloto del CIDESI.

1.-GENERALIDADES SOBRE SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO

Los sistemas de enfriamiento más comunes son:

- A.-Sistema de un paso.
- B.-Sistema abierto con recirculación.
- C.-Sistema cerrado con recirculación.

A continuación se da una breve descripción de cada sistema:

- A.-Sistema de un paso.- En este arreglo el agua es usada solamente una vez y se elimina del sistema, se usa cuando se dispone

de agua en abundancia (ejemplos, cerca del mar o de ríos), hay limitación por contaminación térmica del lugar y solamente interesa el costo de bombeo.

B.-Sistema abierto con recirculación.- En este arreglo se enfría el agua en un equipo atmosférico y se repone el agua evaporada, se usa en lugares donde se dispone de poca agua.

C.-Sistema cerrado con recirculación.- Para este arreglo se usa un medio de enfriamiento distinto al agua, como por ejemplo salmuera, el enfriante caliente se enfría en un sistema adicional y se vuelve a utilizar.

De los sistemas de enfriamiento mencionados, los sistemas de un paso y abierto con recirculación son los más usados. Estos utilizan agua como medio de enfriamiento debido a sus características térmicas adecuadas para la transferencia de calor.

El agua es un recurso escaso y es preferible recircularla y enfriarla para volver a reutilizarla, que desecharla caliente, por esto, los sistemas abiertos con recirculación son la alternativa más viable en los casos donde no se dispone de gran cantidad de agua.

Aunque en los sistemas de un paso es necesario cierto tratamiento para evitar incrustaciones, corrosión y formación de lamas y algas, el grado de tratamiento debe ser mayor para sistemas abiertos con recirculación, ya que los sólidos contenidos se concentran a medida que ocurren pérdidas por evaporación.

Cuando se usa agua como medio de enfriamiento es posible

usar una gran cantidad con un intervalo de temperatura pequeño, o circular poca cantidad con un intervalo de temperatura amplio.

Finalmente es necesario hacer notar que la mayoría de los sistemas de enfriamiento están limitados por las condiciones ambientales existentes en el sitio donde van a operar, por lo que es necesario llevar a cabo el diseño correspondiente de acuerdo a estas condiciones sin dejar de considerar las condiciones de operación requeridas.

2.- TIPOS DE EQUIPOS INDUSTRIALES MAS EMPLEADOS.

Los tipos de equipos más empleados a nivel industrial son las llamadas torres de enfriamiento. Entre las razones por las cuales estos equipos son los más comunes se encuentran: La facilidad de instalación y su relativo bajo costo comparado con un sistema cerrado, un sistema de refrigeración o un enfriamiento con aire.

Con el fin de comprender la terminología usada, en el diseño de torres de enfriamiento se presentan a continuación las siguientes definiciones:

- Temperatura de bulbo seco.- Es la temperatura real del aire medida a las condiciones ambientales.
- Temperatura de bulbo húmedo ambiente.- Es la temperatura en estado estacionario alcanzada por una pequeña cantidad de líquido que se evapora en una gran cantidad de una mezcla vapor - gas no saturada.
- Temperatura de bulbo húmedo de diseño.- Es la temperatura de bulbo húmedo modificada al considerar la recirculación externa del aire húmedo a la torre.
- Acercamiento.- Es la diferencia entre la temperatura del agua fría y la temperatura de bulbo húmedo del aire.
- Intervalo de enfriamiento.- Es la diferencia de temperatura entre el agua caliente y la fría.
- Reposición.- Es el agua necesaria agregada para compensar las pérdidas por evaporación, arrastre y purga.

- Purga.- Es la descarga de agua del sistema para el control de concentración de sales y otras impurezas en la circulación del agua.
- Grupo mecánico de la torre.- Es el conjunto que esta integrado por : Ventilador, aspas, motor, controles, arrancadores, interruptores, coples, vigas por soporte, etc..
- Ciclos de concentración (X) .- Son el número de veces que puede aumentarse la concentración del agua que entra como repuesto y cuyo valor no debe ser muy grande para evitar depósitos en las tuberías como sus correspondientes taponamientos.

Entonces, resumiendo se tendrá que :

$$X = \frac{\text{Cantidad de sólidos en agua de circulación.}}{\text{Cantidad de sólidos en agua de repuesto.}}$$

- Area específica.- Es la relación del área entre el volumen, en la cual se efectua la transferencia de masa.
- Relleno o empaque.- Es el material que proporciona el área interfacial para llevar a cabo la transferencia de masa, el material de construcción puede ser madera, cerámica, plástico etc..
- Entalpía de saturación.- Es el contenido calorífico de una mezcla gas - vapor saturada.

Una torre de enfriamiento es una columna con una sección empacada, en la cual se lleva a cabo el enfriamiento del agua por medio de aire, en virtud de una transferencia simultanea de calor y masa.

Las torres de enfriamiento estan constituidas principalmente por las siguientes partes, figura 1 , de las cuales se da una breve descripción.

A.-Basin o carcamo.- Es el recipiente en el cual cae el agua directamente del empaque, se fabrica generalmente de concreto reforzado con varilla de acero. Debe tener un desnivel hacia donde se encuentran las bombas de circulación.

B.-Distribuidores de agua.-Generalmente son de dos tipos:

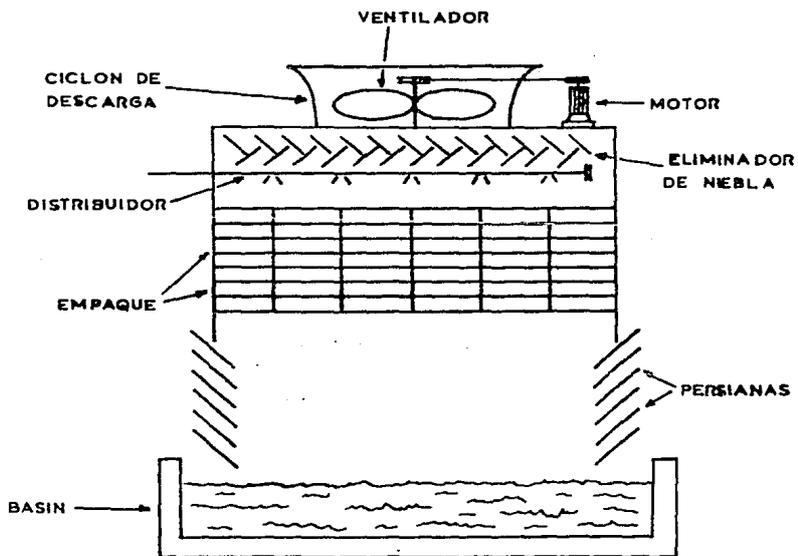
a).-Por gravedad, cuando se tiene una placa o plancha con bordes en forma de caja en cuyo fondo se hacen perforaciones de igual diámetro. Esta placa generalmente se fabrica de madera .

b).-Por presión, cuando se tiene una tubería con perforaciones a la cual se instalan espreas para inyección forzada de agua , estas espreas son generalmente de acero inoxidable.

C.-Ventiladores, motores y ciclones de descarga.- Los ventiladores son el elemento mecánico que proporciona el flujo de aire requerido para llevar a cabo el enfriamiento, casi siempre son fabricados de acero forjado con aspas de poliester reforzado con fibra de vidrio, en algunos casos , el ventilador y su

FIG. 1

COMPONENTES DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO.



grupo mecánico se fabrican de fierro galvanizado en caliente con aspas de aluminio.

Los motores son el elemento mecánico que proporciona la potencia requerida para el movimiento del ventilador, estos deben de incluir una protección contra humedad.

Los ciclones de descarga, o anillos de los ventiladores tienen como finalidad propiciar la salida del aire caliente, generalmente se fabrica del mismo material que constituyen las paredes de la torre.

D.-Eliminador de niebla.- La función del eliminador de niebla es la de separar el aire del agua contenida, consiste generalmente de una sección empacada que provoque cambios bruscos de dirección.

E.-Persianas.- Su función es la de propiciar la entrada de aire a la torre e impedir la salida del agua, en algunos casos son de ángulo de inclinación variable y se construyen generalmente del mismo material que las paredes.

F.-Relleno de la torre.- Es el material con el cual esta empacada la torre y cuya finalidad es proporcionar el área necesaria para llevar a cabo el enfriamiento.

El tipo de empaque determina uno de los factores principales en el diseño de la torre, el cual es el coeficiente de transferencia de masa y es característico de cada tipo de empaque y de los flujos manejados.

En una torre de enfriamiento es necesario poner en contacto al aire y al agua, para efectuar el enfriamiento del agua, a través del área empacada. Dependiendo de la forma en que se suministre el aire, las torres de enfriamiento se clasifican en dos tipos:

- Torres de tiro natural.
- Torres de tiro mecánico.

Las torres de tiro natural dependen de las condiciones climatológicas, el aire entra en la parte inferior y sube por convección natural a través del empaque efectuando el contacto con el agua que cae por gravedad hacia la parte inferior.

Las condiciones de las que depende el funcionamiento de este tipo de torres son : La humedad y temperatura atmosférica, velocidad y dirección de vientos dominantes. Estas torres son relativamente largas.

Las Torres de Tiro Mecánico se clasifican en dos tipos; de Tiro Forzado y Tiro Inducido. En las primeras el aire es forzado a pasar a través del empaque por un ventilador colocado en la base de la torre. Debido a la relativa baja velocidad de salida del aire, hay una tendencia para descargar el aire caliente recirculándolo hasta la entrada del ventilador, disminuyendo con esto la eficiencia de la torre.

Las torres de tiro inducido utilizan un ventilador en la parte superior, para jalar el aire desde la base de la torre a través del empaque hacia la descarga del ventilador. En

este tipo de torre de tiro mecánico, el aire caliente húmedo descarga en forma vertical hacia la atmósfera, con una cierta velocidad para eliminar la posibilidad de recirculación de este aire hacia la base de la torre. Este aire húmedo es corrosivo para las partes del ventilador por lo que este requiere protección de recubrimientos plásticos u hojas de metales especiales y motores sellados.

En general, para un mismo requerimiento, el tamaño de una torre, tanto de Tiro Forzado como de Tiro Inducido son considerablemente menores que para una Atmosférica o de Tiro Natural, debido a su más alta velocidad de transferencia de calor y masa.

Se presentan a continuación las ventajas y desventajas de cada tipo de torre:

A) Torre Atmosférica de Tiro Natural (Fig.2).

En este tipo de torre, el contacto entre las fases se efectúa utilizando un flujo a contracorriente, el aire entra a través de las persianas mientras el agua cae por gravedad a través del empaque.

a.- Ventajas

- 1.-Ofrece bajos costos de mantenimiento.
- 2.-Ofrece costos de operación muy bajos.

b.- Desventajas

- 1.-Su costo inicial por construcción e instalación son altos, motivo por el cual, no se usa en la actualidad .
- 2.-Su altura es grande.

3.-Su intervalo de enfriamiento se afecta bastante por las condiciones ambientales del lugar, en comparación con las torres de tiro mecánico.

B) Torre Atmosférica de Tiro Natural con Espreas (Fig.3).

En este tipo de torres el contacto entre las fases se efectúa utilizando flujo cruzado, ya que el agua cae en forma vertical y el aire entra en dirección perpendicular al agua a través de las persianas, no cuenta con un distribuidor por gravedad para el agua, sino que esta es atomizada por medio de espreas aumentando de esta manera el área de transferencia ya que no cuenta con empaque para proporcionarla.

a.- Ventajas

- 1.-Pueden cambiar la dirección del viento a base de mamparas en forma de persianas.
- 2.-Requieren de muy poco mantenimiento y revisión preventiva .
- 3.-Se usan cuando se manejan flujos muy pequeños.
- 4.-No consumen energía eléctrica por ventiladores.
- 5.-Cuando operan a bajas temperaturas , puede considerarse que el acercamiento > Intervalo.

b.- Desventajas

- 1.-Son angostas pero de gran altura.

TIPO DE EQUIPOS INDUSTRIALES MAS EMPLEADOS PARA LOS SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO

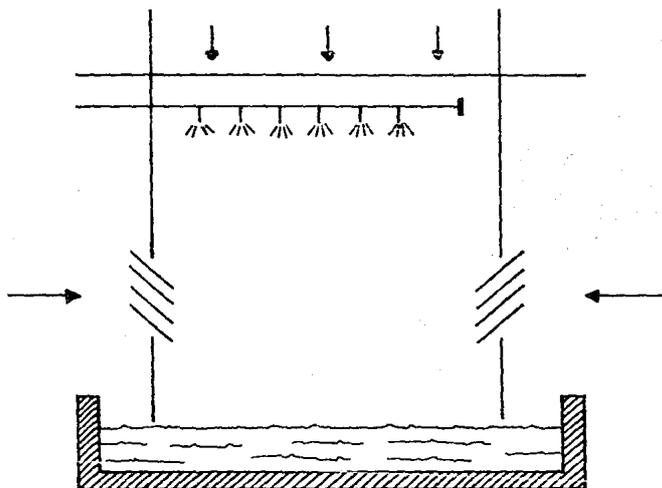


FIG. 2 TORRE ATMOSFERICA DE TIRO NATURAL .

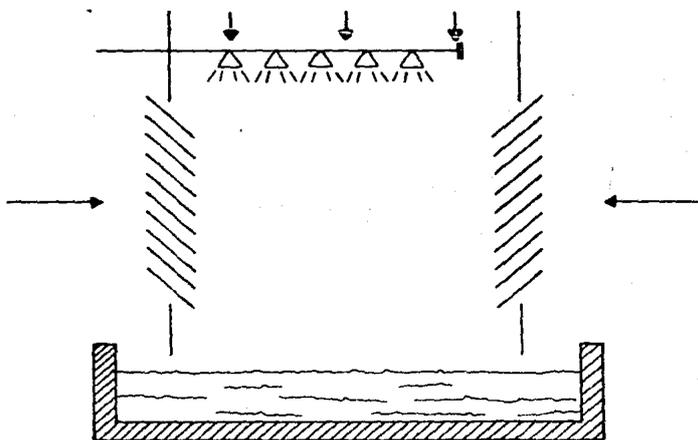


FIG. 3 TORRE DE TIRO NATURAL CON ESPREAS PARA ATOMIZACION .

- 2.-Tienen pérdidas por arrastre de viento.
- 3.-Hay problemas de operación con las espreas.
- 4.-No tienen relleno alguno, lo cual afecta la eficiencia.
- 5.-Requiere de una colocación, donde se aproveche mejor la dirección de vientos dominantes.
- 6.-Requiere de un alto consumo de energía eléctrica por parte de las bombas para agua de circulación.

C) Torre Hiperbólica o Tipo Chimenea (Fig. 4).

En este tipo de torre, el contacto entre las fases se lleva a efecto en flujo a contracorriente a través del empaque.

Posee una chimenea de altura considerable, que hace aprovechar la diferencia de densidades, permitiendo adquirir al aire mayor velocidad y de esta manera, por convección natural el aire sube a través del empaque para efectuar la transferencia.

a.- Ventajas

- 1.- Sus pérdidas por arrastre son pequeñas. No tienen equipo mecánico.
- 2.- El cascaron es de concreto , su base es de madera o de plástico y se rellena con madera tratada de pino (material convencional).

b.- Desventajas

- 1.- Su inversión inicial es muy alta.
- 2.- No es flexible en su operación, puesto que opera a base de una diferencia de densidades.
- 3.- Solo tienen máxima eficiencia en invierno o cuando se instalan en lugares fríos o húmedos.
- 4.- Solo se emplean cuando se tiene un gasto de circulación mayor de 100000 gpm, de lo contrario son antieconómicas.
- 5.- Ocupan una gran extensión de terreno debido al gran diámetro requerido.

D) Torre de Tiro Forzado (Fig. 5).

En este tipo de torre el ventilador esta colocado abajo, en la parte lateral de la torre forzando el aire a pasar a través del empaque, efectuandose el contacto entre las fases en flujo a contracorriente.

a.- Ventajas

- 1.- El ventilador esta antes del relleno metiendo aire a la torre, por lo que no se requiere protección en sus partes constituyentes.
- 2.- Usan motores abiertos sin protección contra calor y/o humedad.
- 3.- Requieren de menos área efectiva pa-

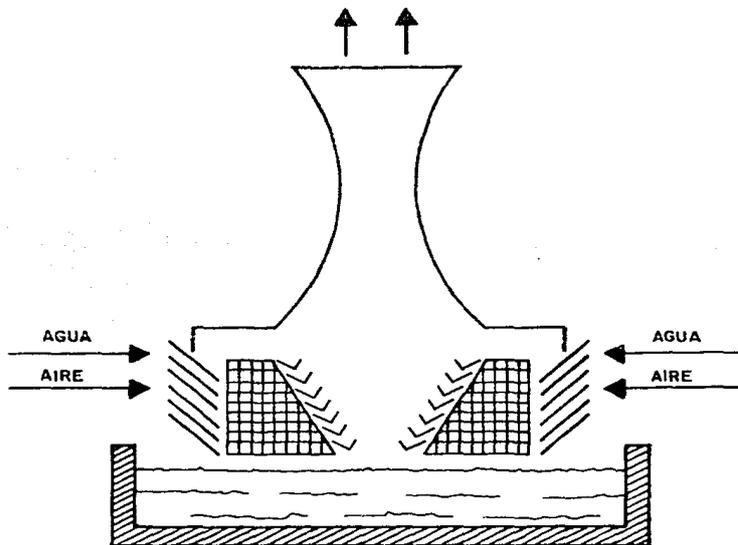


FIG. 4 TORRE HIPERBOLICA DE TIRO NATURAL .

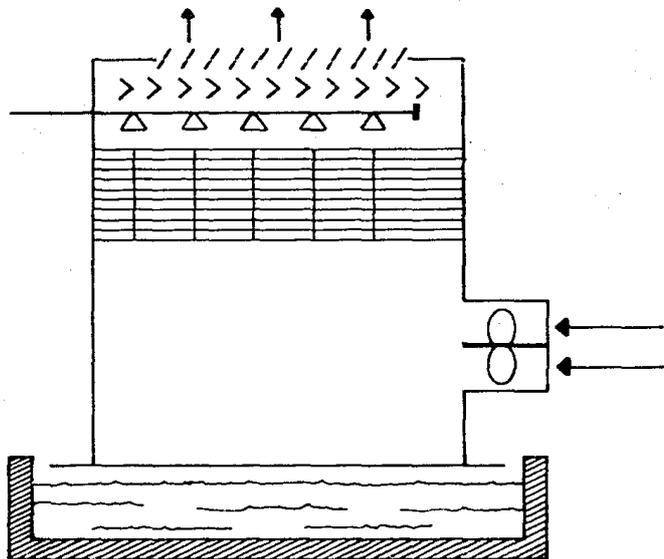


FIG. 5 TORRE DE TIRO FORZADO A CONTRACORRIENTE .

ra enfriamiento, que la torre atmosférica de tiro natural.

4.- Presentan menos pérdidas por arrastre de viento.

b.- Desventajas

1.- Requieren de mucha altura.

2.- Tienen consumo de energía eléctrica en ventiladores y por bombeo del agua.

3.- Ofrecen menos intervalo y acercamiento.

4.- Tienen recirculación de vapores y aire caliente.

5.- Presentan canalizaciones del aire en lugar de tener un reparto uniforme.

6.- Su eficiencia varía irregularmente por las desventajas enunciadas anteriormente.

E) Torre de Tiro Inducido con Flujo a Contracorriente (Fig.6).

En este equipo el ventilador esta colocado en la parte superior de la torre, succionando el aire desde la parte inferior de la torre y pasandolo a través del empaque, efectuando el contacto de las fases en flujo a contracorriente.

a.- Ventajas

1.- El ventilador se encuentra después del relleno, sacando el aire caliente

te hacia arriba, con mínima recirculación.

- 2.- Presenta pocas pérdidas por arrastre.
- 3.- Area efectiva menor que las de flujo cruzado.
- 4.- Las pérdidas por arrastre son pequeñas.

b.- Desventajas

- 1.- Su altura es mayor que la de una torre de tipo cruzado.
- 2.- Sus costos de operación también son mayores que la de una torre atmosférica de tiro natural

F) Torre de Tiro Inducido con Flujo Cruzado (Fig. 7).

En este tipo de torre el agua cae por el empaque mientras el aire entra en dirección perpendicular al empaque, efectuandose el contacto de las fases en flujo cruzado.

a.- Ventajas

- 1.- El ventilador esta después del relleno, saca el aire caliente de la torre sin recircularlo.
- 2.- Tiene una altura menor que la de contracorriente.
- 3.- Ofrece menor costo por consumo de energía en ventiladores y bombas.
- 4.- Sirven para un gasto mayor de agua

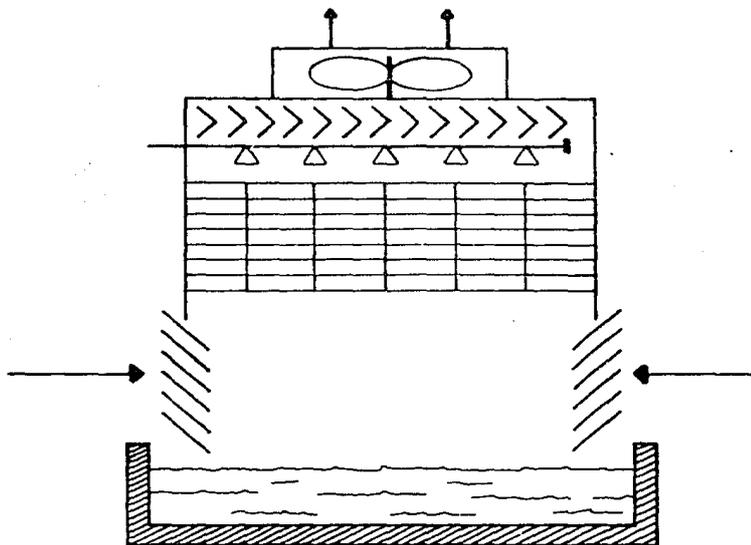


FIG. 6 TORRE DE TIRO INDUCIDO A CONTRACORRIENTE.

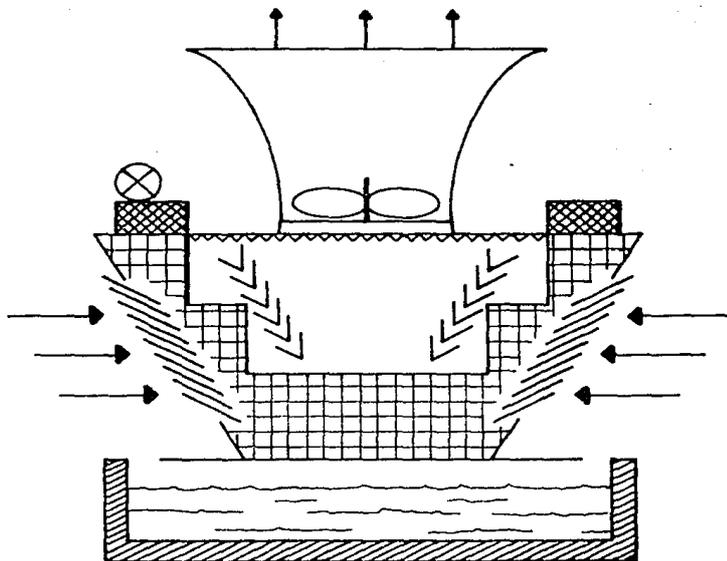


FIG. 7 TORRE DE TIRO INDUCIDO DE FLUJO CRUZADO.

de circulación, con respecto a la torre atmosférica de tiro natural con espreas, hasta 10,000 gpm como máximo.

5.- Ofrecen un acercamiento mayor.

b.- Desventajas

1.- Requiere de más área de exposición.

2.- Tienen más pérdidas por arrastre.

3.- Ocupan mayor área que una torre de flujo a contracorriente, aunque sus eficiencias son casi iguales para cualquier capacidad.

3.- BASES DE DISEÑO.

Las bases de diseño que se presentan a continuación se fijaron de acuerdo al lugar donde se localizará la planta piloto y las necesidades de los procesos.

Localización : Azcapotzalco D.F.

Lugar : Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial.

Generalidades :

1.-Función del Sistema.

Se requiere construir un sistema para enfriamiento del agua de servicio de la planta piloto que cumpla con las siguientes características:

- a) Enfriar un flujo de agua de servicio de 30 GPM a 35 GPM desde 45 ° C a 30 ° C.
- b) Se dispone como máximo un flujo de 1.5 GPM de agua de reposición.

2.-Capacidad y Factor de Servicio.

Dado que se trata de un servicio auxiliar indispensable en todos los sistemas de planta piloto, operará 8 hrs. por día, 5 días a la semana y 15 días para mantenimiento (cada 365 días.)

8 hrs/día 251 días/año = 2008 hrs/año

Capacidad: normal - máxima
30 GPM 35 GPM

3.-Especificación de Entrada:

Material	Edo. Físico	Humedad Kg H ₂ O/Kg A.S.	Tem. °C	Densidad g/cc
agua	liq.		45	0.982
aire	gas	0.033	21.5	0.0011

4.-Especificación de Salida:

Material	Edo. Físico	Humedad Kg H ₂ O/Kg A.S.	Tem. °C	Densidad g/cc
agua	liq.		30	0.996
aire	gas	-	-	-

5.-Especificación de Servicios Auxiliares:

Electricidad:

Volts	Fases	Ciclos
220-440	3	60

6.-Localización del Sistema

Azcapotzalco ,D.F. CIDESI

7.-Datos Climatológicos

	Max.aprox.	Diseño
Temperatura	23 °C	21.5°C
Temperatura de Bulbo Húmedo	12 °C	13 °C

	Max.aprox.	Diseño.
Humedad Relativa	61 %	
Media Anual	59 %	

Presión Barométrica 586 mm Hg.

Velocidad del viento:	Media	19.1	m/s.
	Máxima	30.0	m/s.
	Mínima	10.0	m/s.

Dirección del viento: Norte.

8.-Carga Térmica a Remover.

118 859 Kcal/Hr.

4.- SELECCION DEL SISTEMA.

La selección del sistema de enfriamiento requerido en la planta piloto de CIDESI se efectuó tomando en consideración:

A).-Las características de operación que presentan los diferentes tipos de equipos descritos anteriormente.

B).-La disponibilidad de algunos materiales para la construcción de la torre.

El material de que se dispone es un ventilador convencional de tipo axial con cuatro aspas de aluminio fundido de 60 cm de diámetro. El motor que transmitirá la potencia a este ventilador tiene las siguientes características:

1/4 HP.	60 Hertz.	5.3 Amp.
1750 RPH.	Modelo 2C1.	Tamaño NEMA 56.

Además se dispone de rejilla de plástico, cuyas características permiten su uso como material de empaque para la torre.

Debido a la necesidad de reutilizar el agua de enfriamiento y a la disponibilidad del material antes mencionado así como a la relativa facilidad de construcción de la torre, se eligió para este sistema de enfriamiento un sistema abierto con recirculación y una torre de enfriamiento de tiro forzado.

Partiendo de esta selección se definió el siguiente aspecto de instalación:

El equipo estará situado en la azotea del edificio para aprovechar las corrientes naturales de aire, las cuales disminuyen la posibilidad de recirculación de aire, lo cual disminuye la eficiencia.

5.- TEORIA DE DISEÑO Y OPERACION.

En el diseño de torres de enfriamiento una parte substancial es la determinación de la altura de la sección empacada y el Número de Unidades de Transferencia de Masa, el cual es una medida de la dificultad para efectuar el enfriamiento.

El procedimiento para la determinación del Número de Unidades de Transferencia (NUT) utilizado en este trabajo esta basado en el método de Merkel (Ref. 7), el cual es basicamente gráfico, como se muestra en la figura 8.

En la figura 8, se representan las líneas de operación (de un equipo dado) y de equilibrio del sistema aire-agua a una cierta presión y se muestran los puntos de importancia para el diseño, los cuales son los siguientes:

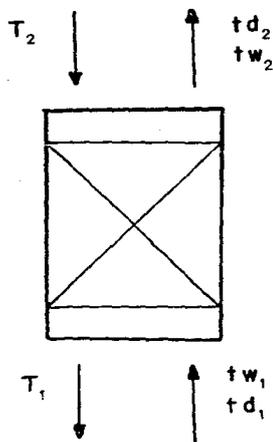
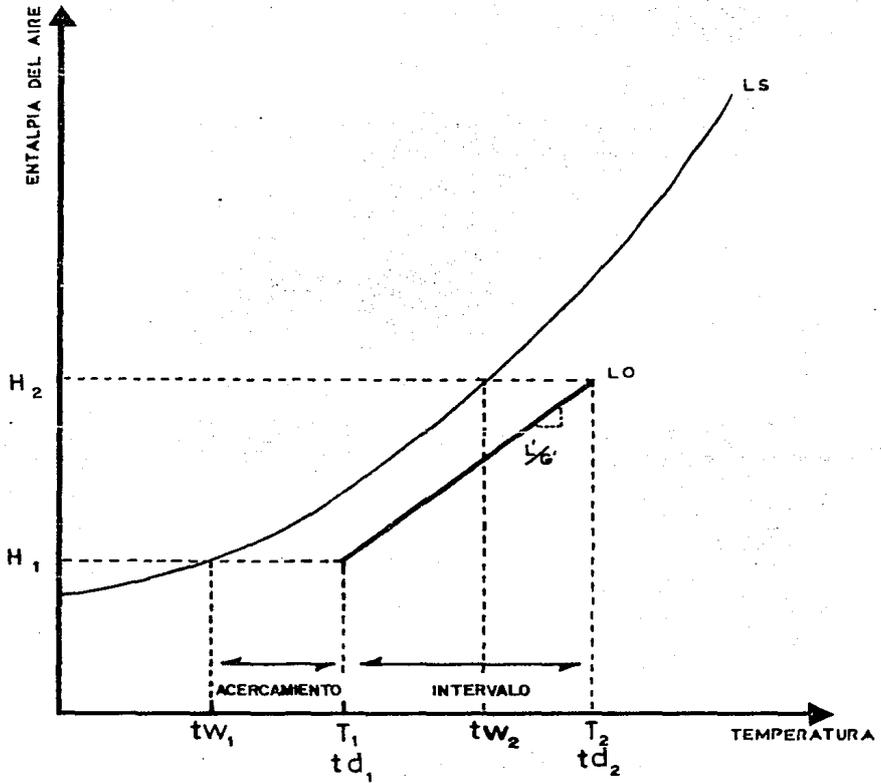


FIG. 8

METODO DE MERKEL



tw_2, tw_1 = Temperatura de bulbo húmedo del aire a la salida y a la entrada de la torre.

td_2, td_1 = Temperatura de bulbo seco del aire a la salida y a la entrada de la torre.

T_2, T_1 = Temperatura del agua caliente, temperatura del agua fría.

H_2, H_1 = Entalpía del aire a la salida y a la entrada.

LS = Línea de saturación.

LO = Línea de operación.

(L'/G') = Pendiente de la línea de operación.

L' = Gasto másico del agua de circulación.

G' = Gasto másico del aire atmosférico.

El procedimiento para la determinación del NUT es el siguiente:

1.- En un plano de coordenadas.

Entalpía del aire = f (Temperatura del agua). Se grafican las líneas de saturación y operación a una presión definida.

2.- Se obtiene la diferencia de entalpías como, $H' - H$.

3.- Se obtiene el inverso de la función anterior.

4.- Se grafica $1/H'-H = f(T)$.

5.- Se obtiene el área bajo esta curva.

Este procedimiento describe la solución de la siguiente ecuación:

$$NUT = \frac{Kya Z}{L'} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{H'-H} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

H' = Entalpía del aire saturado a la temperatura del agua, Kcal/Kg.

H = Entalpía del aire, Kcal/Kg.

T_2 = Temperatura del agua a la entrada, °C.

T_1 = Temperatura del agua a la salida, °C.

NUT = Número de Unidades de Transferencia.

Kya = Coeficiente volumétrico de transferencia de masa, $\text{Kg/m}^3 \text{s}$

Z = Altura de la sección empacada, m.

L' = Flujo másico del líquido / área transversal, $\text{Kg/m}^2 \text{s}$.

El NUT es característico de cada tipo de torre y se puede observar su dependencia con respecto a altura empacada, flujo de agua manejado y coeficiente de transferencia de masa.

Este método, ligado al de Kelly y Swenson (Ref. 17) será utilizado para el diseño de la torre de enfriamiento requerida en este sistema.

CAPITULO III

DETERMINACION DEL NUMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA DE MASA.

En este capítulo se muestra la forma en que se obtuvieron correlaciones experimentales las cuales permiten obtener el NUT en función de los flujos manejados y arreglo de empaque, como variable para el diseño de la torre, fue necesario efectuarlo de manera experimental debido a la falta de información acerca de datos de transferencia de calor y masa para el material que se usará como empaque.

1.- PLANTEAMIENTO EXPERIMENTAL.

Para la elección del tipo de empaque usado en esta torre, se consideraron dos tipos de material: Tarimas de madera tratada (empaque convencional) y rejillas de tipo "reji-lux", de los cuales se eligió la rejilla debido a la disponibilidad de este material en el centro.

En este material se encontraron características similares al empaque desarrollado por Fluor Corporation Ltd. marca registrada Poly-Grid (Ref. 8).

El empaque de la referencia posee las siguientes características:

- 1.- Alto coeficiente de transferencia de calor y masa.
- 2.- Baja caída de presión.
- 3.- Fácil instalación.
- 4.- Bajo peso.

5.- Estructura química inerte para enfriamiento de agua.

Las cuales lo hacen adecuado como material de empaque para utilizarlo en torres de enfriamiento.

El procedimiento experimental efectuado en el presente trabajo, esta fundamentado en la investigación realizada por Kelly y Swenson (Ref.17) para diferentes arreglos de empaques convencionales de torres de enfriamiento. Estos investigadores analizaron los efectos de la variación de la relación líquido/gas (L/G) sobre el NUT y la caída de presión dentro de la torre.

El sistema experimental utilizado por Kelly y Swenson consistió de una torre de enfriamiento de tamaño industrial (altura de 15 m., con una área de sección transversal de 10 m.^2).

Las condiciones y equipo operativo utilizadas en ese estudio se mencionan a continuación:

El flujo de aire fue medido por medio de una tobera de flujo y su temperatura a la entrada de la torre, fue controlada por medio de un calentador, el cual se localizó en el ducto a la entrada del aire.

El sistema de bombeo succiona directamente del basin y circula el agua a través de intercambiadores de calor (con vapor como fluido caliente). El flujo del agua fue medido por medio de una placa de orificio y la temperatura fue medida y controlada a través de termopares. El agua de reposición para la torre fue introducida al sistema en la succión de la bomba y su temperatura fue medida y controlada por medio de termopares.

Los valores calculados de $K_y a V/L'$ por Kelly y Swenson fue-

ron evaluados para una presión barométrica total de 29 in Hg.

Para la determinación de los efectos terminales se graficó $Kya V / L' = f$ (número de tarimas) y se extrapoló hasta una altura de cero tarimas.

Los efectos terminales resultaron ser de pequeño orden de magnitud, aproximadamente 0.07 NUT para todos los tipos de tarimas estudiados.

Los resultados obtenidos por Kelly y Swenson con respecto al funcionamiento de estos tipos de tarimas estudiadas puede ser expresado por la siguiente ecuación:

$$Kya V / L' = 0.07 + AN (L'/G')^{-n} \quad (\text{Ec. 2})$$

La cual expresa el factor característico de la torre en función del número de tarimas, de la relación aire-agua y de las constantes "A" y "n" de cada tipo de tarima.

En el presente trabajo el objetivo de la experimentación realizada fue el de encontrar de manera similar a la investigación de la referencia anterior, una ecuación que permita el escalamiento para el diseño de la torre.

Para realizar la experimentación se construyó un prototipo de una torre de enfriamiento de tiro forzado y para observar los efectos de pared que pudieran presentarse se eligió como material acrílico transparente.

El basín lo constituyó una cuba hidroneumática.

El medio de calentamiento, un calentador de inmersión.

EL sistema de bombeo una bomba peristáltica de velocidad variable.

El suministro de aire lo proporcionó un ventilador de baja capacidad.

En este caso se procedió en primera instancia a obtener repetibilidad de datos experimentales, después se variaron la altura del empaque y el flujo de agua manejado, esto fue con el fin de obtener diferentes valores de la relación líquido/gas y poder correlacionarlo con el NUT experimental correspondiente, para obtener una ecuación característica de escalamiento que proporcione el NUT en función de la relación líquido/gas.

Las variables manejadas fueron:

A).- Variables independientes:

La temperatura de entrada del agua a la torre.

El flujo de agua.

La altura de la sección empacada.

B).- Las variables dependientes fueron:

La temperatura de salida del agua.

Las temperaturas de bulbo seco y húmedo del aire a la salida.

Dos variables intrínsecas del experimento que no estuvieron controladas, pero si fueron medibles, son las temperaturas de bulbo seco y húmedo del aire a la entrada de la torre.

2.- DESCRIPCION DEL PROTOTIPO EXPERIMENTAL.

Para llevar a cabo la fase experimental se construyó un prototipo de una torre de enfriamiento con material disponible en el centro, el cual fue mejorado en sus detalles a través de la experimentación.

Las características importantes de las partes constituyentes del prototipo se muestran en la figura 9 y a continuación se da una breve descripción de cada componente.

Cuerpo de la Torre (6).- Constituido por módulos desmontables de acrílico transparente de 3 mm de espesor y sección cuadrangular de 16 cm por lado con capacidad máxima para 1m de empaque.

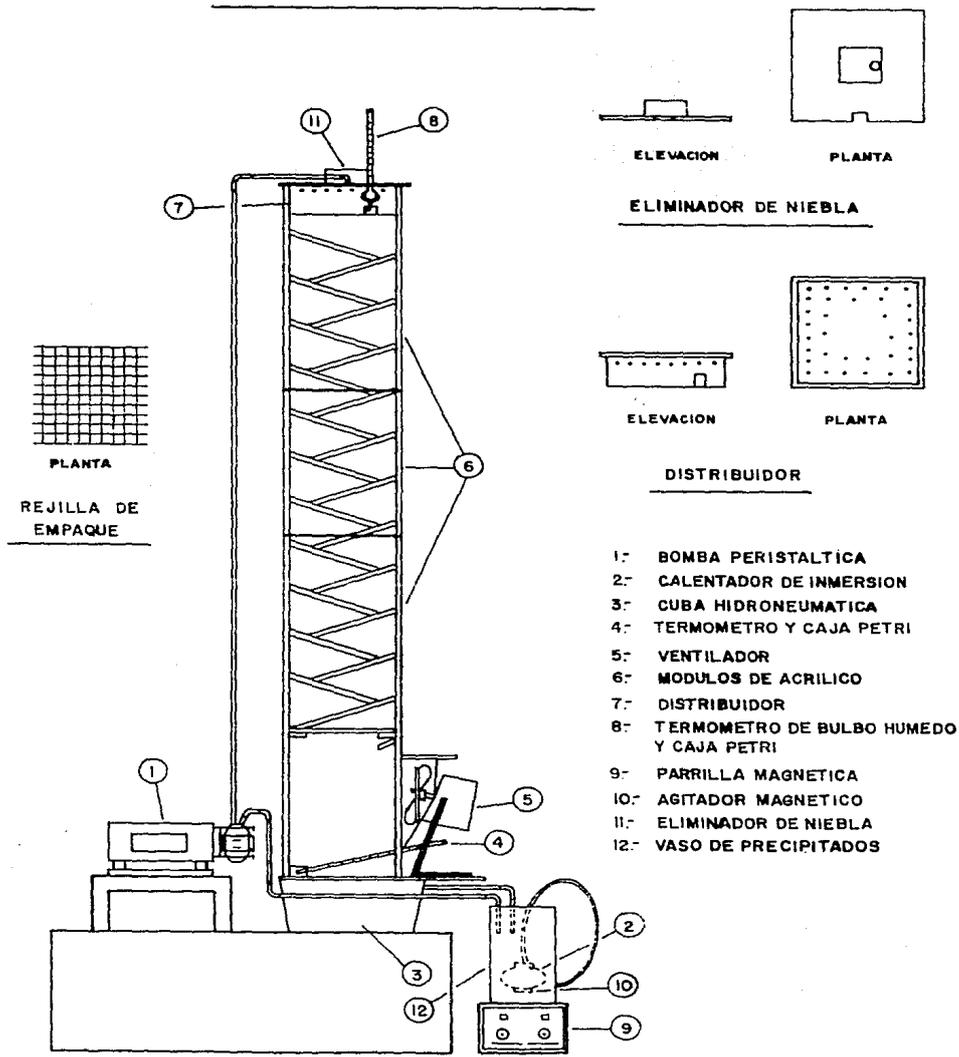
Charola distribuidora (7).- De acrílico transparente con capacidad para manejar 25 ml/s.

Ventilador (5).- Marca IEM.
Modelo V166-T.
V/A/H ; 127/106/60.

Bomba Peristáltica (1).- Marca Master Flex Cole Palmer.
Modelo 7015-20.
RPM 6-600.

FIG. 9

PROTOTIPO EXPERIMENTAL



- 1- BOMBA PERISTALTICA
- 2- CALENTADOR DE INMERSION
- 3- CUBA HIDRONEUMATICA
- 4- TERMOMETRO Y CAJA PETRI
- 5- VENTILADOR
- 6- MODULOS DE ACRILICO
- 7- DISTRIBUIDOR
- 8- TERMOMETRO DE BULBO HUMEDO Y CAJA PETRI
- 9- PARRILLA MAGNETICA
- 10- AGITADOR MAGNETICO
- 11- ELIMINADOR DE NIEBLA
- 12- VASO DE PRECIPITADOS

Calentador de Inmersión (2).-	Marca Orto Electronic. V/A/H ; 125/20/60.
Termómetros (4 y 8).-	Columna de Mercurio. Rangos: -10 - 50 ° C.
Psicrómetro.-	Marca Taylor. Relleno de Mercurio.
Cuba Hidroneumática (3).-	De acero inoxidable. Capacidad 4 lts.
Cajas Petri (4).-	De porcelana. Diámetro 4 cm.
Mangueras de Caucho.-	Marca Cole Palmer. Diámetros: Interior 0.79 cm. Exterior 1.11 cm.
Rejillas de Empaque.-	Tipo Reji-Lux. Dimensiones: Ancho 14.4 cm. Largo 14.8 cm.
Parrilla Magnética (9).-	Marca Molda Agitherm. Modelo 53166. W/V/H 530/127/60.
Vaso de Precipitados (12).-	Marca PYREX. Capacidad 2 lts.
Eliminador de Niebla (11).-	Placa de acrílico con relieves

hexagonales.

Dimensiones: Largo 20 cm.

Ancha 19 cm.

Extensiones.-

Longitud 10 m.

3.- DESCRIPCION DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

Para desarrollar este procedimiento se efectuaron una serie de ajustes de tipo operativo en las cuales se apoya este trabajo.

Para efectuar el enfriamiento del agua por medio del aire, es necesario poner en contacto íntimo el aire y el agua en flujo a contracorriente a través del área proporcionada por el empaque, para lograr esto se instala el equipo experimental como lo muestra la figura 9, cuidando de conservar el mismo ángulo de las rejillas de empaque con respecto a la horizontal, se fija el eliminador de niebla para evitar que el aire saturado saiga por un lugar inadecuado.

Después se conectan la bomba, el ventilador, el calentador de inmersión y la parrilla magnética.

El flujo de agua manejado por la bomba se fija por medio del control de velocidad de esta y se mantiene constante para una misma corrida.

El ventilador se fijará como se muestra en la figura 9 para evitar vibraciones excesivas del cuerpo de la torre, el flujo de aire manejado por este fue constante para todas las corridas experimentales y fue medido por medio de un tubo pitot.

La función del calentador de inmersión es proporcionar al agua el calor necesario para que esta eleve su temperatura rápidamente y ya logrado esto, por medio de la parrilla magnética se mantiene constante e igual a 45 °C. Las mediciones de temperatura se efectuaron con termómetros rellenos de mercurio.

En el momento que se tengan condiciones de régimen permanente se procede a medir temperaturas de entrada y salida del agua, y temperaturas de bulbo seco y húmedo de entrada y salida del aire.

Las temperaturas de bulbo seco y húmedo deberán de medirse en la parte superior de la torre, a la salida del eliminador de niebla.

La temperatura del agua a la salida de la torre debe de ser medida directamente a la salida de la sección empacada.

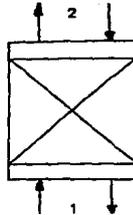
Este procedimiento se puede repetir para diferentes flujos de agua y diferente altura de sección empacada.

4.- RESULTADOS.

Con los datos experimentales obtenidos se obtuvo el NUT, de acuerdo al siguiente procedimiento.

De los datos experimentales:

T_2, T_1, Z
 tw_2, tw_1, L'
 td_2, td_1



Se evalúan las entalpías del aire a la presión de 586 mm Hg, (que corresponde a la presión dada en bases de diseño) como:

$$H_2 \left| \begin{array}{l} tw_2 \\ td_2 \end{array} \right.$$

$$H_1 \left| \begin{array}{l} tw_1 \\ td_1 \end{array} \right.$$

Y con las temperaturas de entrada y salida del agua se determina la línea de operación del sistema, dada por la siguiente expresión:

$$\frac{L'Ca}{G'} = \frac{H_2 - H_1}{T_2 - T_1}$$

(Ec. 3)

Se grafican la línea de operación y la curva de equilibrio a la misma presión de operación como lo muestra la figura 10, para obtener los siguientes valores:

$$T, H', H, (H'-H), 1/(H'-H)$$

Y se grafica la función: $1/(H'-H) = f(T)$ para obtener el área bajo la curva que es igual a la siguiente integral:

$$NUT = \frac{Kya Z}{L'} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{H'-H} \quad (\text{Ec. 1})$$

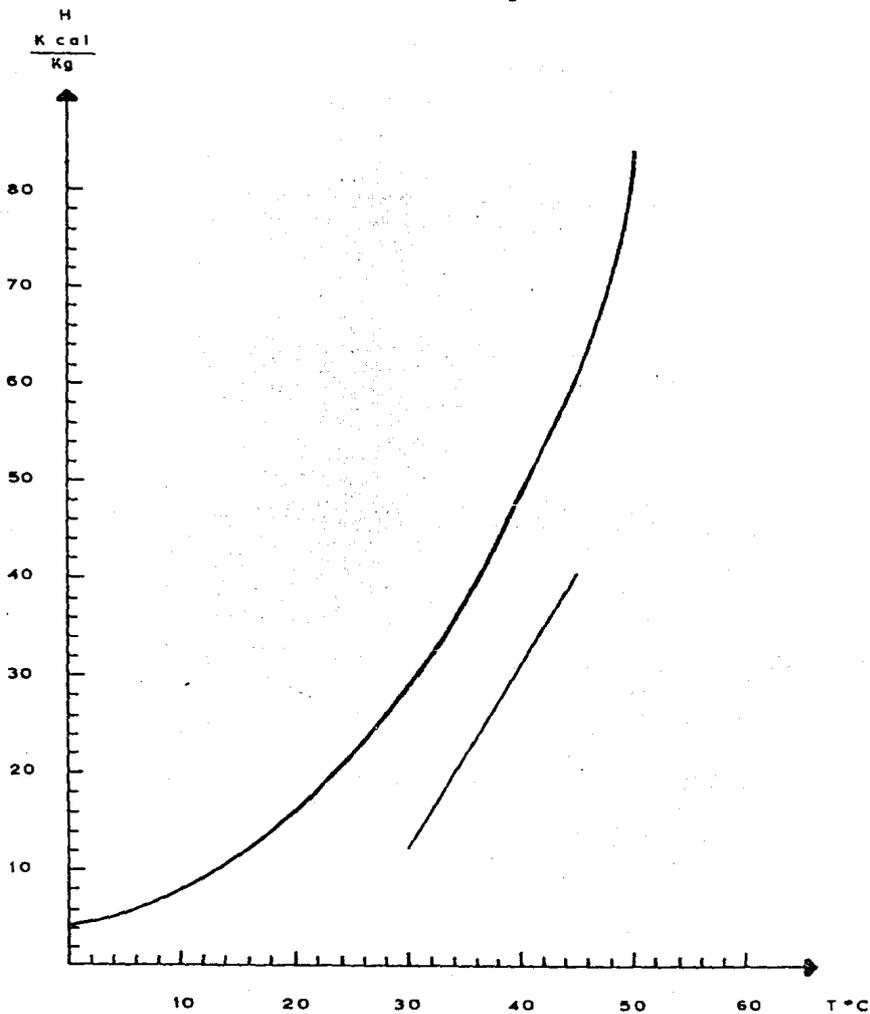
Donde NUT = Número de Unidades de Transferencia.

Este NUT es característico del equipo y se evaluó por el método de Simpson con un programa en una computadora "Apple Iie".

FIG. 10

SISTEMA AIRE - AGUA

P = 586 mm. Hg



Los primeros experimentos se efectuaron manteniendo constantes el flujo de aire másico en un valor de $2.94 \text{ Kg/m}^2 \text{ s}$, el flujo de agua másico en un valor de $0.9687 \text{ Kg/m}^2 \text{ s}$ y la altura de empaque en un valor de 1 m .

Estos experimentos se efectuaron con el fin de dominar la operación del equipo y verificar la reproducibilidad de los resultados. Las condiciones de temperaturas de entrada y salida del aire y del agua, así como el NUT calculado con el método anteriormente descrito, para cada corrida experimental, se presentan en la tabla 1.

TABLA 1.

Condiciones de Entrada (°C)		Condiciones de Salida (°C)		NUT
T	45.0	T	34.0	0.4067
tw	38.5	tw	17.5	
td	40.5	td	25.0	
T	45.0	T	36.0	0.3536
tw	38.0	tw	14.0	
td	41.0	td	18.0	
T	45.0	T	35.0	0.4365
tw	38.0	tw	15.0	
td	41.0	td	21.0	
T	45.0	T	36.0	0.3535
tw	38.0	tw	14.0	

TABLA 1 (CONT.)

td	41.0	td	19.0	
T	45.0	T	36.0	0.3442
tw	38.0	tw	11.5	
td	39.0	td	15.0	
T	45.0	T	37.0	0.3160
tw	39.0	tw	12.0	
td	42.0	td	15.5	
T	45.0	T	35.0	0.4362
tw	39.0	tw	12.0	
td	42.0	td	17.0	
T	45.0	T	35.0	0.4371
tw	39.0	tw	12.0	
td	42.0	td	17.0	
T	45.0	T	37.0	0.3226
tw	39.0	tw	13.5	
td	42.0	td	17.0	
T	45.0	T	37.0	0.3298
tw	40.0	tw	11.0	
td	42.0	td	15.0	
T	45.0	T	36.0	0.3457
tw	39.5	tw	13.5	
td	42.0	td	17.5	

En la tabla 2 se presentan los valores promedio de NUT evaluados de los datos obtenidos en diez días de experimentación.

En esta tabla se presenta la variación de NUT con respecto al flujo de agua a diferentes alturas, con flujo de aire constante.

Estos resultados se muestran graficamente en la figura 11. Los valores promedio de las condiciones climatológicas, de los días de experimentación fueron los siguientes:

Temperatura de bulbo húmedo del aire = 12.8 °C.

Temperatura de bulbo seco del aire = 20 °C.

Los flujos de agua manejados fueron los siguientes:

Flujo 1 ; 0.9687 Kg / m² s.

Flujo 2 ; 0.3939 Kg / m² s.

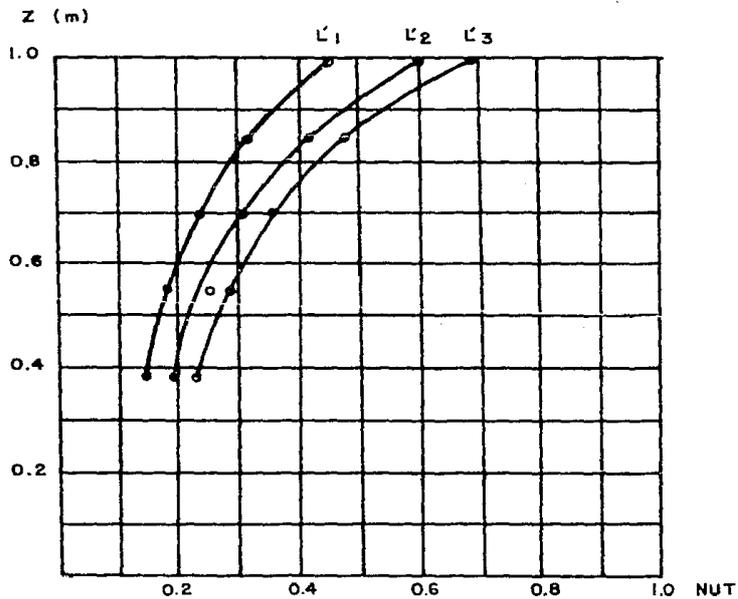
Flujo 3 ; 0.2518 Kg / m² s.

El flujo de aire másico manejado fue: 2.94 Kg/m² s.

TABLA 2

ALTURA FLUJO	Z 1 1.0 m	Z 2 0.85 m	Z 3 0.70 m	Z 4 0.55 m	Z 5 0.39 m
Flujo 1	0.4560	0.3209	0.2401	0.1857	0.1497
Flujo 2	0.6033	0.4196	0.3142	0.2555	0.1970
Flujo 3	0.6891	0.4821	0.3583	0.2925	0.2242

FIG. 11 VARIACION DE "NUT" RESPECTO A "Z" CON "G" CONSTANTE.



$$L_1 = 0.9687 \text{ Kg/m}^2\text{s}$$

$$L_2 = 0.3939 \text{ "}$$

$$L_3 = 0.2518 \text{ "}$$

$$G = 2.94 \text{ "}$$

Z = ALTURA DE SECCION EMPACADA

G' = FLUJO MASICO DE AIRE/AREA

L' = FLUJO MASICO DE AGUA/AREA

5.- ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS.

Se pretende con este análisis de resultados experimentales determinar la dependencia del NUT con respecto a altura de empaque y flujos manejados.

De los datos mostrados en la tabla 1, se puede observar la repetibilidad del experimento, obteniendo los siguientes valores estadísticos positivos de los resultados: el valor promedio es de 0.3710 NUT con una desviación estandard de 0.0459 y una variancia de 0.04818.

La figura 11 muestra la variación de NUT con respecto a la altura de la sección empacada, para tres diferentes flujos de agua, con flujo de aire constante.

Las curvas presentan un aumento en el NUT conforme aumenta la altura de la sección empacada, y además se observa que a menor flujo de agua corresponde un valor mayor de NUT.

Siguiendo la tendencia de las curvas hasta una altura igual a cero, se puede observar que cortan al eje del NUT en un valor cercano a cero.

Analizando las curvas se puede observar, que conforme a lo esperado el NUT aumenta cuando aumenta la altura de la sección empacada y la ligera desviación con respecto a una línea recta, es debida a la presencia de efectos de pared.

El ligero aumento del NUT conforme disminuye el flujo de agua se le atribuye a errores experimentales ya que teóricamente las pendientes deben mantenerse paralelas (para una misma altura).

El punto de la gráfica en el cual las curvas cortan al eje del NUT, corresponde al valor de los efectos terminales, teniendo en este caso un valor de 0.08 NUT como promedio.

Para obtener una ecuación característica para este arreglo y tipo de empaque la cual relacione el NUT experimental con los flujos manejados, se procedió a correlacionar las diferentes relaciones L'/G' manejadas con respecto al NUT obtenido (tabla 2).

La forma de correlacionar L'/G' y NUT es similar a la utilizada en la referencia 17, en dicha investigación se encontró una ecuación que relaciona el NUT con la relación de flujos manejados y el número de tarimas, además depende de dos constantes características de cada tipo de tarima, esta ecuación tiene la siguiente forma:

$$Kya V/L' = 0.07 + AN (L'/G')^{-n} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde "A" y "n" son constantes características de cada tipo de tarima utilizado, y N es el número de tarimas.

El valor de 0.07 que contiene la ecuación, es la determinación experimental de los efectos terminales, que presentan en promedio los diferentes tipos de tarimas estudiadas en la referencia mencionada.

La forma de correlacionar en el presente trabajo es la siguiente:

Sacando logaritmos a la ecuación 2, se obtiene la ecuación

de una línea recta, la función a graficar es la siguiente:

$$\log (K_y a Z/L') = f (\log (L'/G')).$$

En la cual la pendiente corresponde al valor de "-n".

El valor promedio obtenido de "n" para todas las alturas de empaque manejadas fue de 0.3007 (obtenido de los datos de la tabla 2).

Al obtener las diferentes correlaciones para las diferentes alturas de sección empacada manejadas, se observa una variación de la ordenada al origen para cada altura, el valor que corresponde a la ordenada al origen es: $\log A + \log N$.

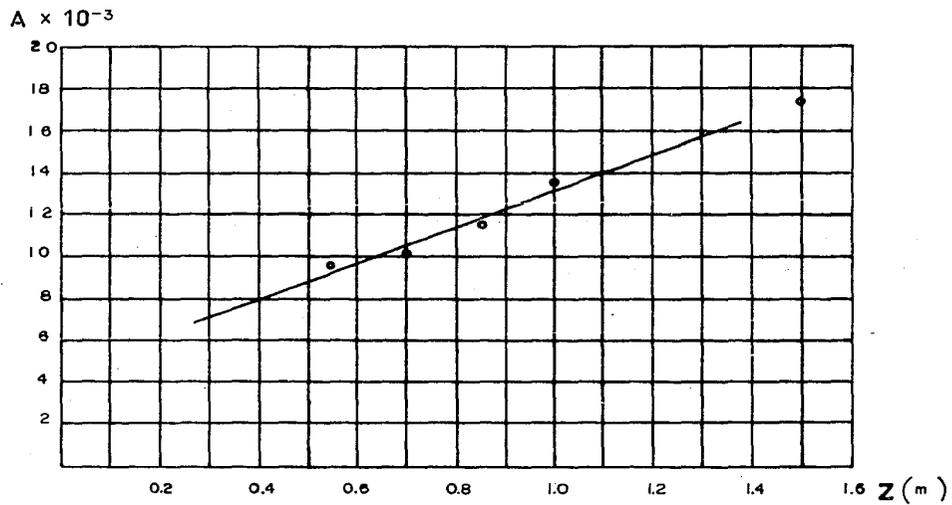
En comparación con la referencia obtenemos una variación de "A" con respecto a la altura de empaque.

Los valores obtenidos de "A" se muestran en la tabla 3.

TABLA 3

Flujos	Z 1 1.0 m	Z 2 0.85 m	Z 3 0.70 m	Z 4 0.55 m
Flujo 1	0.01361	0.01149	0.01012	0.00950
Flujo 2	0.01375	0.01147	0.01011	0.00998
Flujo 3	0.01373	0.01153	0.01008	0.00999
Promedios:	0.01370	0.01150	0.01010	0.00982

FIG. 12 VARIACION DE 'A' RESPECTO A 'Z'.



En virtud de la variación obtenida para "A" se encontrará el valor requerido para el diseño de manera gráfica, utilizando la figura 12 mediante la cual es posible extrapolar para el valor deseado de altura de empaque.

La figura 12 relaciona los valores promedio calculados para "A" con la altura de la sección empacada, proporcionando un factor de correlación de 0.9885 con una desviación estandar de 0.0032 y una ordenada al origen de 0.00456 "A".

La ecuación característica encontrada para este arreglo y tipo de empaque es la siguiente:

$$K_y a Z/L' = 0.08 + A (N) (L'/G')^{-0.2} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde el valor de "A" se evaluará con el método anteriormente descrito y "N" corresponde a un número de rejillas de empaque, el cual es determinado por el área específica y la altura de la torre.

Los intervalos de (L'/G') y altura de empaque manejados para la determinación esta ecuación fueron los siguientes:

(L'/G')	0.08564	0.32949
Z (m)	0.39	1.0

Los resultados experimentales de la referencia 17 muestran valores de "A" entre 0.60 y 0.103, mientras que los valores de "n" están entre 0.62 y 0.54. Las relaciones L'/G' manejadas están entre 0.59 y 3.51.

El valor de la constante "n" obtenido en este análisis es de 0.30.

Para este tipo y arreglo de empaque se puede observar que en comparación con los valores obtenidos en la investigación de la referencia 17, la constante característica "n" no es significativamente diferente, mientras que para el valor de "A" se encontró una variación de este con respecto a la altura de la sección empacada.

Considerando el significado del NUT se puede analizar dentro de la ecuación que los resultados experimentales obtenidos son lógica y estadísticamente aceptables.

CAPITULO IV

DISEÑO DE LA TORRE

En este capítulo se aborda en primer lugar el diseño de la Torre, para lo cual se consideran los siguientes aspectos:

En base a los resultados del capítulo anterior se encontró una ecuación para el escalamiento de nivel laboratorio a nivel planta piloto, con esta ecuación se calculará el NUT para la altura de empaque sugerida, después con datos de bases de diseño, se comprobará este valor de NUT para los valores límites del intervalo de relación de flujos manejados.

En segundo término se desarrolla el cálculo de la potencia de bombeo necesaria para el sistema, esto se efectúa en base a los dibujos isométricos desarrollados a partir de los planos de elevación y planta, para las zonas críticas de caída de presión de la planta piloto que requieren del servicio.

Posteriormente se presentan los cálculos correspondientes al tratamiento químico del agua, por ser este tratamiento necesario para el buen funcionamiento del sistema, para controlar efectos de incrustación, corrosión y desarrollo biológico.

Por último se presentan los cálculos de los perfiles estructurales y detalles de construcción del cuerpo de la torre, del basin, del anclaje y de la charola distribuidora.

1.- ESCALAMIENTO.

Para el escalamiento de este equipo en particular se deben de considerar los siguientes factores:

El arreglo de empaque usado en la torre de la planta piloto debe ser idéntico al usado en el prototipo experimental, este arreglo de empaque mantiene ángulos iguales de las rejillas con respecto a la horizontal de 20° y fue elegido después de compararse con un arreglo horizontal, obteniendo en el primer caso igual intervalo de enfriamiento, con menor cantidad de em-
que.

La relación líquido - gas usada en la torre de la planta piloto debe ser igual a la usada en el prototipo experimental.

Como el coeficiente de transferencia de masa involucrado en la ecuación 1, es característico para el área específica del prototipo, es necesario que el área específica de la torre a nivel planta piloto sea semejante a la del prototipo.

La ecuación característica para este arreglo y tipo de empaque encontrada en el capítulo III mediante el análisis de resultados, será utilizada para evaluar el NUT que proporciona un tamaño de equipo supuesto y posteriormente se comprobará con el valor de NUT requerido, esta ecuación es la siguiente:

$$\frac{K_y a Z}{L'} = 0.08 + A (N) (L'/G')^{-0.3} \quad (\text{Ec. 4})$$

En esta ecuación el valor de " A " será obtenido en forma gráfica de la figura 12, extrapolando el valor hasta una altura de sección empacada requerida, debido a que depende de la altura.

2.- CALCULOS.

A).- Cálculo del número de niveles de empaque .

Como se mencionó en la introducción al capítulo, se propuso un tamaño de torre, para el cual se calculará el número de niveles de empaque, considerando para esto la misma geometría usada en el prototipo experimental.

El tamaño de torre que se propuso fue en base al tamaño de una torre atmosférica previamente diseñada, para la cual se calculó una altura de sección empacada de 2 m y una área transversal de 3 m².

Debido a que para un mismo requerimiento se presenta una mayor eficiencia para una torre de tiro forzado que para una torre de tiro natural o atmosférica, se eligió un tamaño menor de altura de empaque.

El área de sección transversal quedará definida por las dimensiones de las rejillas de empaque disponibles en el centro.

En virtud de lo anterior se propone para la torre de enfriamiento las siguientes dimensiones:

Ancho = 0.86 m.

Largo = 1.15 m.

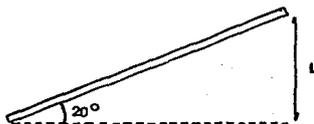
Altura empacada = 1.50 m.

Esta torre proporciona una área específica de 0.345 l/m. con 30 rejillas de empaque colocadas en los niveles.

Para el calculo del numero de niveles de empaque se debe de conservar el mismo angulo que el usado en el prototipo, por lo tanto se calculara la distancia vertical que abarca un nivel de la siguiente manera:

$$L = 86 \text{ sen } 20^\circ = 29.41 \text{ cm}$$

Donde L es el espacio entre un nivel de empaque y la horizontal.



Si se tiene que $Z = 1.5 \text{ m}$, entonces el número de niveles es:

$$N = \frac{1.5}{0.2941} = 5 \text{ niveles de empaque.}$$

Cabe afirmar que debe conservar la misma geometria, usando el ángulo antes mencionado (20°) tanto en el prototipo experimental, como en la torre propuesta.

Las dimensiones del prototipo experimental utilizado son las siguientes:

$$\text{Ancho} = 0.17 \text{ m.}$$

$$\text{Largo} = 0.16 \text{ m.}$$

$$\text{Area específica} = 0.35 \text{ 1/m.}$$

B).- Cálculo del NUT disponible.

Se calculará el NUT que proporciona la torre supuesta, usando la ecuación característica de escalamiento encontrada para los valores de (L'/G') límites del intervalo utilizado.

El valor de "N" utilizado en la ecuación corresponde al número de rejillas de empaque que proporcionan el área específica requerida.

La ecuación característica para el escalamiento es:

$$\frac{Kya Z}{L'} = 0.08 + A (N) (L'/G')^{-0.3} \quad (\text{Ec. 4})$$

El valor de "A" determinado en forma gráfica de la figura 12, para una altura de sección empacada de 1.5 m, es 0.01757.

Entonces la ecuación característica para el escalamiento es:

$$\frac{Kya Z}{L'} = 0.08 + 0.01757 (N) (L'/G')^{-0.3} \quad (\text{Ec. 5})$$

El intervalo de la relación (L'/G') para el cual fue determinada esta ecuación es de 0.08564 a 0.32949.

Calculando el NUT que proporciona la torre de enfriamiento supuesta para $(L'/G') = 0.08564$, se tiene :

$$\text{NUT} = \frac{Kya Z}{L'} = 0.08 + 0.01757 (30) (0.08564)^{-0.3}$$

$$\text{NUT} = \frac{Kya Z}{L'} = 1.1817$$

Para $(L'/G') = 0.32949$ se tiene:

$$NUT = \frac{Kya Z}{L'} = 0.08 + 0.01757 (30) (0.32949)^{-0.3}$$

$$NUT = \frac{Kya Z}{L'} = 0.8154$$

C).-Cálculo del NUT requerido.

Los valores del NUT calculados anteriormente son en base a una altura supuesta por tanto serán sujetos a comprobación, para esto se diseñara la torre con las condiciones dadas en bases de diseño de las cuales se requieren :

- Temperatura del agua de suministro y retorno.
- Temperatura de bulbo seco y húmedo de diseño del aire.

Se calculará el NUT de diseño (Requerido) con los valores límite de la relación (L'/G') utilizados en el escalamiento.

Si NUT (Requerido) < NUT (Disponible), entonces el equipo propuesto proporcionará el rango de enfriamiento requerido.

De Bases de Diseño :

$$t_w \text{ (Ambiental) } = 12 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_w \text{ (Diseño) } = 13 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_d \text{ (Diseño) } = 21.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T \text{ (Suministro) } = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T \text{ (Retorno) } = 45 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Con los datos dados en Bases de Diseño y los valores de la relación (L'/G') utilizados, se calcula el NUT de la manera descrita anteriormente obteniendo los siguientes resultados :

(L'/G').	NUT (Requerido).
0.08564	0.53834
0.32949	0.56320

Haciendo una comparación con los parámetros encontrados en la referencia 17, se calculó el NUT para los tipos de tarima "A" e "I", para las mismas condiciones de operación (L'/G') utilizadas en la fase experimental, de esto se obtuvieron los siguientes resultados:

(L'/G').	NUT "A".	NUT "I".
0.08564	0.7071	1.4006
0.32949	0.3075	0.6532

En la tabla 4 se presenta un cuadro comparativo del NUT, que se obtiene por medio de lo siguiente:

1.- El NUT (Req.) se obtuvo por datos de bases de diseño, evaluado por el método de Merkel (Ref. 7).

2.- El NUT (Dis.), evaluado por medio de la ecuación 5.

3 y 4 .- NUT evaluado por el método de Kelly y Swenson, para dos tipos de empaque convencional (Ref. 17), utilizando la misma altura de sección empacada para todos los casos.

TABLA 4

(L' / G')	1 NUT (Req.)	2 NUT (Dis.)	3 NUT "A"	4 NUT "I"
0.08564	0.53834	1.1817	0.7071	1.4006
0.32949	0.56320	0.8154	0.3075	0.6532

De acuerdo al cuadro comparativo anterior se puede asegurar que el equipo propuesto, teóricamente podrá remover la carga térmica requerida por bases de diseño, proporcionando un valor de NUT aproximadamente igual a un equipo con empaque convencional para la misma altura empacada (1.5 m).

D).-Cálculo de la potencia de bombeo requerida.

La potencia de bombeo requerida fue calculada en base a los dibujos isométricos desarrollados a partir de los planos de elevación y planta de los sistemas que requieren del servicio.

En un sistema de enfriamiento el equipo de bombeo de agua a la torre de enfriamiento debe ser diseñado con un factor de seguridad de 10% al 15% en su capacidad. El cabezal de la bomba debe estar dimensionado para circular el agua a través de los equipos y retornarla a través de la torre de enfriamiento.

Para este caso se analizaron los sistemas que presentan mayor caída de presión y se encuentran más lejanos del sistema de bombeo, manejando el flujo máximo dado en las Bases de Diseño, garantizando con esto el suministro a los otros sistemas, los cuales presentan menor caída de presión .

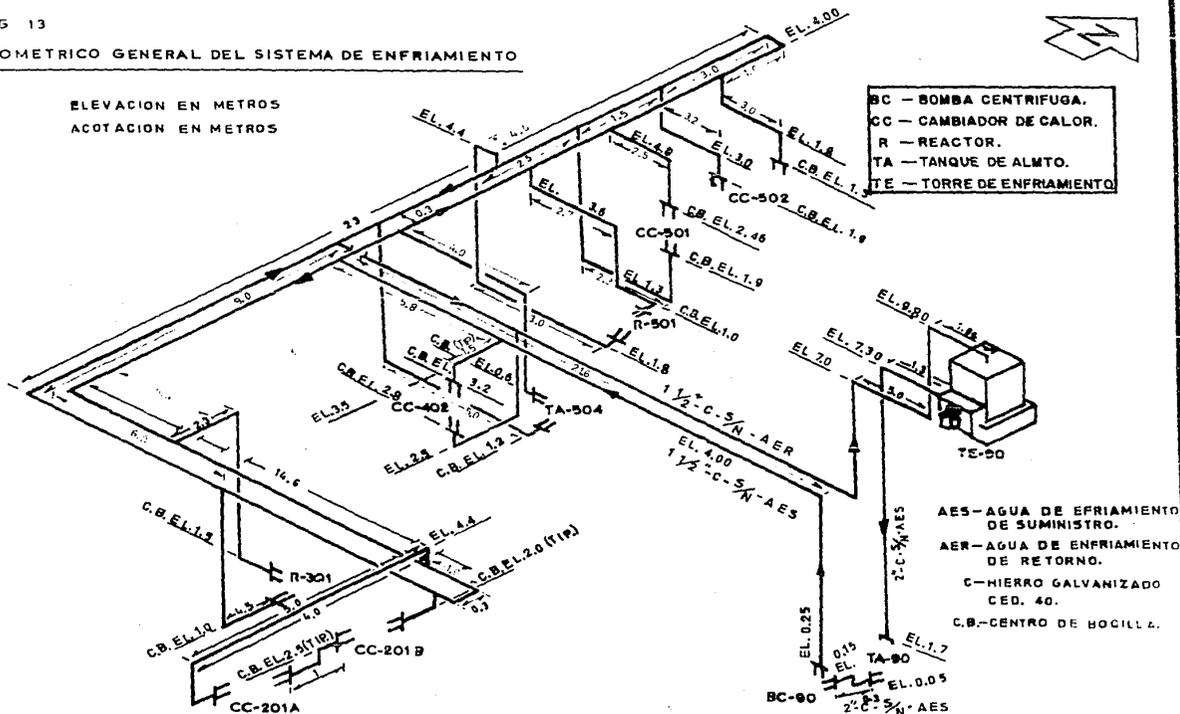
A continuación se presenta el dibujo isométrico general del sistema de enfriamiento mostrando las áreas que requieren del servicio (Fig.13), y la hoja de especificación para el sistema de bombeo calculado.

Además se presenta la curva de la bomba propuesta (Fig.14) y la curva del NPSH requerido dadas por el proveedor (Fig.15). Debido a que la temperatura del agua manejada por la bomba, dista mucho de su temperatura de evaporación, es muy remoto el problema de cavitación en la bomba, sin embargo el cálculo del NPSH requerido cumple con la condición de $NPSH_{Disp.} > NPSH_{Req.}$

FIG 13

ISOMETRICO GENERAL DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

ELEVACION EN METROS
ACOTACION EN METROS



- BC - BOMBA CENTRIFUGA.
- CC - CAMBIADOR DE CALOR.
- R - REACTOR.
- TA - TANQUE DE ALMTO.
- TE - TORRE DE ENFRIAMIENTO

- AES - AGUA DE ENFRIAMIENTO DE SUMINISTRO.
- AER - AGUA DE ENFRIAMIENTO DE RETORNO.
- C - HIERRO GALVANIZADO CED. 40.
- C.B. - CENTRO DE BOCILLA.

HOJA DE DATOS PARA BOMBA CENTRIFUGA

FOR	FECHA	CONTRATO
REVISO		DIBUJO
APROBADO	REV	HOJA

GERENCIA: ING DE PROYECTOS

PROYECTO: Torre de Enfriamiento CLAVE 2-V
 LUGAR: C.I.E.S.I. Nº DE UNIDADES: UNA
 SERVICIO: torre de enfriamiento FABRICANTE: OCEICO

CONDICIONES DE OPERACION DE CADA BOMBA				FUNCIONAMIENTO	
LIQUIDO <u>AGUA</u>	LPM A.T.B. NOR <u>113.56</u>	DISEÑO <u>121.5</u>	TAMAÑO Y TIPO <u>CENTRIFUGA 1'4" x 1"</u>		
	PRES. DESC. (Kg/cm ²) <u>6.85</u>		CODIGO <u>IXL-5-2 B337900</u>		
TEMP. BOMBEO <u>30</u>	°C PRES. SUCC. (Kg/cm ²) MAX. <u>0.099</u>	DISEÑO <u>0.1054</u>	CURVA PROPUESTA Nº <u>1211</u>		
DENS. REL. A.T.B. <u>0.996</u>	PRES. DIF. <u>6.76</u>	Kg/cm ²	NPSH REQ. (AGUA) <u>1.5</u>	m	
PRES. VAPOR A.T.B. <u>0.0432</u>	Kg/m ² COLUM. DIF. <u>10</u>	m	Nº DE PASOS	RPM <u>3450</u>	
VISC. A.T.B. <u>0.85</u>	CP NPSH DISP. <u>1.7</u>	m	EF DIS.	BHP <u>4.8</u>	
CORR./EROS. CAUSADO POR			BHP. MAX. DIS. IMP.		

MATERIALES Y CONSTRUCCION					
MONTAJE CARCASA: (L. CENTROS X) (PIE) (SOPORTE) (VERTICAL)					
DIVISION: (AXIAL) (RADIAL)					
TIPO: (VOLUTA SENCILLA X) (DOBLE VOLUTA) (DIFUSOR)					
CONEX: (VENTEO) (DRENAJE) (MAN.)					
BOQUILLAS	DIAMETRO	CLASIF. ASA	CARA	POSICION	
SUCCION	<u>1 1/4"</u>			<u>HORIZONTAL</u>	
DESCARGA	<u>1"</u>			<u>VERTICAL</u>	
DIAM. IMPULSOR: DISEÑO	<u>7"</u>	MAX.	<u>7"</u>	TIPO <u>SCARRBO</u>	
NUN. DE FAB. DE BALEROS RADIAL				AXIAL	
COPLER Y GUARDA FAB. MITAD COPLER MOTOR MONTADO POR					
<input type="checkbox"/> EMPAQUE: FAB Y TIPO TAM. Nº DE ANILLOS					
<input checked="" type="checkbox"/> SELLO MECANICO: FAB Y TIPO <u>OCEICO 1 1/4"</u> CODIGO CLASE <u>0232300</u>					
PARA BOMBAS VERT. EMPUJE FLECHA (HACIA ARRIBA) (HACIA ABAJO)					
BASE <u>ACERO ESTRUCTURAL</u>					

CLAVE DE MATLS.: CARCASA		PARTES INTERIORES					PRUEBAS		REQUERIDA	TESTIGUADA
J FIERRO FUNDIDO	CLAVE INTERIORES	I	B	S	C				X	
B BRONCE	IMPULSOR	I	(B)	S	C			COMP. TRABAJO		
S ACERO	PARTES INT. CUERPO	I	I	(S)	C			NPSH		
C 11-13% CROMO	MANGA (EMPAQUE)	CH	CH	AF	(C)			INSPECCION		
A ALEACION	MANGA (SELLO)	C	D	(C)	CH					
H ENDURECIDO	PART. DE DESGASTE	I	(B)	CH	CH					
F RECUBIERTO	FLECHA	S	S	(S)	S					
X										

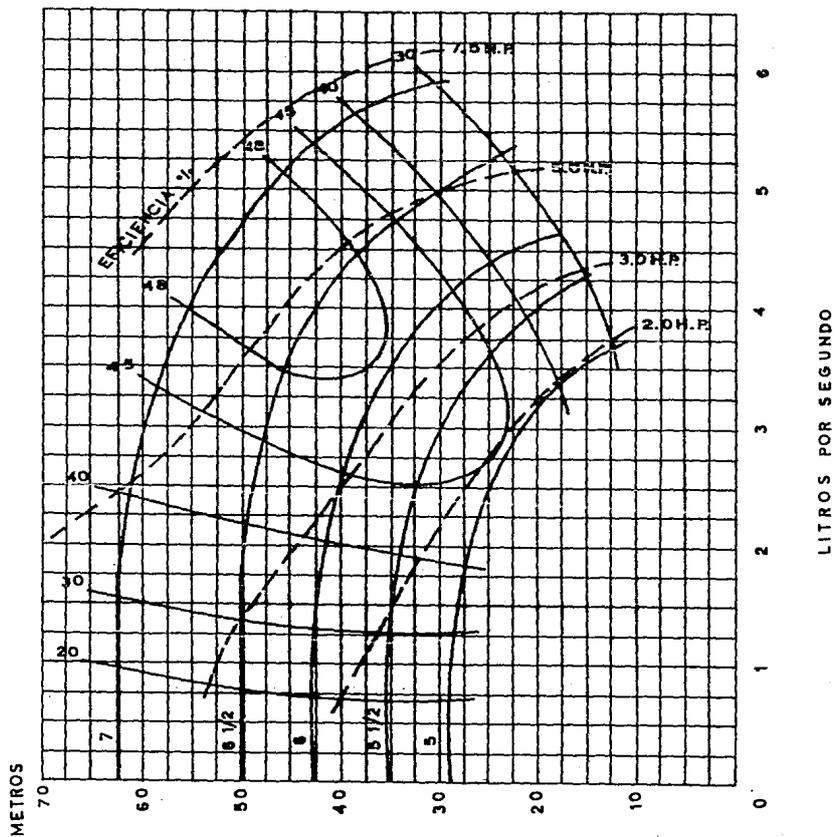
MOTOR POR	FABRICANTE	TURBINA POR	DATOS FINALES DEL FABRICANTE	
CLAVE	<u>MONTADO POR CHEUTE</u>	CLAVE	<u>MONTADO POR</u>	DIAMETRO ACTUAL DE IMP.
HP	<u>5 RPM 3500 ARMAZON 1827</u>	HP	<u>RPM MATL.</u>	CURVA DE PRUEBA Nº
FAB.	<u>OCEICO</u>	FAB. Y TIPO		DIB. DIMENSIONAL Nº
TIPO	<u>ADG AISL. CLASE B</u>	VAP. ENT. Kg/cm ²		DIB. SECC. BOMBA Nº
ENCAPSULADO	<u>AUM. TEMP.</u>	ESCAPE Kg/cm ²		DIB. SECC. SELLO Nº
VOLTS / FASES / CICLOS	<u>220-440/3/60</u>	CONS. VAPOR		Nº. SERIE BOMBA
BALEROS	LUB.	BALEROS	LUB.	TOLERANCIA ENTRE ANILLOS
AMPS. A PLENA CARGA		BOQUILLAS	DIAM	CLASE ASA
		ENTRADA		CARA
		ESCAPE		POSICION

OBSERVACIONES:

REVISO
FECHA

FIG. 14

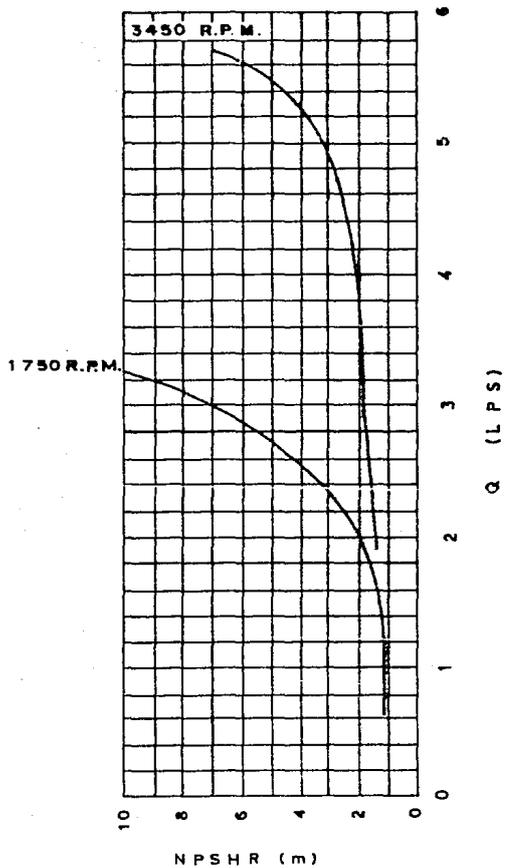
CURVA DE LA BOMBA PROPUESTA



MODELO: 1 X L	TAMAÑO: 32 x 25.4mm.	IMPULSOR: 1 x L1	DIAM.: VARIOS	R. P. M.: 3450
------------------	-------------------------	---------------------	------------------	-------------------

FIG. 15

CURVA DE LA BOMBA PROPUESTA NPSH Req. Vs Q



MODELO: 1 X L	NPSH A : 1750 y 3450 R.P.M.
------------------	--------------------------------

E).-Tratamiento químico del agua.

Dentro de un sistema de enfriamiento de tipo abierto con recirculación es necesario realizar un tratamiento químico al agua, ya que la constante evaporación efectuada durante el proceso de enfriamiento, trae como consecuencia el aumento en la concentración de los sólidos disueltos y problemas de incrustación y corrosión al sistema y a los equipos de intercambio de calor que utilicen este servicio.

Además, en este tipo de sistema de enfriamiento, por tener contacto con el aire atmosférico, se manifiesta un desarrollo biológico que puede llegar a anular el proceso de enfriamiento.

Estos problemas se pueden minimizar con un tratamiento químico adecuado del agua de enfriamiento, este tratamiento dependerá de la cantidad de sólidos presentes, del contenido biológico, en el agua de suministro al sistema y de la evaporación efectuada durante el proceso de enfriamiento.

Para un tratamiento adecuado es necesario obtener un análisis del agua de repuesto al sistema, para saber exactamente el contenido de sólidos, lo cual es necesario para calcular los ciclos de concentración para los diferentes iones contenidos en el agua, y calcular la cantidad de reactivos necesarios para su control.

Por otra parte, los ciclos de concentración servirán para obtener las cantidades de agua de reposición y purga para el sistema.

Para el cálculo de la dosificación de los reactivos necesarios para el tratamiento del agua del sistema se debe de seguir la siguiente secuencia:

- a) Conseguir el análisis del agua de repuesto (R) y tenerlo todo en ppm de CaCO_3 .
- b) Definir el tipo de tratamiento que se va a dar.
- c) Calcular el número de ciclos de concentración y seleccionar el menor de ellos.
- d) Calcular las pérdidas por evaporación (E), por arrastre de viento (A) y por purga continua (P).
- e) Calcular la cantidad requerida de agua de repuesto.
- f) Determinar cantidades de reactivos químicos que se van a dosificar a la torre.

a).- Análisis del agua de repuesto para el sistema de enfriamiento.

CATIONES

Calcio (Ca^{++})	Como	CaCO_3	168 ppm.
Magnesio (Mg^{++})	"	"	90 "
Sodio (Na^+)	"	"	212 "
Hierro (Fe^{+++})	"	"	- "
TOTAL CATIONES	"	"	470 "

ANIONES

Bicarbonatos (HCO_3^-)	"	"	126 "
Carbonatos (CO_3^{--})	"	"	0.0 "
Hidróxidos (OH^-)	"	"	0.0 "
Sulfatos (SO_4^{--})	"	"	218 "
Cloruros (Cl^-)	"	"	126 "
Nitratos (NO_3^-)	"	"	0.2 "
TOTAL ANIONES	"	"	470.2 "
Dureza Total	"	"	258 "
Dureza sin Carbonatos	"	"	132 "
Dureza con Carbonatos	"	"	126 "
Alcalinidad Fenolftaleina (P)	"	"	0.0 "
Naranja de Metilo (AM)	"	"	126 "
Bióxido de Carbono	"	CO_2	7.4 "

Sílica	"	SiO ₂	22.5	"
TOTAL DE SOLIDOS DISUELTOS			508	"
pH	7.5			
CONDUCTIVIDAD (micromhos a 20 °C)			735.0	

b).-Tipo de Tratamiento

El tipo de tratamiento que se dará a este sistema es para evitar corrosión, incrustación y desarrollo biológico.

En el control de incrustación se utilizará H₂SO₄ para controlar el pH .

En el control de la corrosión se utilizarán como inhibidores sales de Cr^{VI} y de Zn⁺⁺ o polifosfatos.

En el control del desarrollo biológico se utilizarán sales cuaternarias de amonio o el tiocarbamato.

c).-Cálculo del número de ciclos de concentración.

1.-Tratamiento con H₂SO₄ .

Por presencia de CaSO₄ :

$$X = \sqrt{\frac{800}{(\text{epm Ca}^{++}) + (\text{epm HCO}_3^-) + (\text{epm SO}_4^{=})}} \quad (\text{Ec.6})$$

Donde: epm = equivalentes / millon .

$$\text{epm (Ca}^{++}\text{)} = \frac{\text{ppm de Ca como CaCO}_3 \text{ en (R)}}{50}$$

$$\text{epm (Ca}^{++}\text{)} = \frac{168}{50} = 3.36$$

$$\text{epm (HCO}_3^-) = \frac{126}{50} = 2.52$$

$$\text{epm (SO}_4^{=}) = \frac{218}{50} = 4.36$$

$$X = \sqrt{\frac{800}{(3.36) (2.52 + 4.36)}}$$

$$X = 5.88$$

Por presencia de Sílice:

$$X = \frac{150}{\text{Si}} \quad (\text{Ec.7})$$

Donde: Si = ppm de Si , como SiO₂ en (R)

$$X = \frac{150}{22.5} = 6.66$$

Por presencia de Sílice y Magnesio .

$$X = \sqrt{\frac{36000}{(\text{Si}) (\text{Mg})}} \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde: Si = ppm de Si como SiO_2 en (R)

Mg = ppm de Mg como CaCO_3 en (R)

$$X = \sqrt{\frac{36000}{(22.5) (90)}}$$

$$X = 4.21$$

Se calcula por los tres métodos y se escoge el de menor valor por ser el factor limitante en el control de la operación.

El valor escogido es $X = 4.21$

d).- Cálculo de las pérdidas por evaporación (E) por arrastre de viento (A) y por purga continua (P).

El valor estimado de las pérdidas por evaporación (E), se considera el 1% por cada 10°F de agua de circulación y se calcula de la siguiente manera:

$$E = 0.01 (C) \frac{\Delta T}{10} \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde: ΔT = Intervalo de la Torre ($^{\circ}F$).

C = Gasto de agua de circulación (lb/Hr).

$$E = (0.01) (17469) \frac{27}{10}$$

$$E = 471.66 \text{ lb/Hr}$$

Para pérdidas por arrastre de viento se considera un 0.2% del agua de circulación, para Torres de enfriamiento de tiro mecánico.

$$A = 0.2\% (C) \quad (\text{Ec. 10})$$

$$A = 0.002 (C) = 0.002 (17469)$$

$$A = 34.938 \text{ lb/Hr}$$

El cálculo de la cantidad de agua de purga continua se realiza por medio de un balance de materia y uno de los ciclos de concentración para las diferentes corrientes del sistema.

Balance global: $R = P + E + A$

Balance de ciclos: $R = XP + XE + XA$

Igualando las dos ecuaciones y considerando que no se evaporan sólidos ($XE = 0$), se obtiene la siguiente ecuación:

$$P = \frac{E}{X - 1} - A \quad (\text{Ec. 11})$$

$$P = \frac{471.66}{4.21 - 1} - 34.938$$

$$P = 112 \text{ lb/Hr}$$

e).- Cálculo de la cantidad de agua de repuesto requerida.

Se calcula esta cantidad con un balance global de materia para el sistema.

$$R = E + P + A \quad (\text{Ec. 12})$$

$$R = 471.66 + 112 + 34.94 = 618.6 \text{ lb/Hr}$$

$$R = 3.54\%$$

f).- Determinación de las cantidades de reactivos químicos.

La dosificación de reactivos químicos depende del tipo de tratamiento y del número menor de ciclos de concentración, los calculos se presentan a continuación.

1.- Para control de incrustación:

Se utilizará H_2SO_4 de 98 % en peso , para controlar el pH en un intervalo de 6.5 - 7.2 .

Una forma de calcular la cantidad de acido en base a la cantidad de agua de reposición , es la siguiente:

$$Ac = 1.04 \left(B1 - \frac{B2}{X} \right) \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde : Ac = ppm de H_2SO_4 que debe agregarse en base a la cantidad de (R).

B1 = Alcalinidad (AM) en ppm como $CaCO_3$ de (R).

B2 = Alcalinidad (AM) en agua de circulación al pH = 6.5 con alcalinidad (AM) = 30 ppm como $CaCO_3$ aproximado .

X = Número menor de ciclos de concentración .

Con los siguientes valores :

$$B1 = 126$$

$$B2 = 30$$

$$X = 4.21$$

Se obtiene la cantidad de acido que debe agregarse (en base a la cantidad de agua de reposición requerida).

$$Ac = 126 \text{ ppm}$$

2.- Para control de la corrosión:

Para efectuar el control de corrosión se realiza por medio de inhibidores de tipo inorgánico con sales de Cr^{VI} y Zn^{++} en cantidades iguales, la dosificación de este tipo de inhibidor recomendada por proveedores es menor o igual a 5 ppm., para el sistema abierto con recirculación y una corrosión de 3.0 milésimas de pulgada - corrosión / año.

También se recomienda, nitrato de borato, nitrato de sodio o polifosfatos y de la misma manera que en el cromo con zinc se

requiere de un control especial en la concentración.

Las concentraciones de inhibidor de corrosión e incrustación se deben mantener aproximadamente constantes y se recomienda una dosificación continua, en base a análisis químicos periódicos del agua de enfriamiento.

3.- Para control de desarrollo biológico :

Los biocidas que generalmente se usan son el cloro en forma de solución acuosa y el hipoclorito de sodio, pero se recomienda de preferencia que se usen biocidas que sean compatibles con los reactivos agregados en el control de incrustación y de corrosión, sin que provoque efectos secundarios perjudicables, para el sistema de enfriamiento.

Los biocidas que se recomiendan en este trabajo, con una dosificación intermitente son las sales cuaternarias de amonio o tiocarbamatos; aclarando que el proveedor puede recomendar otro tipo de biocidas.

La concentración del biocida seleccionado, debe conservarse aproximadamente constante, por lo tanto el tiempo considerado para una dosificación intermitente, deberá evaluarse en base a análisis químicos periódicos del agua de enfriamiento del sistema.

3.-DISEÑO MECANICO.

Los aspectos considerados en esta parte del diseño son el cálculo del perfil estructural, que servirá como esqueleto al cuerpo de la torre, el cálculo del número de orificios de la charola distribuidora, el cálculo del tiempo de residencia del basin y los detalles de construcción de estos.

El perfil estructural se calculará como una columna sometida a esfuerzo de flexión, debido al tipo de carga soportada la cual se considera uniformemente distribuida, esto es, considerando que la Torre se encuentra completamente llena y esta carga es soportada de forma equitativa por la estructura en las esquinas de la torre.

No se considera esfuerzo contra viento y sismo debido a que la altura del equipo será pequeña y descansará sobre el edificio donde estará instalada la planta piloto, el cual absorbería los movimientos sísmicos que pudieran presentarse.

A).- Cálculo del perfil estructural

Ya que la altura con respecto a las dimensiones transversales del perfil es grande, se considerara una columna esbelta, esta se puede calcular utilizando la ecuación de Rankin-Gordon determinando el radio de giro mínimo (r) y comprobando la carga crítica de la columna, la ecuación es la siguiente:

$$S_c = \frac{S_w}{1 + e (1/r)^2} \quad (\text{Ec. 14})$$

En esta ecuación (S_c) es el esfuerzo permisible a compresión (l) es la longitud de la columna ; (e) es un constante que depende de las condiciones de fijación en los extremos de la columna; para extremos fijos toma un valor de (1/18000) y para extremos articulados toma un valor de (1/36000) .

Para construcción con acero y extremos fijos la ecuación toma la siguiente forma :

$$S_c = \frac{18000}{1 + \frac{l^2}{18000 r^2}} \quad (\text{Ec.15})$$

Utilizando una relación (l/r) = 200 y en base al cálculo de radio de giro mínimo, se elige el siguiente perfil estructural de la referencia 2, apendice A.

A - 9 2 1/2 " x 2 1/2 " x 3/16 " .

El cual presenta las siguientes características:

r_1 = 0.78 in.

r_2 = 0.49 in.

Area = 0.90 in².

Peso = 3.07 libras por pie.

Sustituyendo la relación (l/r) en la ecuación 15 , se tiene:

$$S_c = \frac{18000}{1 + \frac{1}{18000} (200)^2} = 5586.2 \text{ lb/in}^2$$

$$S_c = 5586.2 \text{ (lb/in}^2\text{)} (0.4536 \text{ kg/lb}) (0.3937 \text{ cm/in})^2$$

$$S_c = 392.75 \text{ Kg/cm}^2$$

El esfuerzo a compresión real estará dado por la carga total sobre la columna, dividida por su área :

$$l = 2.5 \text{ m.}$$

$$V = 2.7692 \text{ m}^3. \text{ (Volumen del equipo).}$$

$$P = 2741 \text{ Kg. (Peso del volumen del agua, si el equipo se encontrara totalmente lleno).}$$

$$P = 362.4 \text{ Kg. (Peso del equipo).}$$

$$P' = 775.85 \text{ Kg/columna.}$$

$$S_c = \frac{775.85 \text{ kg}}{0.69 \text{ in}^2 \text{ (2.54 cm/in)}^2}$$

$$S_c = 174.28 \text{ Kg / cm}^2$$

Comprobando con esto que el esfuerzo a compresión real es menor que el calculado con el radio de giro mínimo y la relación (l/r), esto implica que el perfil estructural seleccionado de la referencia 2, será suficiente para soportar la carga total del equipo.

B) Detalles de construcción de la torre de enfriamiento.

Para efectuar la construcción de la torre se dividió en las siguientes partes principales:

- Construcción del basin.
- Construcción de la estructura o esqueleto soporte.
- Construcción de la charola distribuidora.
- Construcción del eliminador de niebla.
- Colocación de las paredes.
- Construcción del dado de concreto soporte del ventilador.
- Colocación del empaque.

Construcción del basin.

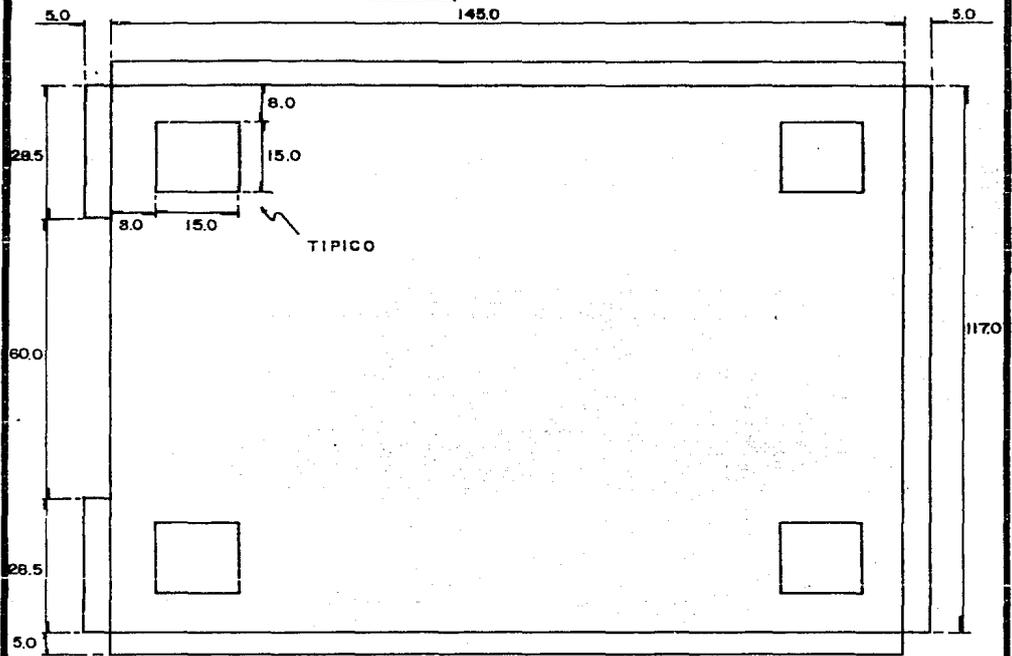
El basin se construirá de fibra de vidrio, ya que dentro de la infraestructura de CIDESI se cuenta con un área en la cual es posible efectuar su construcción, con este tipo de construcción se aseguran; futuros movimientos, facilidad de mantenimiento y poco peso, en comparación con un basin convencional de concreto.

Los planos de construcción se presentan en las figuras 16 a y 16 b, en ellos se muestran los orificios para salida del agua de enfriamiento y para purga continua del sistema.

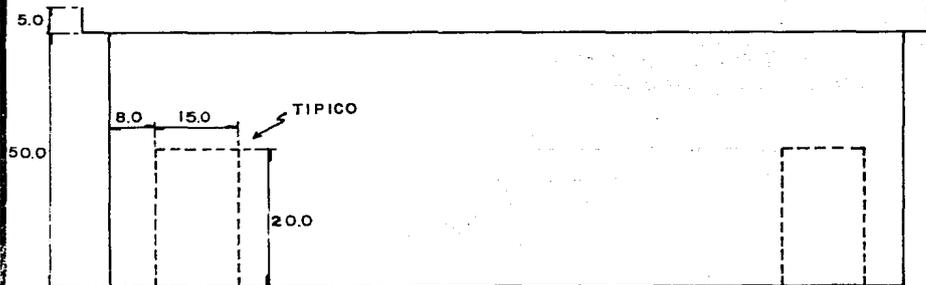
Contiene en sus interiores cuatro cajas del mismo material medidas (15 x 15 x 20 cm.), estas son con el fin de anclar el esqueleto soporte de la torre al basin por medio de dados de concreto.

FIG. 16 a

BASIN



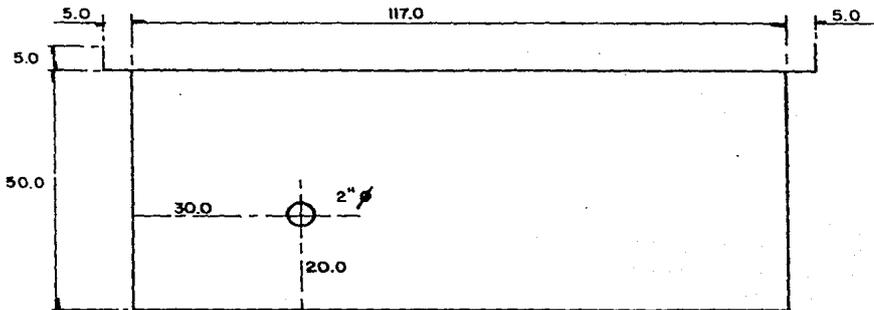
PLANTA



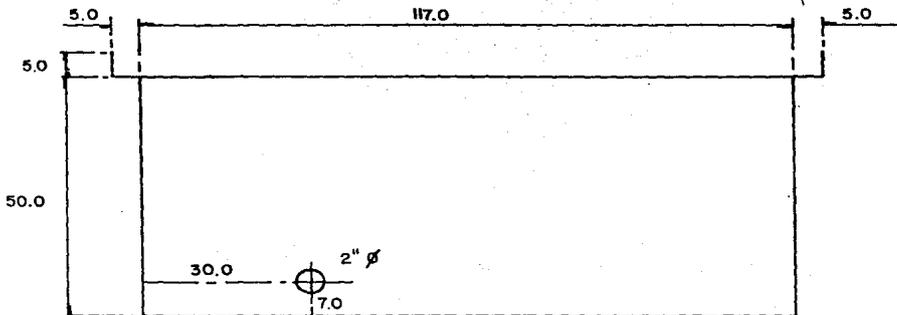
ELEVACION

FIG. 16 b

B A S I N



VISTA FRONTAL



VISTA POSTERIOR

En cuanto al cálculo del tiempo de residencia, se consideraron los siguientes aspectos: flujo manejado de la torre y volumen del basín, dando por resultado 6.40 min.

Construcción de la estructura o esqueleto soporte.

El esqueleto soporte de la torre de enfriamiento estará constituido de perfiles estructurales los cuales son:

Angulo de lados iguales de 2 1/2" x 2 1/2" x 3/16".

Solera de 3/16" x 1 1/2".

El material es acero A-36.

Tendrá cuatro anclas de placa de 1/4" con dos tornillos cada ancla. El croquis se muestra en la figura 17. Todo el soporte estructural y las paredes de la torre estarán protegidos con un recubrimiento anticorrosivo.

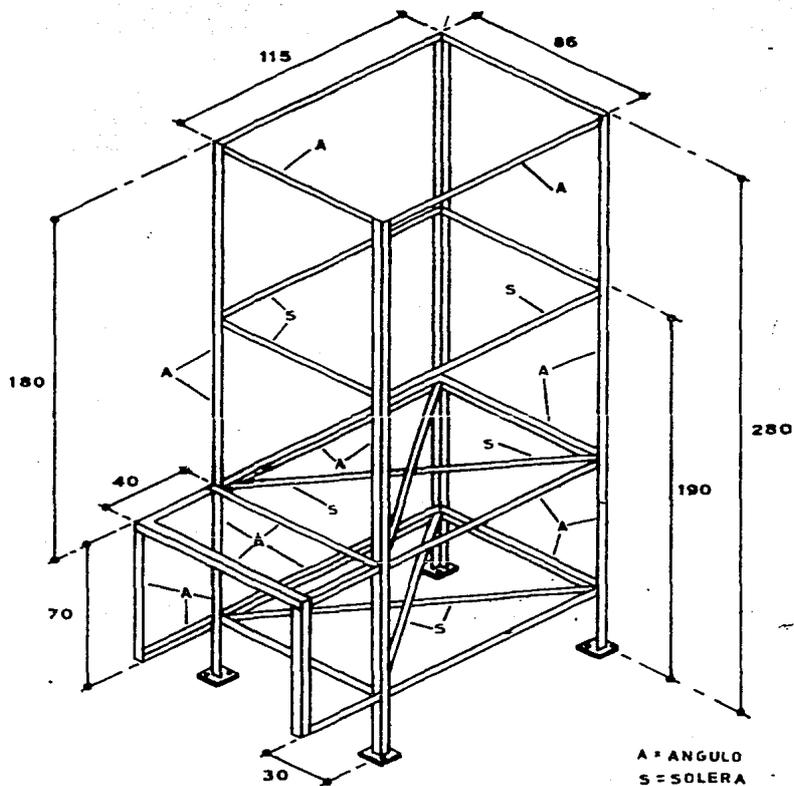
Construcción de la charola distribuidora.

El sistema distribuidor será del tipo por gravedad, consiste en una charola perforada cuyas dimensiones se muestran en la figura 18, el material de construcción será fibra de vidrio, debido a las mismas razones por las cuales se eligió el material de construcción para el basín.

El número de orificios se calculó en base al flujo manejado para de esta manera, asegurar una distribución adecuada del agua en toda el área transversal de la torre, el número y diámetro de los orificios fueron 20 de 1/8".

La geometría de la charola fue elegida de manera similar a

FIG. 17 SOPORTE ESTRUCTURAL DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO

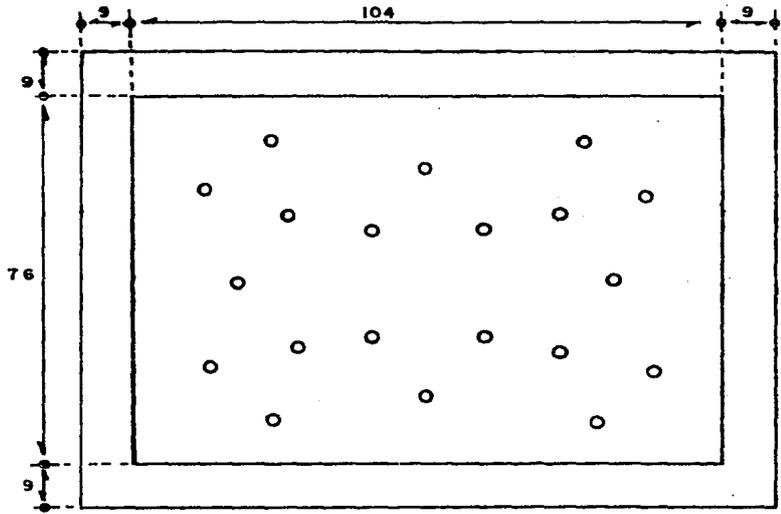


ESC.: 1:25

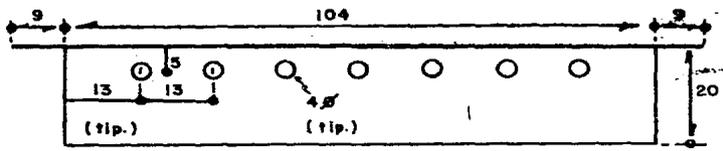
ACOT. EN CMS.

FIG. 18

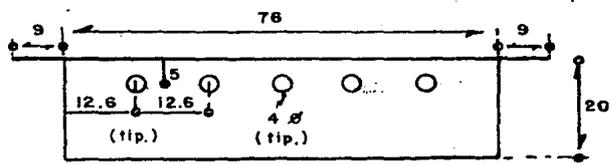
DISTRIBUIDOR



PLANTA



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL

la del prototipo experimental, dada la eficiencia observada.

Construcción del eliminador de niebla.

La geometría del eliminador de niebla fue tomada en base al usado en el prototipo experimental, el material de construcción será acrílico con relieves hexagonales (Fig. 19), este se fijará a la charola por medio de tornillos, tuercas y rondanas.

Colocación de las paredes.

Las paredes serán de placa de asbesto-cemento y estarán fijadas al soporte de la torre por medio de tuercas, tornillos y rondanas. La parte inferior de estas paredes corresponderá al nivel superior del agua en el basin, con el fin de no presentar pérdidas de aire en esa parte, estarán protegidas con un recubrimiento anticorrosivo

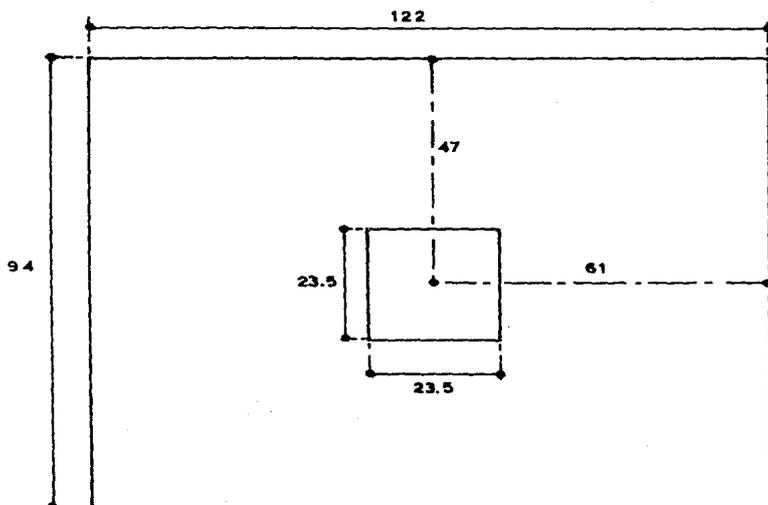
Construcción del dado de concreto para soporte del ventilador.

El ventilador estará soportado de manera independiente de la torre, por medio de un dado de concreto, esto es con el fin de evitar vibraciones que pudieran afectar la estabilidad del cuerpo de la torre. El dado tendrá una altura de 55 cm y una área de 30 x 30 cm, a este dado estará fijado el ventilador por medio de un ancla con cuatro tornillos.

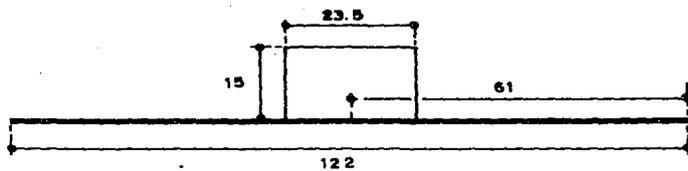
El ventilador estará colocado a un lado de la torre como lo indica la figura 20, de manera que pueda introducir el aire

FIG. 19

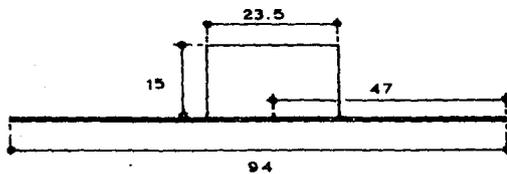
ELIMINADOR DE NIEBLA



PLANTA



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL

en la parte inferior de la torre.

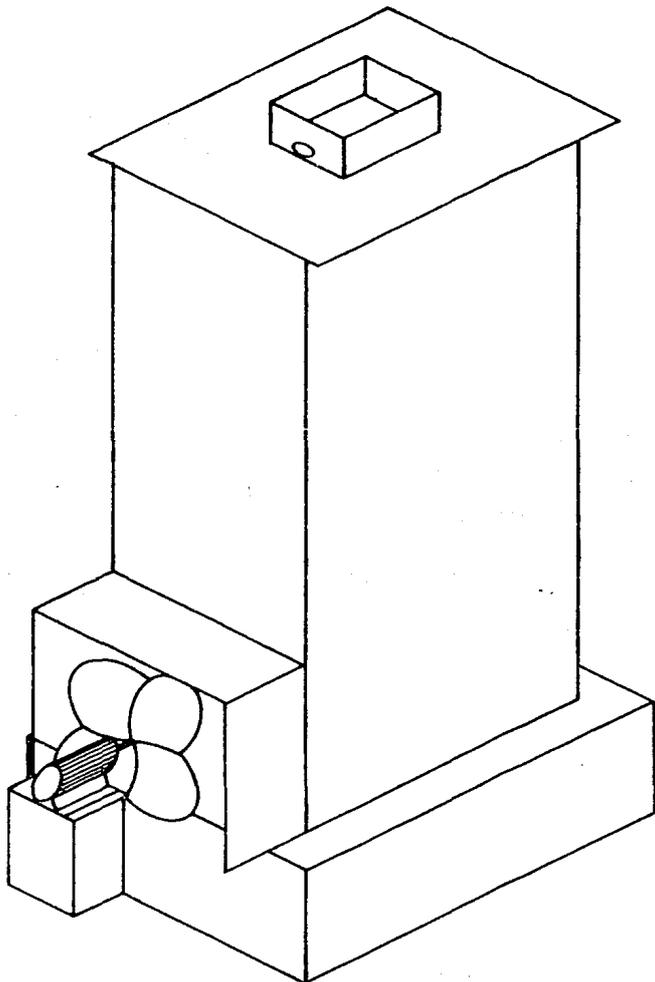
Colocación del empaque.

Las rejillas de empaque requieren de una colocación especial ya que la experimentación y el diseño fue realizado para este arreglo, se debe de asegurar que el ángulo de colocación sea el mismo que el utilizado en el prototipo para garantizar el funcionamiento previsto en el diseño.

En este tipo de arreglo, las rejillas de empaque se autosoportan y no requieren de redistribuidores.

La apariencia de la torre de enfriamiento ya construida para la planta piloto, será como se muestra en la figura 20.

FIG. 20 ISOMETRICO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO



S./E.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

En base a los objetivos propuestos en el presente trabajo se concluyen los siguientes aspectos:

En el diseño y construcción de la torre de enfriamiento, se utilizaron al máximo los recursos disponibles en CIDESI, cumpliendo así las políticas interiores dentro de un marco de menor inversión.

Para el arreglo y tipo de empaque instalado en la torre de enfriamiento se encontró mediante la experimentación una ecuación característica, la cual relaciona el NUT con los flujos manejados; la ecuación encontrada fue la siguiente:

$$K_y a Z/L' = 0.08 + A N (L'/G')^{-0.3}$$

Donde:

0.08 corresponde al NUT por efectos terminales.

0.3 corresponde al valor de "n".

En lo que respecta al valor de la constante "A" de la ecuación anterior, se encontró una variación con respecto a la altura de la sección empacada, mientras que en la referencia 17 se mantiene constante; sin embargo esta variación fue encontrada en base a resultados experimentales, obtenidos con las siguientes condiciones de operación:

Alturas de la sección empacada ; 0.55, 0.70, 0.85 y 1.0
(m.).

Relación de flujos manejados ; 0.9687, 0.3939 y 0.2518
(Kg/m² s.).

Los valores de la relación de flujos manejados en el presente trabajo, fueron definidos en base a disponibilidad del equipo experimental, y se consideran bajos en comparación con los usados en la investigación de la referencia 17, los cuales están en un intervalo de 0.59 a 3.51; sin embargo los valores menores de las relaciones L'/G' manejadas en el presente trabajo, aseguran una diferencia de concentraciones entre las fases, adecuada para efectuar el proceso de enfriamiento.

La ecuación encontrada de manera experimental funciona como un parámetro de escalamiento y es posible a partir de un estudio previo, realizar un escalamiento de este equipo a un nivel industrial mediante el uso de dicha ecuación.

Mediante la ecuación característica se encontraron valores de NUT, los cuales fueron mayores que los valores de NUT requeridos por bases de diseño, por lo tanto, se puede afirmar que teóricamente la torre de enfriamiento diseñada podrá remover la carga térmica requerida.

Recomendaciones :

1.-Debido a que el NUT depende tanto del flujo del agua como del flujo de aire, se sugiere para estudios posteriores, variar el flujo de aire al igual que el flujo de agua, en el prototipo experimental.

2.-Para elevar el valor de la relación L'/G' se recomienda usar una bomba de mayor capacidad en el prototipo experimental.

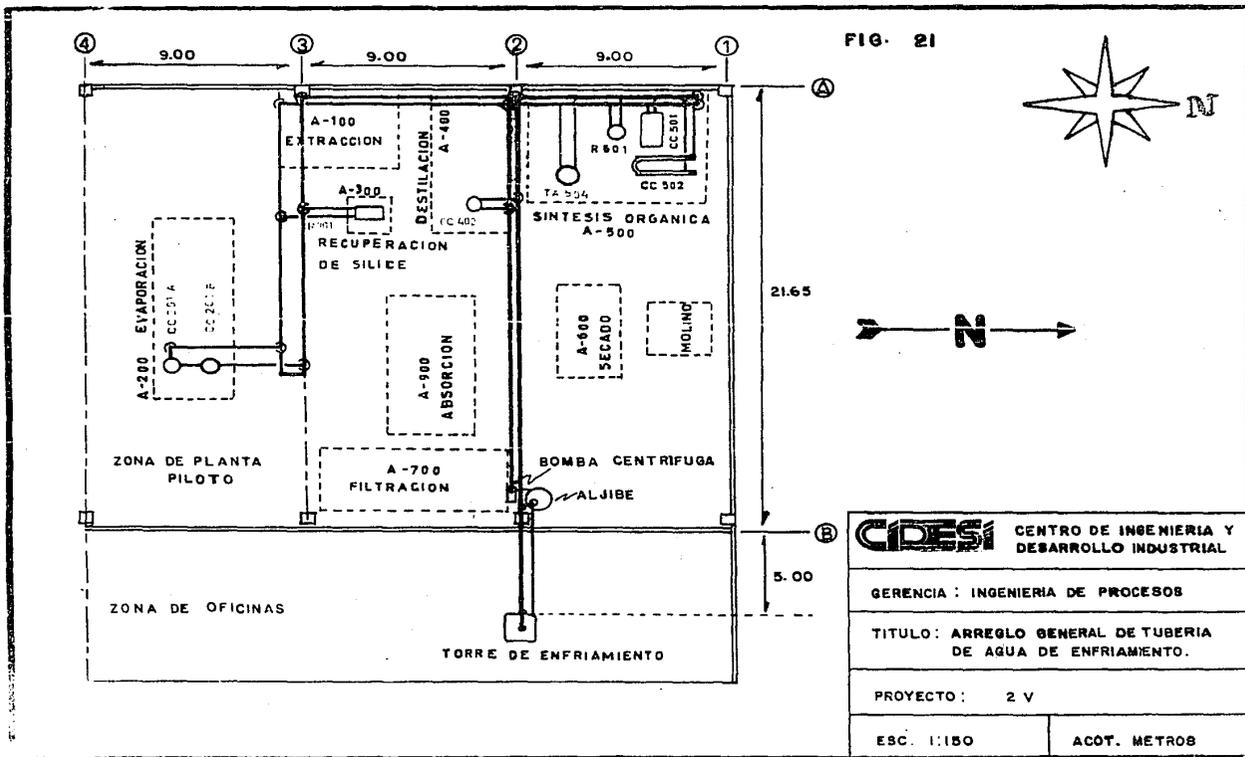
3.-Es recomendable que las velocidades máxicas manejadas en la fase experimental, se conserven para la escala piloto.

4.-Para asegurar la remoción de la carga térmica requerida, el equipo se debe operar dentro de valores de relación L'/G' manejadas en el presente trabajo, por tanto es necesario que para la torre de enfriamiento de la planta piloto se verifique el flujo de aire, y en caso de ser necesario, ajustar el ángulo de las aspas del ventilador para que proporcione el flujo de aire necesario.

5.-Se recomienda que se realicen análisis del agua de enfriamiento cada mes, esto con el fin de asegurar un funcionamiento adecuado del sistema.

6.-En base al arreglo general de tuberías de servicio y a la dirección de los vientos dominantes, se recomienda la ubicación de la torre de enfriamiento en la azotea del edificio 5, sobre el área de oficinas, a un costado del área de la planta piloto.

La ubicación de la torre de enfriamiento con respecto a los estanques de la planta piloto, se muestran en la figura 21.



El diseño de la torre de enfriamiento para la planta piloto del CIDESI, prevee movimientos futuros, facilidad de construcción, de instalación y de mantenimiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1.- BACKHURT, J.R. PROBLEMAS SOBRE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA. MEXICO : EL MANUAL MODERNO, 1979. 349 p.
- 2.- BECERRA, HECTOR J., RAUL H. ABRAJAN. DISEÑO DE RECIPIENTES DE PROCESO. ZACATECAS, MEXICO : AZTECA, 1985.
- 3.- CAPLAN, F. " NOMOGRAM DETERMINES BLOWDOWN AND MAKEUP REQUIREMENTS FOR COOLING TOWERS ". p 58. EN POWER ENGINEERING, (JULY, 1974).
- 4.- COOLING TOWER INSTITUTE. CTI CODE TOWERS : STANDARD SPECIFICATIONS. UNITED STATES : CTI, 1958.
- 5.- CRANE. FLOW OF FLUIDS THROUGH VALVES FITTINGS AND PIPE. NEW YORK : CRANE.
- 6.- FOUST, A.S. PRINCIPIOS DE OPERACIONES UNITARIAS. 12a ED. MEXICO : CECSA, 1979. 704 p.
- 7.- FULLER, A.L. " COMPUTER EVALUATES COOLING TOWERS ". p 211-214. EN PETROLEUM REFINER. VOL. 35, No. 12. (DECEMBER, 1956).
- 8.- FULLER, A.L., A.L. KOHL AND E. BUTCHER. " A NEW PLASTIC PACKING FOR COOLING TOWERS ". p 501-505. EN CHEMICAL ENGINEERING PROGRESS. VOL. 53, No. 10. (OCTOBER, 1957).

- 9.- GONZALEZ, N. ANGEL, ANTONIO VALIENTE B. PRACTICAS DE LABORATORIO DE TRANSFERENCIA DE MASA. MEXICO : UNAM, 1985. 207 P.
- 10.-HOLIDAY, ALLAN D. " CONSERVING AND REUSING WATER ". p 118-137. EN CHEMICAL ENGINEERING. VOL. 89. No. 8. (APRIL, 1982).
- 11.-JHONSTONE, ROBERT E. THE PILOT PLANTS, MODELS AND SCALE-UP METHODS IN CHEMICAL ENGINEERING. NEW YORK : MC.GRAW HILL 1957. 307 p.
- 12.-KERN, DONALD G. PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR. MEXICO: CECSA, 1981. 980 p.
- 13.-LOWENSTEIN, JACK G. "THE PILOT PLANT". p 62-72. EN CHEMICAL ENGINEERING. VOL.92, No. 23. (DECEMBER, 1985).
- 14.-LUDWIG, ERNEST E. APPLIED PROCESS DESIGN FOR CHEMICAL AND PETROCHEMICAL PLANTS. 2a. ED. HOUSTON : GULF PUBLISHING CO., 1983. 3 V.
- 15.-MARKS. MANUAL DEL INGENIERO MECANICO. 8a. ED. MEXICO : MC. GRAW HILL, 1985. 3 V.
- 16.-MATAIX,CLAUDIO. MECANICA DE FLUIDOS Y MAQUINAS HIDRAULICAS. MEXICO : HARLA, 1969. 582 p.

- 17.-NEIL, W. KELLY AND LEONARD K. SWENSON. "COMPARATIVE PERFORMANCE OF COOLING TOWER PACKING ARRANGEMENTS". p 263-268. EN CHEMICAL ENGINEERING PROGRESS. VOL. 52, No. 7. (JULY, 1956).
- 18.-NORDEL, E. TRATAMIENTO DE AGUA PARA LA INDUSTRIA Y OTROS USOS. 2a. ED. MEXICO : CECSA, 1976. 641 p.
- 19.-NORMAN, W. S. ABSORPTION, DESTILLATION AND COOLING TOWERS. 2a. ED. GREAT BRITAIN : LONGMANS, 1962. 477 p.
- 20.-OCON, J. G., TOJO B.G. PROBLEMAS DE INGENIERIA QUIMICA Y OPERACIONES BASICAS. 3a. ED. MEXICO : AGUILAR, 1980. 2 V.
- 21.-PERRY, ROBERT H., CECIL H. CHILTON. MANUAL DEL INGENIERO QUIMICO. 5a. ED. MEXICO : MC. GRAW HILL, 1982.
- 22.-SHERWOOD, K. (ET. AL). MASS TRANSFER. UNITED STATES : MC. GRAW HILL, 1975. 677 p.
- 23.-TREYBAL, ROBERT E. OPERACIONES DE TRANSFERENCIA DE MASA. 2a. ED. MEXICO : MC. GRAW HILL, 1981. 858 p.

APENDICE

A.- TABLAS

- I.- EVALUACION DE LA ENTALPIA DEL SISTEMA AIRE-AGUA A LA PRESION DE 586 mm Hg.
- II.- EVALUACION DE LAS CONSTANTES "A" Y "n", PARA CADA TIPO DE TARIMA Y DIFERENTE ESPACIO VERTICAL DE LA MISMA TARIMA (REF. 17).
- III.- ANGULO DE LADOS IGUALES.
- IV.- SOLERA.

B.- CALCULOS

- 1.- PROGRAMA PARA EVALUAR EL NUMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA POR EL METODO DE MERKEL (REF. 7), POR MEDIO DE LA REGLA DE SIMPSON.
- 2.- CALCULO DEL AREA ESPECIFICA DEL PROTOTIPO EXPERIMENTAL.
- 3.- PROCEDIMIENTO PARA OBTENER EL VALOR DE LA CONSTANTE "n" DE LA ECUACION CARACTERISTICA PARA EL ESCALAMIENTO (EC.5).
- 4.- PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR EL SISTEMA DE BOMBEO.

C.- NOTAS

A. - TABLAS

TABLA I. - EVALUACION DE LA ENTALPIA DEL SISTEMA
AIRE-AGUA A LA PRESION DE 586 mm Hg.

T (°C)	P (mmHg)	$Y \times 10^{-3}$	$\frac{\text{Kg H}_2\text{O}}{\text{Kg A.S.}}$	H' $\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$
10	9.209	9.93		8.37
11	9.844	10.62		9.04
12	10.518	11.36		9.73
13	11.231	12.15		10.45
14	11.987	12.98		11.19
15	12.788	13.87		11.98
16	13.634	14.81		12.79
17	14.530	15.81		13.64
18	15.477	16.87		14.53
19	16.477	17.99		15.46
20	17.535	19.18		16.43
21	18.650	20.44		17.44
22	19.827	21.77		18.50
23	21.068	23.19		19.61
24	22.377	24.69		20.77
25	23.756	26.27		21.99
26	25.209	27.95		23.26
27	26.739	29.73		24.60
28	28.349	31.61		26.00
29	30.043	33.60		27.47
30	31.824	35.71		29.01
31	33.695	37.94		30.63
32	35.663	40.30		32.33
33	37.729	42.79		34.12
34	39.898	45.43		35.99
35	42.175	48.22		37.97
36	44.563	51.18		40.04
37	47.067	54.31		42.23
38	49.692	57.62		44.53
39	52.442	61.12		46.95
40	55.324	64.83		49.50
41	58.340	68.76		52.19
42	61.500	72.92		55.02
43	64.800	77.32		58.01
44	68.260	81.99		61.17
45	71.880	86.95		64.51
46	75.650	92.19		68.03
47	79.600	97.76		71.76
48	83.710	103.65		75.69

TABLA I (CONT.)

49	88.020	109.93	79.87
50	92.510	116.59	84.31
51	97.200	123.58	89.00
52	102.090	131.22	93.98
53	107.200	139.26	99.28
54	112.510	147.80	104.90
55	118.040	156.90	110.87
56	123.800	166.61	117.23
57	129.820	177.02	124.04
58	136.080	188.15	131.30
59	142.600	200.07	139.07
60	149.380	212.84	147.38
61	156.430	226.55	156.30
62	163.770	241.32	165.88
63	171.380	257.18	176.16
64	179.310	274.34	187.27
65	187.540	292.87	199.24
66	196.090	312.95	212.24
67	204.960	334.75	226.31
68	214.170	358.47	241.61
69	223.730	384.39	258.32
70	233.700	412.91	276.69
71	243.900	443.82	296.58
72	254.600	478.29	318.76
73	265.700	516.50	343.32
74	277.200	558.98	370.61
75	289.100	606.43	401.08

NOTA: Descripción de las variables.

T Temperatura, °C.

P Presión de vapor de agua, mm Hg.

Ys Humedad de saturación, Kg H₂O / Kg A.S.

H' Entalpía del aire saturado a la temperatura del agua,
Kcal/kg.

TABLA II.- EVALUACION DE LAS CONSTANTES "A" Y "n", PARA CADA TIPO DE TARIMA Y DIFERENTE ESPACIO VERTICAL DE LA MISMA TARIMA (REF. 17).

TARIMA	A	n
A	0.060	0.62
B	0.070	0.62
C	0.092	0.60
D	0.119	0.58
E	0.110	0.46
F	0.100	0.51
G	0.104	0.57
H	0.127	0.47
I	0.135	0.57
J	0.103	0.54

TABLA III.- ANENOS DE LADOS IGUALES

Angulo de lados iguales.



Sección Índice	Medida (in.)	Espesor (in.)	Peso por pie (lb)	Área de Sección (in. ²)	Eje 1-1 y Eje 2-2			Eje 3-3	
					<i>I</i> (in. ⁴)	<i>N</i> (in. ³)	<i>r</i> (in.)	<i>z</i> (in.)	<i>r</i> min (in.)
A 1 <i>R</i> = 3/8	8 x 8	1 1/4	56.9	16.73	98.0	17.5	2.12	2.11	1.33
		1	51.0	15.00	89.0	15.8	2.14	2.17	1.56
		7/8	15.0	13.23	79.6	11.0	2.15	2.12	1.56
		3/4	38.9	11.44	69.7	12.2	2.17	2.28	1.57
		5/8	32.7	9.61	59.1	10.3	2.19	2.23	1.58
		3/8	29.6	8.68	51.1	9.3	2.30	2.21	1.58
		1/2	26.1	7.75	18.6	8.1	2.51	2.19	1.58
A 2 <i>R</i> = 1/2	6 x 6	1	37.4	11.00	35.5	8.6	1.80	1.86	1.16
		3/4	33.1	9.73	31.9	7.6	1.81	1.82	1.17
		5/8	28.7	8.44	28.2	6.7	1.83	1.78	1.17
		3/8	21.2	7.11	21.2	5.7	1.84	1.73	1.17
		1/2	21.9	6.43	22.1	5.1	1.85	1.71	1.18
		3/4	19.6	5.73	19.9	4.6	1.86	1.68	1.18
		5/8	17.2	5.06	17.7	4.1	1.87	1.66	1.19
A 3 <i>R</i> = 1/2	5 x 5	3/8	14.9	4.36	15.4	3.5	1.88	1.64	1.19
		1/2	12.6	3.66	13.0	3.0	1.89	1.61	1.19
		3/4	27.2	7.98	17.8	5.2	1.49	1.57	0.96
		5/8	23.6	6.94	15.7	4.5	1.50	1.52	0.97
		3/8	20.0	5.86	13.6	3.9	1.52	1.48	0.97
		1/2	16.2	4.75	11.3	3.2	1.54	1.43	0.98
		5/8	14.3	4.18	10.0	2.8	1.55	1.41	0.98
A 4 <i>R</i> = 3/8	4 x 4	3/8	12.3	3.61	8.7	2.4	1.56	1.39	0.99
		1/2	10.3	3.03	7.4	2.0	1.56	1.36	0.99
		3/4	18.5	5.44	7.7	2.8	1.19	1.27	0.77
		5/8	15.7	4.61	6.7	2.4	1.20	1.23	0.77
		1/2	12.8	3.75	5.6	2.0	1.22	1.18	0.78
		3/8	11.3	3.31	5.0	1.8	1.23	1.16	0.78
		5/8	9.8	2.86	4.4	1.5	1.23	1.11	0.79
A 5 <i>R</i> = 3/8	3 1/2 x 3 1/2	3/8	8.2	2.40	3.7	1.3	1.21	1.12	0.79
		1/2	6.6	1.94	3.0	1.0	1.25	1.09	0.79
		5/8	11.1	3.25	3.6	1.5	1.06	1.06	0.68
		3/4	9.8	2.87	3.3	1.3	1.07	1.04	0.68
		1/2	8.5	2.48	2.9	1.2	1.07	1.01	0.69
		3/8	7.2	2.09	2.5	0.98	1.08	0.69	
		1/2	5.8	1.69	2.0	0.79	1.09	0.69	

TABLA III.- (CONT.)

Angulo de lados iguales. (cont.)



	(in.)	(in.)	(lb)	(in. ²)	<i>I</i> (in. ⁴)	<i>S</i> (in. ³)	<i>r</i> (in.)	<i>z</i> (in.)	<i>r</i> min (in.)
A 7 <i>R</i> = 3/8	3 x 3	1/2	9.4	2.75	2.2	1.1	0.90	0.93	0.58
		3/8	8.3	2.43	2.0	0.95	0.91	0.91	0.58
		1/2	7.2	2.11	1.8	0.83	0.91	0.89	0.58
		5/8	6.1	1.78	1.5	0.71	0.92	0.87	0.59
		1/2	4.9	1.44	1.2	0.58	0.93	0.84	0.59
		3/8	3.71	1.09	0.96	0.44	0.91	0.82	0.59
†A 9 <i>R</i> = 1/4	2 1/2 x 2 1/2	1/2	7.7	2.25	1.2	0.73	0.74	0.81	0.47
		3/8	5.9	1.73	0.98	0.57	0.75	0.76	0.48
		5/8	5.0	1.47	0.85	0.48	0.76	0.74	0.49
		1/2	4.1	1.19	0.70	0.39	0.77	0.72	0.49
		3/8	3.07	0.90	0.55	0.30	0.78	0.69	0.49
†A 11 <i>R</i> = 1/4	2 x 2	3/8	4.7	1.36	0.40	0.35	0.59	0.64	0.39
		5/8	3.92	1.15	0.42	0.30	0.60	0.61	0.39
		1/2	3.19	0.94	0.35	0.25	0.61	0.59	0.39
		3/8	2.44	0.71	0.28	0.19	0.62	0.57	0.40
		1/2	1.65	0.48	0.19	0.13	0.63	0.55	0.40
†A 12 <i>R</i> = 1/4	1 3/4 x 1 3/4	3/8	3.99	1.17	0.31	0.26	0.51	0.57	0.34
		5/8	3.39	1.00	0.27	0.23	0.52	0.55	0.34
		1/2	2.77	0.81	0.23	0.19	0.53	0.53	0.34
		3/8	2.12	0.62	0.18	0.14	0.54	0.51	0.35
		1/2	1.44	0.42	0.13	0.10	0.55	0.48	0.35
†A 13 <i>R</i> = 3/8	1 1/2 x 1 1/2	1/2	2.34	0.69	0.14	0.13	0.45	0.47	0.29
		3/8	1.80	0.53	0.11	0.10	0.46	0.44	0.29
		1/2	1.23	0.36	0.08	0.07	0.46	0.42	0.30
†A 15 <i>R</i> = 3/8	1 1/4 x 1 1/4	1/2	1.92	0.56	0.08	0.09	0.37	0.40	0.24
		3/8	1.48	0.43	0.06	0.07	0.38	0.38	0.24
		1/2	1.01	0.30	0.04	0.05	0.38	0.35	0.25
†A 16 <i>R</i> = 1/2	1 x 1	1/2	1.49	0.44	0.04	0.06	0.29	0.34	0.19
		3/8	1.16	0.34	0.03	0.04	0.30	0.32	0.19
		1/2	0.80	0.23	0.02	0.03	0.31	0.30	0.19

* Medida especial.

† Tamaño de barra.

NOTA: Las relaciones de la tabla, son proporcionadas por la referencia 2, utilizadas para seleccionar el perfil estructural para la torre de enfriamiento de la planta piloto.

TABLA IV. - SOLERA

SOLERA

PULGADAS		MILIMETROS		KILOS POR METRO
1/8	x 1/2	3.2	x 12.7	0.317
	x 5/8		x 15.9	0.396
	x 3/4		x 19.1	0.474
	x 1		x 25.4	0.633
	x 1 1/4		x 31.7	0.791
	x 1 1/2		x 38.1	0.950
	x 2		x 50.8	1.266
	x 2 1/2		x 63.5	1.583
	x 3		x 76.2	1.899
3/16	x 1/2	4.8	x 12.7	0.474
	x 5/8		x 15.9	0.593
	x 3/4		x 19.1	0.712
	x 1		x 25.4	0.950
	x 1 1/4		x 31.7	1.187
	x 1 1/2		x 38.1	1.424
	x 2		x 50.8	1.899
	x 2 1/2		x 63.5	2.374
	x 3		x 76.2	2.849
1/4	x 1/2	6.3	x 12.7	0.633
	x 5/8		x 15.9	0.791
	x 3/4		x 19.1	0.950
	x 1		x 25.4	1.266
	x 1 1/4		x 31.7	1.583
	x 1 1/2		x 38.1	1.899
	x 2		x 50.8	2.532
	x 2 1/2		x 63.5	3.165
	x 3		x 76.2	3.796
	x 3 1/2		x 88.9	4.431
	x 4		x 101.6	5.064
	5/16		x 1	7.9
x 1 1/4		x 31.7	1.978	
x 1 1/2		x 38.1	2.374	
x 2		x 50.8	3.165	
x 2 1/2		x 63.5	3.957	
x 3		x 76.2	4.748	
x 4		x 101.6	6.331	

TABLA IV (CONT.)

3/8	x	1	9.5	x	25.4	1.899
	x	1 1/4		x	31.7	2.376
	x	1 1/2		x	38.1	2.849
	x	2		x	50.8	3.798
	x	2 1/2		x	63.5	4.748
	x	3		x	76.2	5.698
	x	3 1/2		x	88.9	6.647
	x	4		x	101.6	7.597
1/2	x	1	12.7	x	25.4	2.532
	x	1 1/4		x	31.7	3.165
	x	1 1/2		x	38.1	3.798
	x	2		x	50.8	5.064
	x	2 1/2		x	63.5	6.331
	x	3		x	76.2	7.597
	x	3 1/2		x	88.9	8.863
	x	4		x	101.6	10.125
5/8	x	1	15.9	x	25.4	3.165
	x	1 1/4		x	31.7	3.957
	x	1 1/2		x	38.1	4.748
	x	2		x	50.8	6.331
	x	2 1/2		x	63.5	7.913
	x	3		x	76.2	9.496
	x	3 1/2		x	88.9	11.079
	x	4		x	101.6	12.661
3/4	x	1 1/2	19.1	x	38.1	5.698
	x	2		x	50.8	7.597
	x	2 1/2		x	63.5	9.496
	x	3		x	76.2	11.395
	x	4		x	101.6	15.194
1	x	2	25.4	x	50.8	10.129
	x	2 1/2		x	63.5	12.661
	x	3		x	76.2	15.194
	x	4		x	101.6	20.258

NOTA: Tabla proporcionada por el proveedor de Ferro Centro RGC., para seleccionar el tipo de solera a utilizar en la estructura de la torre de enfriamiento de la planta piloto.

B. - CALCULOS

1.- PROGRAMA PARA EVALUAR EL NUMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA POR EL METODO DE MERKEL (REF. 7), POR MEDIO DE LA REGLA DE SIMPSON.

El siguiente programa fue realizado con el objetivo de evaluar el NUT correspondiente a la fase experimental y al NUT Requerido por bases de diseño, utilizando una computadora "APPLE IIe".

```
80 READ A
90 READ B
100 READ N
105 READ Y1,Y2
106 X1 = (B - A) / N
109 FOR I = 1 TO (B - A) / X1 - 0.5
110 READ Y
120 IF I / 2 = INT (I / 2) THEN 150
130 C = C + Y
140 GOTO 160
150 D = D + Y
160 NEXT I
170 IN = X1 * (Y1 + 4 * C + 2 * D + Y2) / 3
180 PRINT "EL VALOR DE LA INTEGRAL ES = ";IN
200 END
```

Con los datos de las bases de diseño y la relación (L'/G')

de 0.32949, se obtiene por medio de este programa (como ejemplo), el valor de NUT Requerido de 0.5632.

2.- CALCULO DEL AREA ESPECIFICA DEL PROTOTIPO EXPERIMENTAL.

Se consideraron los mismos aspectos para el cálculo del área específica tanto del prototipo experimental como para la torre de enfriamiento de la planta piloto, por lo que a continuación se describirá el procedimiento para el prototipo experimental.

Datos:

Dimensiones del empaque del prototipo experimental:

16.0 cm x 16.0 cm.

Área de un cuadro (figura geométrica del empaque):

4.4 cm².

Area del bisel (figura geométrica del empaque):

0.2 cm x 1.3 cm = 0.26 cm².

Considerando el área total de la rejilla, el número de rejillas (18) para la altura de empaque correspondiente y el volumen del prototipo experimental, se obtiene el área específica de 0.35 1/m.

De la misma forma, se calculó el área específica para la torre de enfriamiento de la planta piloto, considerando las dimensiones de esta y las de la rejilla a utilizar obteniendo así una área específica de 0.345 1/m.

3.- PROCEDIMIENTO PARA OBTENER EL VALOR DE LA CONSTANTE "n"
DE LA ECUACION CARACTERISTICA PARA EL ESCALAMIENTO
(EC. 5).

De la ecuación 2 ($K_y a V/L' = 0.07 + AN (L'/G')^n$), se sacan logaritmos, se eligen dos valores de NUT de la tabla 2 para sustituirse en esta ecuación con las relaciones de L'/G' correspondientes y seleccionando el método de ecuaciones simultáneas, se procede a obtener el valor de la constante "n".

Ejemplo:

Datos:

Flujo de aire másico manejado: 2.94 Kg/m²s.

Flujo de agua másico: 0.3939 Kg/m²s.

Flujo de agua másico: 0.2518 Kg/m²s.

Altura de empaque (Z 4): 0.55 m.

Valores de NUT de la tabla 2: 0.2555 y 0.2925.

Efectuando el procedimiento descrito, queda sintetizado de la siguiente forma:

$$\frac{0.2555}{0.2925} = (1.5643)^{-n}$$

$$n = 0.3022$$

De esta manera se obtiene el valor de "n", para cada valor de NUT correspondiente a la altura de empaque manejada, para obtener un valor promedio de 0.3007.

4.- PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR EL SISTEMA DE BOMBEO.

El cálculo del sistema de bombeo fue analizado para los sistemas que presentan mayor caída de presión y los que se encuentran más lejanos del sistema de bombeo.

El análisis de la red de distribución se efectuó en base a Teoremas de Bernoulli, para los diferentes dibujos isométricos, llegando a la siguiente ecuación general:

$$h = \left[\left(\frac{\Delta P}{\rho} \right)_{\text{eq.}} + \Sigma F \right] (g/gc) + Z$$

Donde: h Cabezal, ft.

ΣF Pérdidas por fricción, $\overline{\text{lb ft/lb}}$.

$\frac{\Delta P}{\rho}$ Caída de presión en los equipos, $\overline{\text{lb ft/lb}}$.

Z Altura desde la descarga de la bomba a la parte superior de la torre de enfriamiento, ft.

g Aceleración de la gravedad, ft/s .

gc Factor de conversión, fuerza-masa.

La presión de descarga para la bomba se conformó en base a la caída de presión presentada por los equipos del área 500, por ser esta la que presenta mayor caída de presión y encontrarse más alejada del sistema de bombeo.

Se presentará a continuación los resultados calculados para la descarga:

Zona 500

$$\left(\frac{\Delta P}{\rho}\right)_{eq.} \text{ (caída de Presión } \overline{\text{lb ft/ lb}})$$

CC-501	4.6
TA-504	2.77
R-501	7.38×10^{-4}
CC-502	0.007

Pérdidas por fricción : $(\Sigma F)_{desc.} = 172.96 \overline{\text{lb ft/lb.}}$

Altura: $Z = 28.864 \text{ ft.}$

Cabezal de descarga: $h_{desc.} = 209.2 \text{ ft.}$

Para el cálculo a la succión el Teorema de Bernoulli es el siguiente:

$$h_{succ.} = Z - \Sigma F (g/gc).$$

Obteniendose los siguientes resultados:

$$\Sigma F = 0.2862 \text{ ft.}$$

$$Z = 5.2480 \text{ ft.}$$

$$h_{succ.} = 4.9619 \text{ ft.}$$

Teniendo como cabeza hidrostática a la presión de succión y a la descarga, se puede obtener la cabeza necesaria para el sistema de bombeo de la siguiente manera:

$$\Delta h = h_{desc.} - h_{succ.}$$

Dando por resultado un cabezal total de 224.664 ft. (68.5 m),

con un factor de seguridad del 10 % .

Por lo que la potencia necesaria calculada para el sistema de enfriamiento es la siguiente:

$$HP = \frac{GPM \Delta h Sg}{\eta \cdot 3956}$$

Donde: GPM Galones por minuto manejados.

Δh Cabezal, ft.

Sg Gravedad específica.

η Eficiencia (de la curva de la bomba en el punto de operación, 37 %).

Obteniendose una potencia de 5 HP.

Para el cálculo del NPSH, se consideran los siguientes aspectos:

$$NPSH = \left[\frac{P_{succ.} - P}{\rho_{succ.}} \right] + \Sigma F_{succ.} (g/gc) + Z$$

Donde: $P_{succ.}$ Presión a la succión.

P Presión de vapor de agua a la temperatura de succión.

$\Sigma F_{succ.}$ Sumatoria de fricciones a la succión.

Z Altura.

ρ Densidad.

Obteniendo los siguientes resultados:

$$P = 0.0432 \text{ Kg/cm}^2.$$

$$P_{succ.} = 0.0908 \text{ Kg/cm}^2 \text{ (2.9938 lb ft/lb)}.$$

$$\rho = 994.7345 \text{ Kg/cm}^3.$$

$$\Sigma F_{\text{succ.}} (\text{g/gc}) = 0.0872 \text{ m (0.2862 ft).}$$

$$Z = 1.61 \text{ m (5.248 ft).}$$

Dando un NPSH disponible de 1.7 m.

EL NPSH requerido se obtiene de la figura 15, considerando los siguientes aspectos::

- el flujo de agua de 35 GPM.
- el cabezal de descarga en metros.

Dando un NPSH Req. de 1.5 m.

C.- NOTAS

1.- Los datos climatológicos para bases de diseño se obtuvieron de la Dirección General del Servicio Meteorológico Nacional, localizada en Tacubaya D.F.

2.- Para cada altura de la sección empacada (Z) del prototipo experimental (tabla 2), se utilizaron las siguientes rejillas:

Z	Número de Rejillas
1.0 m.	25
0.85 m.	22
0.70 m.	18
0.55 m.	16
0.39 m.	11

3.- Varios aspectos del tratamiento químico del agua para la torre de enfriamiento de la planta piloto, fueron proporcionados por QUIMICA ECOTEC, S.A. DE C.V. y algunos otros proveedores.

4.- EL análisis químico del agua de repuesto para el sistema de enfriamiento fue proporcionado por el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial.