



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Química

31

Modelo para el Diseño Preliminar de Torres de Enfriamiento de Tiro Natural



T E S I S

Que para obtener el título de:

INGENIERO QUIMICO

p r e s e n t a :

José Antonio Martínez Nii

1979



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

CLAS TESIS 1979
LBO M.C.
FECHA 215
REC _____



PRESIDENTE: Ing. Roberto Andrade Cruz
VOCAL: Ing. Antonio Frias Mendoza
SECRETARIO: Ing. Rafael Garcia Nava
1er SUPLENTE: Ing. Enrique Bravo Medina
2o SUPLENTE: Ing. Víctor Flores Zavala

**Sitio donde se desarrolló el tema: INSTITUTO MEXICANO
DEL PETROLEO**

Sustentante: José Antonio Martínez Nii

Asesor del tema: Ing. Antonio Frias Mendoza

In Memoriam

A mi padre

Con cariño para

Mi madre

Mi esposa Esperanza

Mi hija Cynthia

Mis hermanas

Mis amigos

Mis compañeros

Muchas gracias a

La Facultad de Química

El Instituto Mexicano del
Petróleo

Sr. Juan Cabrera Muñoz

INDICE

1. INTRODUCCION

1.1 Objetivos

1.2 Generalidades

1.3 Conceptos Generales

2. DESARROLLO DEL MODELO

2.1 Introducción

2.2 Carta psicrométrica

2.3 Mecanismos de Transferencia de Masa y Calor

2.4 Coeficientes de Transferencia de Masa

2.5 Caída de Presión

2.6 Chimenea o tiro

2.7 Modelo

2.8 Ejemplos

2.9 Programa

3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

3.1 Resultados

3.2 Situación de las torres de enfriamiento de tiro natural en México

3.3 Conclusiones

INDICE DE LAMINAS

- 2.2.1.1 Diagrama Humedad-Temperatura
- 2.2.2.1 Diagrama Entalpía-Temperatura
- 2.2.4.1 Diagrama Volumen-Temperatura
- 2.2.5.1 Diagrama Calor Húmedo-Humedad
- 2.2.6.1 Líneas de Saturación Adiabática
- 2.3.1 Transferencia de Masa y Calor I
- 2.3.2 Transferencia de Masa y Calor II
- 2.3.3 Transferencia de Masa y Calor III
- 2.3.4 Transferencia de Masa y Calor IV
- 2.4.1 Tipos de Empaques
- 2.6.1 Tiro Hiperbólico
- 2.6.2 Comparación de Perfiles
- 2.7.1.1 Relaciones Líquido/Vapor
- 2.7.2.1 Integración Numérica de NTU
- 2.7.7.1 Datos Gráficos de N_p
- 2.7.7.2 Determinación Gráfica de N_p
- 2.8.1.1 Líneas de Equilibrio y de Operación
- 2.8.7.1 Determinación de Caída de Presión
- 2.9.1 Diagrama de Flujo

1. INTRODUCCION

1.1 Objetivos

Uno de los aspectos más utilizados en la industria en general es el referente a los servicios auxiliares, y uno de los más importantes es el agua de enfriamiento. De la información en la literatura sobre el tema, la gran mayoría se refiere a su reutilización por medio de torres de enfriamiento de los tipos de tiro inducido y flujo cruzado, dado que es el modelo más difundido, y por ello, más estudiado. Sin embargo, se observa que en países más limitados de recursos naturales como los europeos, se hacen competentes y favoritas a las torres de tiro natural, y que en los Estados Unidos se están construyendo cada vez más torres de este tipo, se hace tomar consideración sobre la importancia de las torres de enfriamiento de tiro natural, lo que se dificulta por la escasez de información disponible.

En este trabajo, se presentan conceptos y métodos de cálculo que pueden simplificar el trabajo de considerar una torre de tiro natural dentro de las alternativas en el diseño de los servicios auxiliares de una planta o complejo.

Además de los términos que se tratan brevemente, se desarrolló un modelo que permite el dimensionamiento preliminar de la torre en cuanto a diámetro de la sección empacada, así como las alturas de empaque y tiro. Asimismo, se encuentra un programa de computadora que efectúa este diseño, y al que es necesario suministrarle condiciones ambientales y datos de diseño, o sea, presión atmosférica, temperaturas de bulbo húmedo y seco, gasto de agua, rango de enfriamiento, y tipo de em

paque a utilizar.

Un aspecto importante es el cálculo de propiedades físicas y termofísicas del sistema aire-agua, proporcionadas normalmente por una carta psicrométrica, y que el programa genera dentro de rangos de incertidumbre similares o menores a los acarreados al leer directamente de una gráfica.

Resumiendo, este trabajo pretende ser una guía para lo que son las operaciones aire-agua, desde un punto de vista práctico y funcional, con un tema central poco estudiado e interésante.

1.2 Generalidades

Las torres de enfriamiento de tiro natural funcionan basadas en el principio de que al calentarse el aire por el agua, le disminuye la densidad, por lo que se produce un gradiente de densidades y con ello un tiro hacia arriba. Los costados de la torre están completamente cerrados desde la entrada cerca de la base hasta la salida en la parte superior. El empaque está confinado en una sección relativamente pequeña de la torre, y la mayor parte de la estructura es la necesaria para producir el tiro. Esta estructura es generalmente de concreto armado en forma hiperbólica, aunque no hay evidencia de que ésta sea la forma óptima. La chimenea está soportada en piernas que permiten el acceso libre del aire en la base.

El intercambio térmico toma lugar entre el aire que asciende y el agua que cae, por lo que el empaque tiene el propósito de incrementar el tiempo de contacto al detener la caída del agua y distribuirla como en un sistema de irrigación.

El tiro en este tipo de torres es creado, como ya se dijo por la elevación del aire que resulta de su calentamiento. El tiro a carga total está comunmente en la región de 0.2 pulgadas de agua (0.007 psi), y la velocidad media del aire sobre el empaque está en el rango de 3.5 a 4.5 ft/s.

Las torres de tiro natural, como todo, tienen sus ventajas y sus desventajas, y la elección deberá hacerse considerando varios aspectos. Si se comparan estas torres con las de tiro inducido, se encuentra que su servicio es similar, la altura de bombeo es de 50 ft aproximadamente en ambos casos; a partir de esto, las diferencias se encuentran en la tabla - -

1.2.1.

Es necesario aclarar algunas creencias acerca de las torres de tiro natural, que pueden formar una idea equivocada de su funcionamiento, por lo que a continuación se encuentran algunos de estos mitos, y su realidad.

- No pueden operar en climas calientes: hay torres operando en Florida y la India.

- No pueden operar en climas fríos: hay torres operando en Inglaterra y Michigan.

- No pueden usar agua de mar: hay una en funcionamiento, más otras en diseño y construcción en Estados Unidos.

- No pueden funcionar en lugares con vientos fuertes: las hay que operan con vientos casi normales de 160 km/h, y extremos de 200 km/h.

- Pueden caer sobre la planta y destruirla: no se ha dado el caso de algún accidente de este tipo, y no hay forma dentro de lo normal para que esto pueda ocurrir.

- Hay efectos del clima por la elevada altura de la descarga: largos estudios han revelado que los efectos son inexistentes o despreciables.

La razón principal del reciente interés en las torres de enfriamiento de tiro natural es puramente económico. El costo de energía es mucho mayor para los tipos inducido y forzado, y la inflación afecta grandemente este costo, mientras que para el tiro natural es mínimo el efecto de la inflación, hecho fundamental que ocasiona sea la elección para plantas futuras.

CARACTERISTICAS	TIRO NATURAL	TIRO FORZADO
Tipo de energía	Energía natural	Energía eléctrica y mecánica.
Tamaño	100 a 400 ft	Módulos de 60 ft
Formación de niebla	Casi inexistente	Recirculación, niebla local y heladas
Costos de instalación	2 en una base arbitraria	1 con la misma base
Costos de operación	Ahorro del 1% de la energía total de una planta para los accionadores de los ventiladores	Ningún ahorro
Costos de mantenimiento	Mínimos	Partes móviles, como accionadores, ventiladores y transmisiones
Facilidad de Operación	Menos susceptibles a errores humanos	Menos resistentes al hielo
Localización	Muy flexibles	Efectos ecológicos

TABLA 1.2.1

1.3 Conceptos generales

A continuación daremos una lista de términos y conceptos utilizados en el trabajo con una breve explicación.

Humedad absoluta: se define como la cantidad de vapor de agua que lleva consigo una unidad de aire seco a unas condiciones dadas. Depende de la presión parcial del agua y de la presión total del sistema. Sus unidades son lb agua/lb aire seco.

Humedad de saturación: aire saturado es aquél en el cual el vapor del material condensable, en nuestro caso agua, se encuentra en equilibrio con agua líquida a la temperatura del aire, o sea que la presión parcial del vapor de agua en el aire es igual a la presión del vapor de agua a la temperatura del aire.

Humedad por ciento: es la relación que existe entre el peso del agua en una unidad de aire seco y el peso del agua que llevaría la unidad de aire seco en condiciones de saturación a la misma presión y temperatura.

Humedad relativa: es la relación de presión parcial del vapor de agua en la mezcla entre la presión del agua líquida a la misma temperatura, o la presión parcial de vapor de agua en aire saturado a esta temperatura, en una base por ciento.

Volumen húmedo: es el volumen total de una unidad de masa de aire con su vapor de agua acompañante, con las unidades de ft³/lb de aire seco.

Volumen saturado: es el volumen de una unidad de masa de aire seco más el vapor de agua necesario para saturarlo.

Calor húmedo: es la cantidad de calor necesaria para va--

riar la temperatura de una libra de aire seco más el agua que contenga un grado F.

Entalpía: es la cantidad de calor de una unidad de aire - seco más el contenido de calor del vapor de agua que forman - la mezcla, y se expresa en BTU/lb de aire seco.

Temperatura de rocío: es la temperatura a la cual una mezcla aire-agua se debe de enfriar a humedad constante para que se sature. Por lo tanto, el punto de rocío de un aire saturado es igual a la temperatura de éste.

Temperatura de bulbo seco: es la temperatura del aire ambiente medida con un termómetro común.

Temperatura de bulbo húmedo: es la temperatura a régimen permanente del no-equilibrio que alcanza una pequeña cantidad de agua sumergida bajo condiciones adiabáticas en una corriente continua de aire.

Temperatura de saturación adiabática: si se hacen fluír - agua y aire dentro de una cámara aislada térmicamente en flujo paralelo, se tiene que al entrar el aire, y esprear agua - dentro de la cámara, el aire se enfría y humidifica. La temperatura del agua alcanza un valor a régimen permanente llamado temperatura de saturación adiabática y es menor que la temperatura de entrada del aire. Si el contacto entre el agua y aire es suficiente como para llevar al agua y al aire a la condición de equilibrio, entonces el aire sale saturado a tsa, y la reposición de agua se hace a esta misma temperatura.

Concepto del bulbo húmedo: se considera una gota de líquido sumergida en una corriente de aire que no está saturado. - Si el líquido se encuentra a una temperatura mayor que la temperatura de rocío del gas, la presión de vapor del líquido será mayor en la superficie de la gota que la presión parcial -

del vapor en el gas; por lo tanto, el líquido se evaporará y difundirá en el gas. El calor necesario para la evaporación o calor latente, se obtiene a expensas del calor sensible de la gota del líquido, provocando que éste se enfríe. Debido a que la gota se enfría, se crea un gradiente de temperaturas, obteniéndose así calor sensible de la corriente gaseosa por los - mecanismos de convección y radiación.

2. DESARROLLO DEL MODELO

2.1 Introducción

El modelo está basado en una serie de correlaciones originalmente desarrolladas para la comprobación del funcionamiento adecuado de torres de enfriamiento de tiro natural ya existentes y en operación, y se han hecho las modificaciones necesarias para su funcionamiento para el diseño de las mismas con una certeza aceptable para un cálculo preliminar.

Este modelo enuncia la existencia de dos números adimensionales principales: el número de la torre, T, y el número de especificación, S.

El número de la torre se define como:

$$T = \frac{NL^2}{Hg\rho^2}$$

Como puede observarse, un número infinito de combinaciones de valores de N, L y H pueden dar un mismo valor de T, por lo que puede interpretarse únicamente como un arreglo adecuado de criterios de diseño, y está referido a dimensiones de la torre esencialmente, por lo que su uso es proporcionar un valor funcional para una variable desconocida, conociendo las restantes.

El número de especificación está definido como:

$$S = \frac{2}{\rho} \frac{\Delta\rho}{\Delta i_{\max}} C_p \Delta T_w \alpha^3$$

y es un número basado en propiedades termofísicas del sistema relacionado con el equilibrio del fenómeno y el dimensionamiento de la torre de la siguiente manera:

$$T = S \left[\frac{1}{NTU} + \frac{1}{2} \right]^{-3}$$

Los resultados obtenidos para la comprobación del funcionamiento de torres existentes son muy buenos, y en su aplicación para diseño se encuentra limitado por sí sólo, por lo -- que fue necesario implementarlo con la ayuda de otras fuentes con lo que se logró un sistema eficiente y confiable.

El problema esencial corresponde a la determinación de la altura del tiro, H, y para resolverlo es necesario examinar - detenidamente el número de la torre.

Una de las incógnitas para despejar H de la primera ecuación es la caída de presión, N, y se soluciona a partir de da tos experimentales para cada tipo de empaque y gastos de agua y aire.

La otra variable desconocida es el propio número de la to rre, T, al cual podemos llegar a través de la determinación - del número de especificación, S, que a su vez es función de - una serie de valores más o menos sencillos de determinar. Una vez conocido S, llegamos al valor de T y a su vez al de H, que es el último resultado al que se llega.

2.2 Carta psicrométrica

Una carta psicrométrica es la representación gráfica en la que se muestra en forma fácil diversas propiedades del sistema aire-agua para una presión atmosférica dada.

Generalmente, se tiene en las abscisas la temperatura, y en las ordenadas se leen valores de humedad, entalpía, volumen húmedo, calor húmedo, y puede hacerse la determinación de la temperatura de bulbo húmedo o humedad relativa, según los datos disponibles.

Se ha desarrollado un conjunto de funciones y subrutinas para el cálculo y estimación de los datos que normalmente son proporcionados por esta carta, para que puedan obtenerse a cualquier presión atmosférica, con una exactitud mayor a la obtenida al leer directamente de la carta.

2.2.1 Humedad absoluta

La humedad absoluta se obtiene en condiciones de saturación en base al comportamiento casi ideal que tienen tanto el agua como el aire a presiones cercanas a la atmosférica y temperaturas bajas. Para obtener el valor numérico, se emplea la siguiente ecuación:

$$H_s = \frac{18 P^\circ}{29(P_t - P^\circ)}$$

P° es la presión de vapor del agua a la temperatura del sistema, y se estima por la ecuación:

$$\log P^\circ = \frac{-3.1423}{T_r} + 8.361 - e^{-20(T_r - .163)^2}$$

donde T_r es la temperatura reducida del agua.

2.2.2 Entalpía

La entalpía de saturación se obtiene haciendo un balance de calor del sistema:

$$I = C_{p_{\text{aire}}} t + H_s (\lambda + C_{p_{\text{agua}}} (t - 32))$$

El primer término corresponde a la entalpía del aire, y - el segundo a la del agua que lo acompaña. Dando valores promedio de capacidades caloríficas, se tiene:

$$I = 0.24 t + H_s (\lambda + 0.45(t - 32))$$

El valor del calor latente de vaporización, λ , a presiones cercanas a la atmosférica, se obtiene de acuerdo con:

$$\frac{\lambda}{\lambda_B} = \left[\frac{1 - T_r}{1 - T_{r_B}} \right]^{.38}$$

donde el subíndice B indica condiciones base arbitrarias.

2.2.3 Humedad relativa

Partiendo de su definición, humedad relativa es :

$$HR = \frac{\text{Presión parcial del agua}}{\text{Presión de saturación}} \Bigg|_T \times 100$$

La presión de saturación puede conocerse fácilmente, mientras que la presión parcial del agua en condiciones no saturadas es más difícil de evaluar. Sin embargo, de la fórmula de Ferrel tenemos que:

$$\frac{p' - p}{t_d - t_{wb}} = 0.000367 p_m \frac{t_{wb} + 1539}{1571}$$

en donde: p = presión parcial del agua a t_{wb}

p' = presión de saturación a t_{wb}

p_m = presión del sistema

t_d = temperatura de bulbo seco

t_{wb} = temperatura de bulbo húmedo

por lo que el valor de p queda en función de variables conocidas.

2.2.4 Densidad

Se considera la densidad de una unidad de masa de aire seco con el agua que lo acompaña, y para calcularla definimos:

$$V_o = 359 \frac{P_o}{P}$$

$$T_o = \frac{t + 460}{492}$$

donde el subíndice indica condiciones base de 14.696 psia y -32° F. Para la mezcla, se tiene:

$$V = \frac{V_o}{29} T_o + \frac{V_o H}{18} T_o$$

$$V = V_0 T_0 \left[\frac{1}{29} + \frac{H}{18} \right]$$

la densidad es simplemente el recíproco del volúmen.

2.2.5 Calor húmedo

Su evaluación es muy sencilla, y se emplea la siguiente ecuación:

$$s = 0.24 + 0.45 H$$

2.2.6 Líneas de enfriamiento adiabático

Cuando se lleva a cabo un proceso de enfriamiento, esto es, de disminución de temperatura de una mezcla aire-agua, -- puede llevarse a cabo adiabáticamente considerando una unidad de masa de aire seco constante, y variando simplemente la humedad que pueda tener esta mezcla inicialmente. El comportamiento en una carta temperatura humedad sería el de una línea recta y aproximadamente paralela para cualquier caso en el -- rango atmosférico, y estas líneas son conocidas como líneas -- de enfriamiento adiabático.

Estas líneas de enfriamiento siguen los valores de temperatura de bulbo húmedo, y es así como la carta psicrométrica se utiliza para localizar un punto con ambas temperaturas y -- estas líneas.

A continuación, se presentan gráficas que muestran el comportamiento de algunas propiedades con respecto a la temperatura y a la humedad.

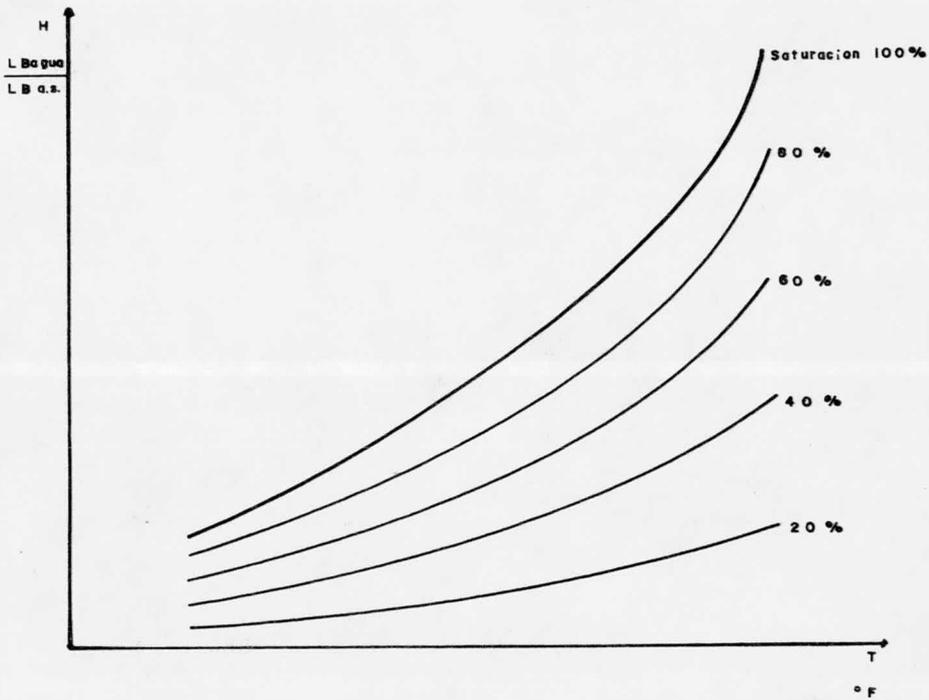


DIAGRAMA HUMEDAD-TEMPERATURA	
T E S I S P R O F E S I O N A L	
U N A M	F A C . Q U I M I C A
FIGURA 2.2.1.1	1 9 7 9

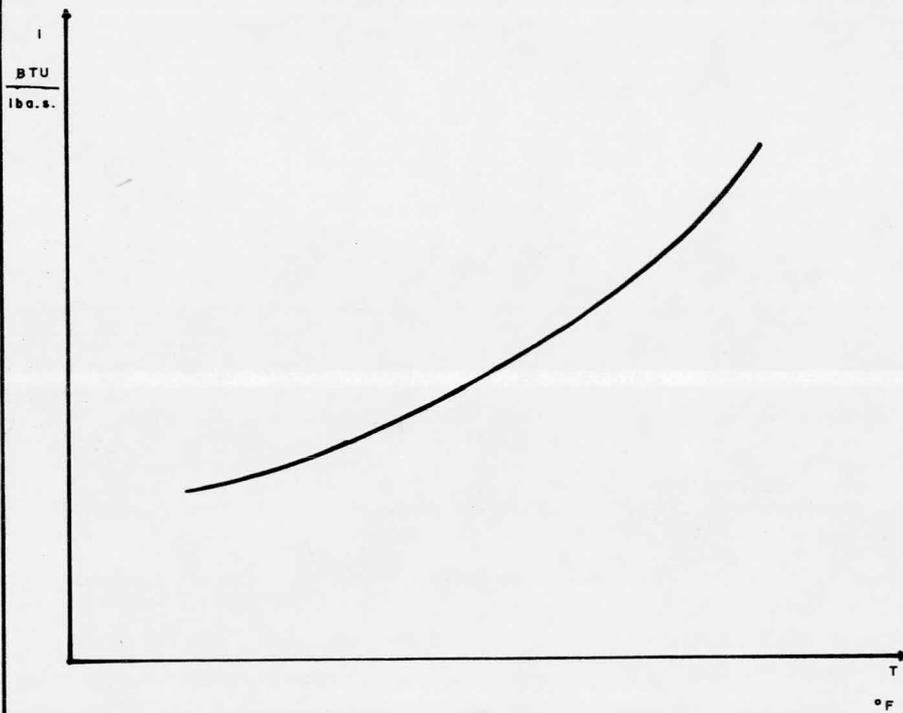


DIAGRAMA ENTALPIA-TEMPERATURA	
TESIS PROFESIONAL	
U N A M	FAC. QUIMICA
FIGURA 2.2.2.1	1 9 7 9

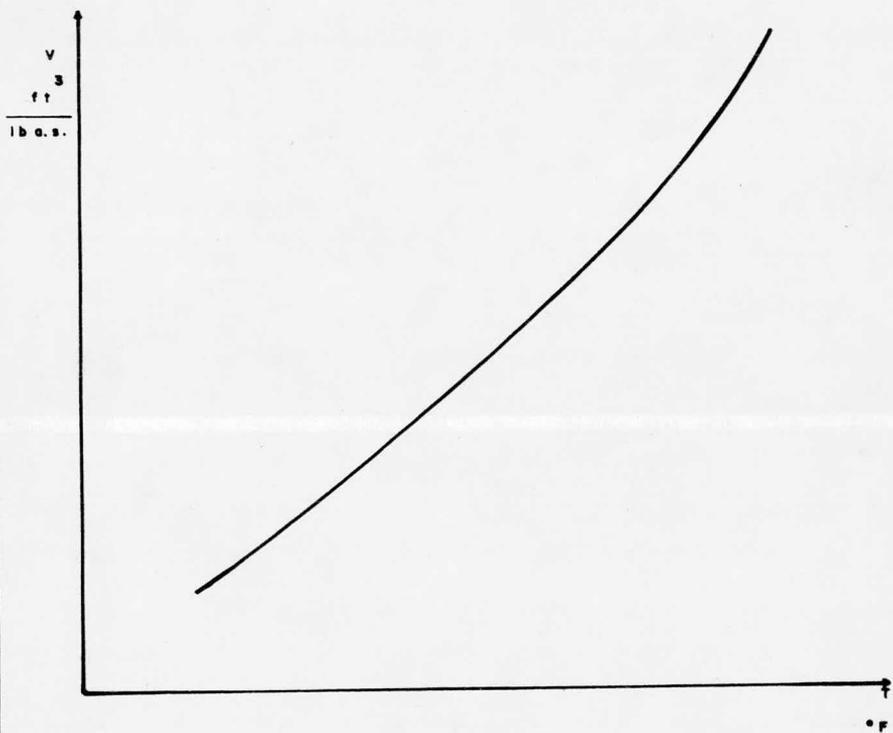


DIAGRAMA VOLUMEN-TEMPERATURA	
T E S I S P R O F E S I O N A L	
U N A M	F A C . Q U I M I C A
FIGURA 2.2.4.1	1 9 7 9

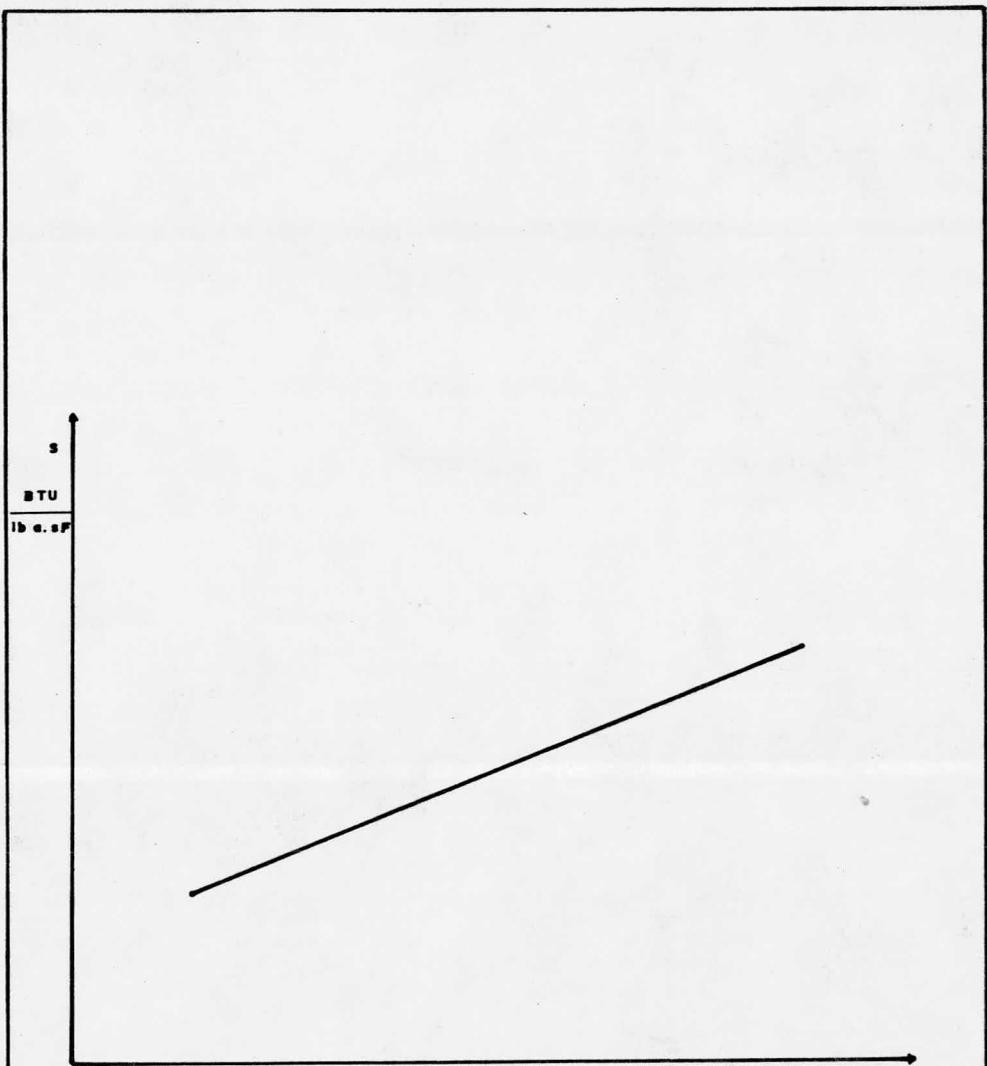
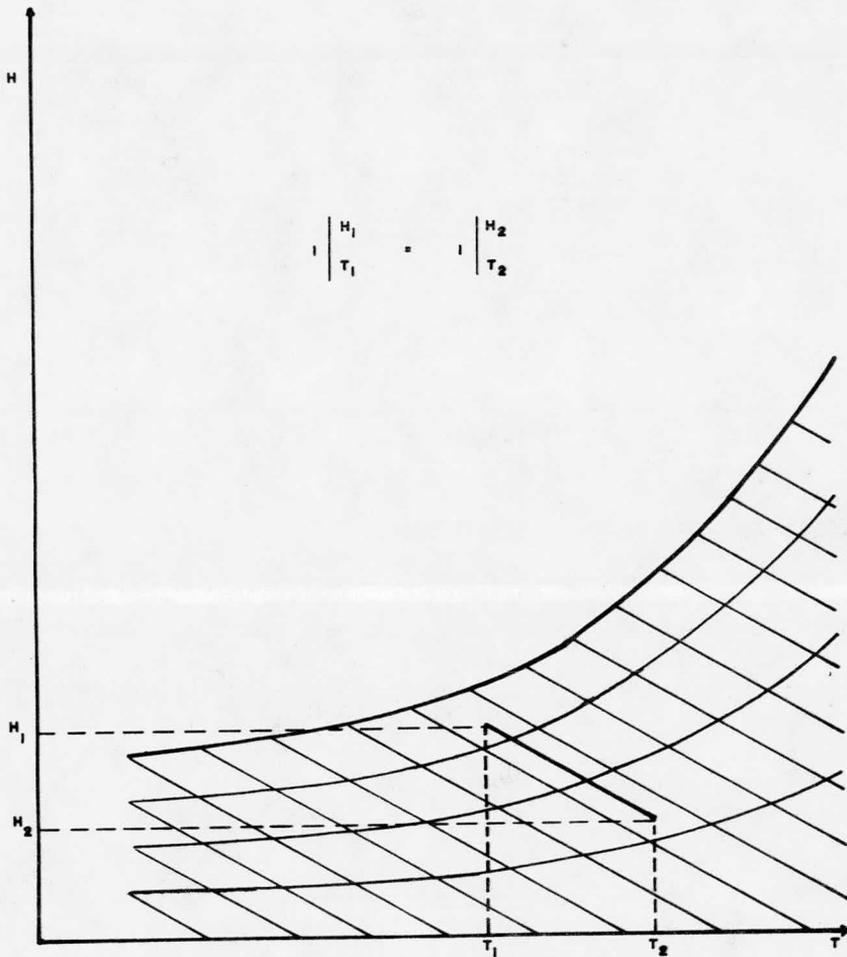


DIAGRAMA CALOR HUMEDO-HUMEDAD	
T E S I S P R O F E S I O N A L	
U N A M	F A C . Q U I M I C A
FIGURA 2.2.5.1	1 9 7 9



LINEAS DE SATURACION ADIABATICA	
TESIS PROFESIONAL	
U N A M	FAC. QUIMICA
FIGURA 2.2.6.1	1 9 7 9

2.3 Mecanismos de transferencia de masa y calor

Supongamos el caso de una línea de enfriamiento adiabática con agua a una temperatura de saturación constante; no hay gradiente de temperatura a través del agua porque no hay flujo de calor sensible hacia o desde la fase líquida.

En los procesos de enfriamiento de agua y dehumidificación, donde el agua varía de temperatura, hay flujo de calor hacia o desde el agua, y por lo tanto hay un gradiente de temperatura. Este hecho introduce una resistencia en la película líquida al flujo de calor en esta fase. Por otra parte, es notable que puede no haber resistencia en la fase líquida a la transferencia de masa en cualquier caso, debido a que no hay gradiente de concentración para agua pura.

En las figuras 2.3.1 a 2.3.4 se trazan gráficas de distancia perpendicular a la interfase en las abscisas, y temperatura y humedades en las ordenadas. Si llamamos

t' = temperatura del agua

t_i = temperatura en la interfase

t_g = temperatura del aire

H_i = humedad en la interfase

H_g = humedad del aire

y decimos que las líneas punteadas representan la transferencia de vapor de agua hacia el gas, y las líneas continuas al flujo de calor latente y sensible a través del aire o agua en la interfase. Entonces, en todos los casos, t_i y H_i representan condiciones de equilibrio, y son por ello coordenadas de puntos en la línea de saturación de una carta psicrométrica.

El caso más simple, el de una humidificación adiabática con agua a temperatura constante, se muestra en la figura 2.3.

Aquí el flujo de calor latente del agua hacia el aire balancea el flujo de calor sensible del aire al agua, y no hay gradiente de temperatura para el agua. La temperatura del aire, t_g , debe ser mayor que la temperatura de interfase para que el calor sensible pueda fluir a la interfase, y la humedad de ésta debe ser mayor que la del aire para que pueda humedecerse.

Las condiciones en un punto particular en un dehumidificador se muestran en la figura 2.3.2. En este caso, H_g es mayor que H_i y por lo tanto, el vapor de agua debe difundirse hacia la interfase. Como t_i y H_i representan al aire saturado, t_g debe ser mayor que t_i , o el aire estaría sobresaturado de agua.

La consecuencia de este razonamiento es la conclusión de que la humedad puede eliminarse del aire no saturado por contacto directo con suficiente agua fría sin llevar primero el aire a la saturación.

Como resultado de los gradientes de temperatura y humedad, la interfase recibe calor sensible y vapor de agua del aire. La condensación del agua libera calor latente, y ambos calores se transfieren al agua. Esto requiere una diferencia de temperaturas a través de la fase de agua.

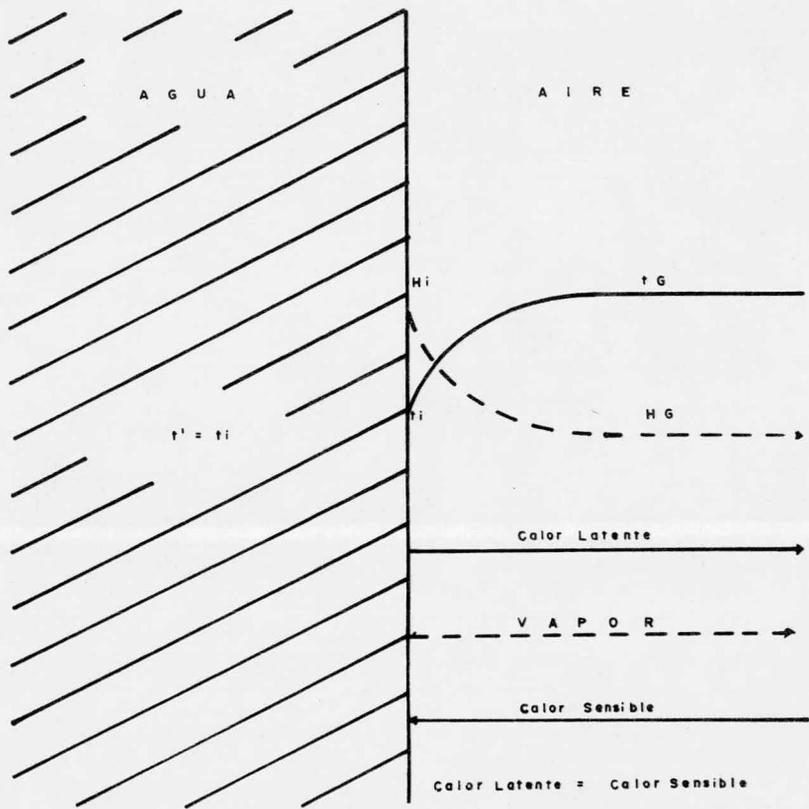
Las condiciones en una torre de enfriamiento a contracorriente dependen del hecho de si la temperatura del agua está sobre la temperatura de bulbo seco del aire o entre las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo. En el primer caso como en la parte superior de una torre de enfriamiento, las condiciones pueden mostrarse en un diagrama como la figura 2.3.3. En este caso, el flujo de calor y de masa, y por ello

la dirección de los gradientes de temperatura y humedad, son exactamente al contrario de los mostrados en la figura 2.3.2.

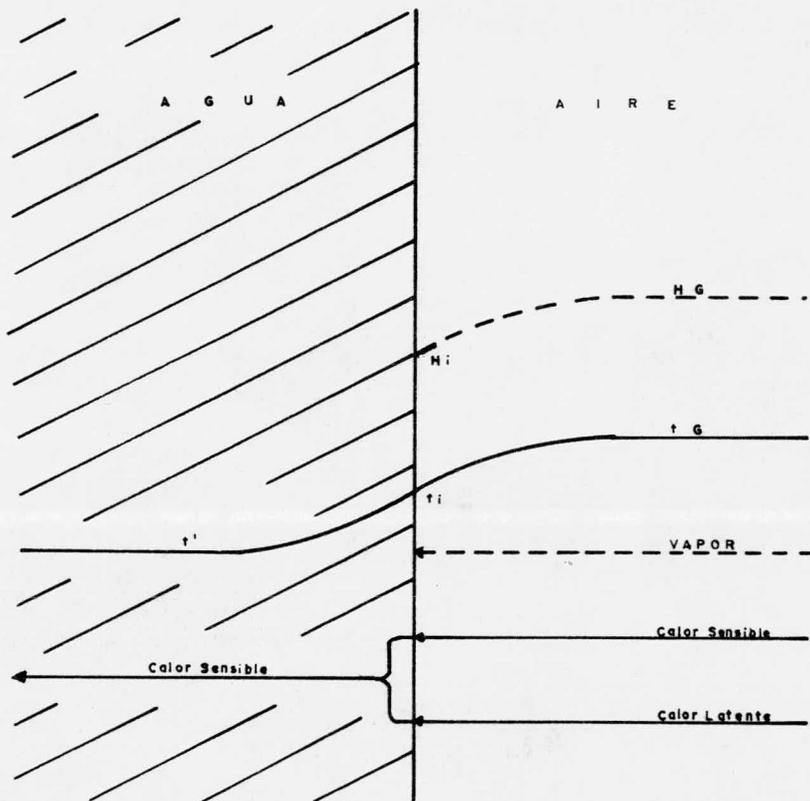
El agua se enfría por evaporación y por transferencia de calor sensible, los gradientes de humedad y temperatura de la película de aire disminuye en la dirección de la interfase al aire, y el gradiente de temperatura a través del agua debe mover a una transferencia de calor lo suficientemente rápida como para contar en ambos términos del balance de calor.

En la parte inferior de la torre de enfriamiento, donde la temperatura del agua es mayor que la temperatura de bulbo húmedo del aire, pero menor que la de bulbo seco, las condiciones se muestran en la figura 2.3.4.

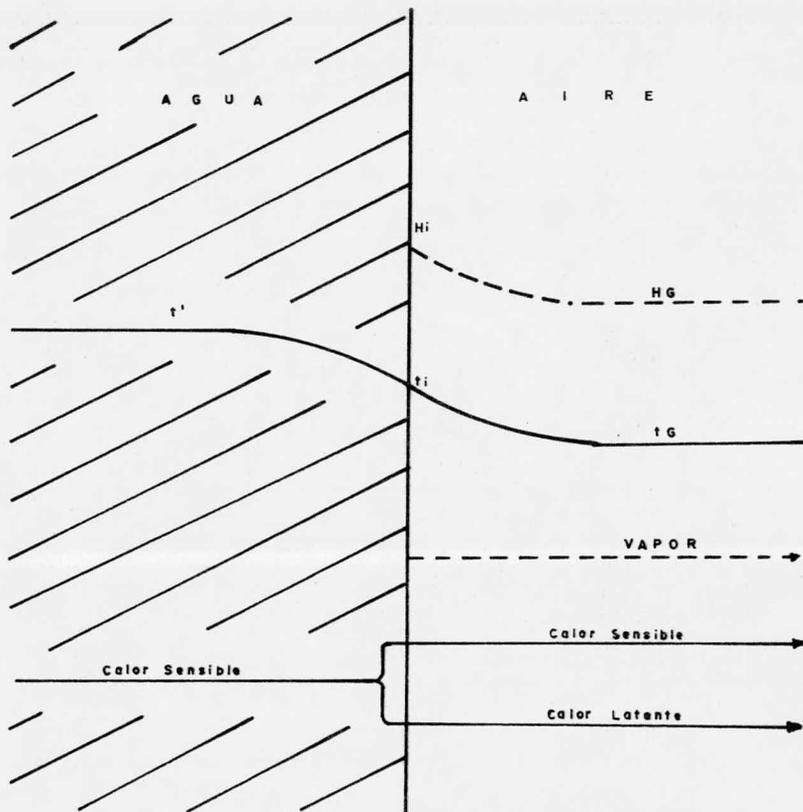
En este caso el agua se enfría; la interfase debe estar más fría que el agua, y el gradiente de temperatura a través del agua es hacia la interfase, o sea que t_i es menor que t' . Por otro lado, como el aire se humidifica adiabáticamente, debe existir un flujo de calor sensible del aire a la interfase. La suma del calor que fluye del agua a la interfase, y del aire a la misma, dá como resultado la evaporación en la interfase, y el vapor resultante se difunde en el aire, por lo que H_i es mayor que H_g . Este flujo de vapor acarrea de la interfase tanto calor latente como calor sensible acarreado o cedido a la interfase de ambos lados como calor latente. El gradiente de temperatura resultante, $t' - t_i - t_g$, tiene forma de V, como puede apreciarse en la figura 2.3.4.



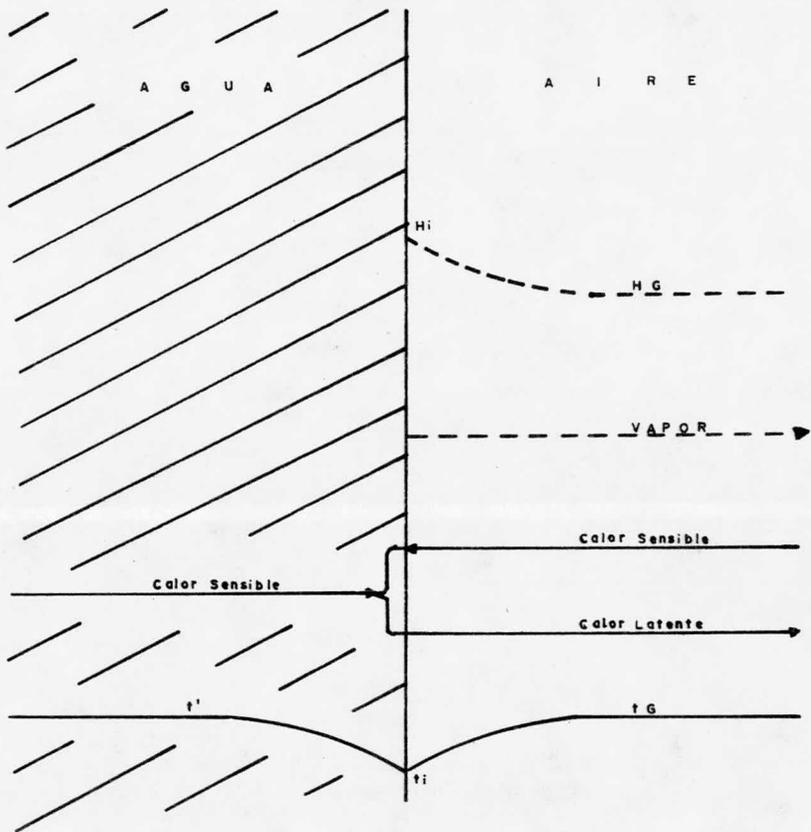
TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR	
T E S I S P R O F E S I O N A L	
U N A M	FAC. QUIMICA
FIGURA 2.3.1	1 9 7 9



TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR	
T E S I S P R O F E S I O N A L	
U N A M	FAC. QUIMICA
FIGURA 2.3.2	1 9 7 9



TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR	
TESIS PROFESIONAL	
U N A M	FAC. QUIMICA
FIGURA 2.3.3	1 9 7 9



2.4 Coeficientes de transferencia de masa

En las torres de enfriamiento, se presenta tanto un fenómeno de evaporación como de convección, según se vió anteriormente. La evaluación de los coeficientes de transferencia son difíciles de obtener teóricamente, y es necesario recurrir a la experimentación para obtener valores precisos.

Se ha visto que el coeficiente de transferencia es prácticamente independiente de la temperatura, pero es una función de los gastos de agua y aire. Es usual expresar la relación en la forma:

$$K a = \lambda_0 L^m G^n$$

o bien

$$\frac{K a}{L} = \lambda_0 L^{mn-1} \left[\frac{L}{G} \right]^{-n}$$

si se grafican valores de $K a/L$ contra L/G , se espera obtener una serie de líneas para cada gasto de agua constante. De los resultados experimentales, se encuentra -- que la siguiente forma es útil para evaluar este coeficiente:

$$\frac{K a}{L} = \lambda_0 \left[\frac{L}{G} \right]^{-n}$$

Las características de transferencia de un empaque por lo tanto pueden ser definidas por los factores λ_0 y n .

En la figura 2.4.1 pueden verse las formas y características de los empaques analizados, y en la tabla 2.4.1 están anotados los valores de λ_0 y n para cada uno de ellos.

NUMERO DE EMPAQUE	λ_0	n
1	0.094	0.50
2	0.075	0.42
3	0.110	0.72
4	0.110	0.66
5	0.079	0.58
6	0.163	0.71
7	0.203	0.70
8	0.154	0.67
9	0.086	0.52
10	0.080	0.53

TABLA 2.4.1

2.5 Caída de presión

La caída de presión del aire a través del empaque es función del tipo de empaque, de la velocidad del aire y del gasto de agua. Estos valores se determinan experimentalmente, y los resultados están reportados en términos de cabezas de velocidad por unidad de altura de empaque, y pueden encontrarse en la tabla 2.5.1 para los tipos -- que se tomaron en cuenta en este trabajo.

Se ha elaborado una subrutina que determina los valores de caída de presión para una velocidad de aire y una masa velocidad de agua fijas a partir de datos experimentales.

La evaluación completa a través de las torres, sin embargo, está definida por:

$$N = N_R + N_P Z$$

Los valores obtenidos experimentalmente corresponden a N_P , (número de cabezas de velocidad de caída de presión / altura de empaque). N_R es la caída de presión residual debida a que existe transferencia tanto de calor como de masa arriba y abajo del empaque, equivalente a un número adicional de unidades de transferencia. Hay además otras resistencias, tales como espreas, eliminadores, entradas de aire y agua, etc, y se han determinado en base empírica que N_R es aproximadamente un 67% del valor del producto $N_P Z$, lo que significa que:

$$N_R = 0.67 N_P Z$$

con lo que se tiene:

$$N = 0.67 N_p Z + N_p Z = N_p Z (0.67 + 1)$$

$$N = 1.67 N_p Z$$

NUMERO DE EMPAQUE	L v aire	1000 lb/h-ft ²		2000 lb/h-ft ²	
		3 ft/s	6ft/s	3 ft/s	6 ft/s
1		3.7	3.3	4.8	3.9
2		1.7	1.3	2.4	1.7
3		0.8	0.6	1.1	0.8
4		1.0	0.5	1.6	0.8
5		0.9	0.75	1.7	1.2
6		4.3	3.8	5.4	4.3
7		2.7	2.5	3.1	3.0
8		2.1	1.8	2.6	2.2
9		2.5	1.9	3.1	2.7
10		1.7	1.4	2.5	1.8

TABLA 2.5.1

2.6 Chimenea o tiro

Se han utilizado diversos diseños de los tiros de las torres de enfriamiento de agua. La primera torre de forma hiperbólica se construyó en Holanda en 1916. Se han construido algunas en forma cilíndrica y otras torres europeas se han compuesto de un cono truncado, una sección de toro y otra sección cónica en lo alto. Estos tipos -- han sido relegados universalmente por el hiperbólico que es relativamente fácil de analizar, exhibe esfuerzos primarios bajo cargas de diseño y no presenta discontinuidades cuando un perfil se une a otro. No hay prueba, pese a todo, de que éste sea el tipo óptimo. Una torre hiperbólica sigue la siguiente función:

$$\frac{r^2}{a^2} - \frac{(2 - S)^2}{a^2/(K^2 - 1)} = 1$$

El tiro de las torres de tiro natural pueden representarse en la figura 2.6.1.

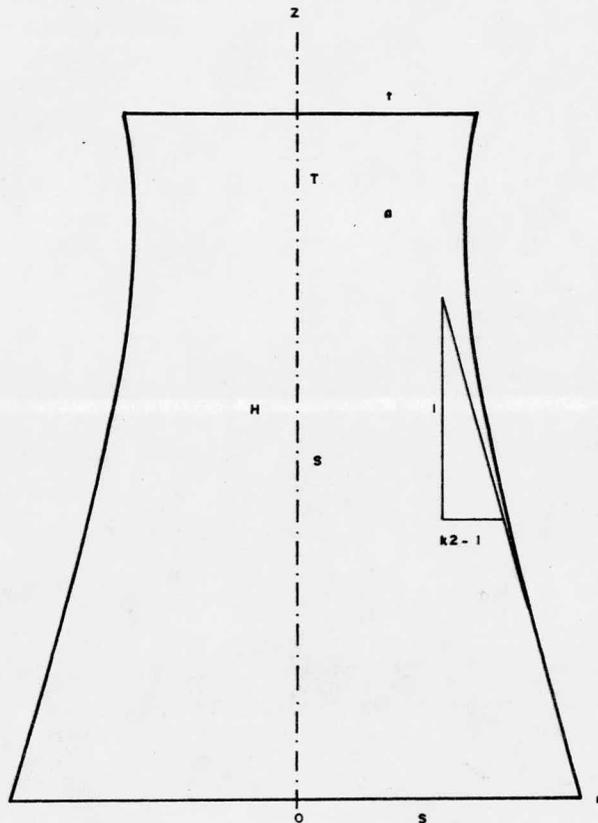
Dado que un análisis de optimización de esfuerzos no es el enfoque de esta tesis, únicamente se hará el planteamiento de resultados comparativos con una torre que se encuentra en funcionamiento en Portland, EUA.

Con un tiro no hiperbólico, sino polinomial, se obtiene un perfil que no es mucho más difícil de construir que el hiperbólico, con un costo menor y mejor funcionamiento. Visualmente ambos perfiles son iguales, y pueden compararse en la figura 2.6.2.

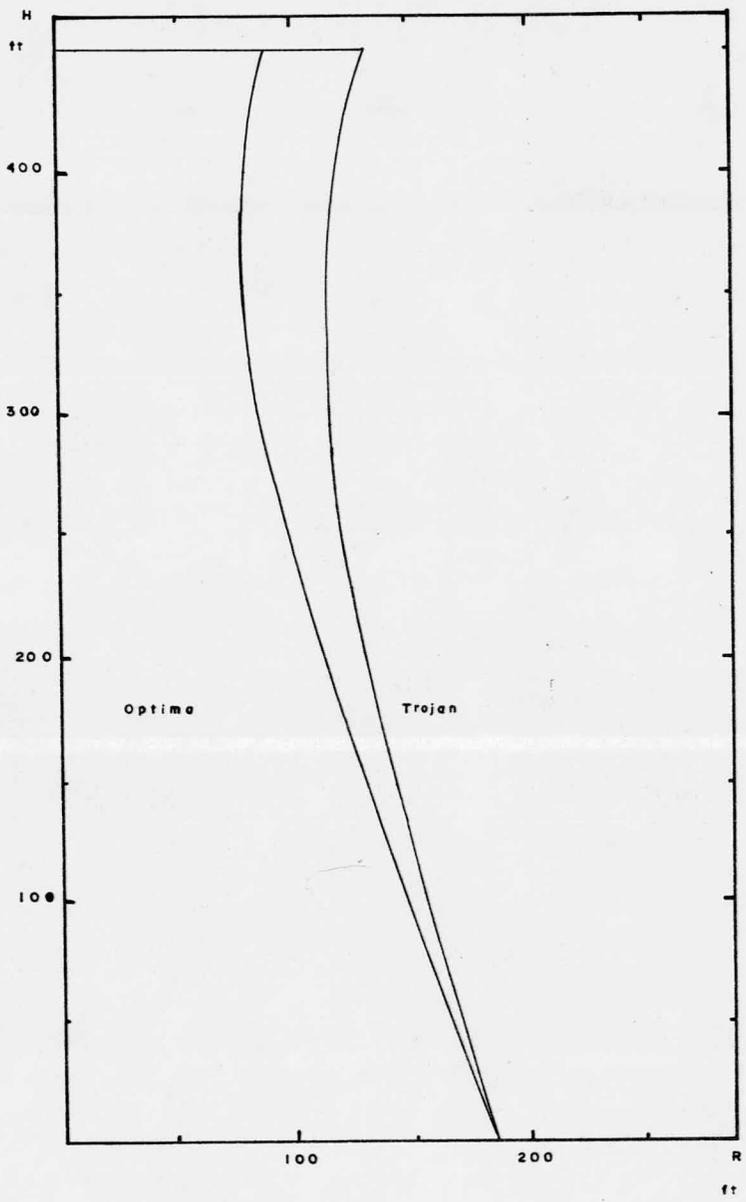
La ecuación que se utiliza para la obtención de este perfil es:

$$r = \sum_{i=1}^n a_i z^i$$

Existen otros métodos más sofisticados y diseñados - especialmente para la optimización por computadora, como el método de integración numérica de J.E. Goldberg, que es aplicable también a otros campos, como barras y soportes, placas corazas y estructuras, análisis de materiales y aplicaciones en perfiles de reactores, generadores, -- cambiadores de calor, chimeneas, tanques, turbinas, etc.



TIRO HIPERBOLICO	
TESIS PROFESIONAL	
U N A M	FAC. QUIMICA
FIGURA 2.6.1	1 9 7 9



COMPARACION PERFILES	
TESIS PROFESIONAL	
U N A M	FAC. QUIMICA
FIGURA 2.6.2	1 9 7 9

2.7 Modelo

El modelo en su desarrollo puede dividirse en las si guientes partes:

- 2.7.1 Balance de materia y energía
- 2.7.2 Cálculo de NTU
- 2.7.3 Determinación de S y T
- 2.7.4 Determinación del diámetro de la sección empacada
- 2.7.5 Cálculo del coeficiente de transferencia de masa
- 2.7.6 Altura del empaque
- 2.7.7 Cálculo de la caída de presión
- 2.7.8 Cálculo de la altura del tiro

2.7.1 Balance de materia y energía

Si consideramos tener al inicio de la resolución los siguientes datos:

- W = gasto de agua, lb/h
- tbs = temperatura de bulbo seco, °F
- tbh = temperatura de bulbo húmedo, °F
- tw1 = temperatura de entrada del agua, °F
- tw2 = temperatura de salida del agua, °F
- tipo de empaque

podemos entonces efectuar un balance de materia mediante un análisis de la figura 2.7.1.1:

El punto A representa las condiciones del aire a la entrada, y se encuentra definido, ya que con los valores de t_{bs} y t_{bh} puede encontrarse la humedad a la entrada, y por lo tanto la entalpía.

El punto B representa el caso de la máxima entalpía, que se podría llegar en el aire si éste saliera saturado a la temperatura de entrada del agua. Se determina considerando la humedad de saturación y la temperatura de entrada del agua.

Con estos datos, podemos calcular $(L/G)_{max}$ con estos dos puntos, considerando:

$$i_A = f(H_A, t_{bh}) = i_2$$

$$i_B = f(H_B, t_{w1})$$

entonces,

$$\left[\frac{L}{G} \right]_{max} = \frac{i_B - i_2}{t_{w1} - t_{w2}}$$

Se puede considerar que un rango del 70 al 40% del valor máximo de la pendiente es adecuado, o sea:

$$(L/G)_{op} = 0.07 \text{ a } 0.40 (L/G)_{max}$$

Con este valor de operación de la pendiente, la entalpía es calculada a la salida de la siguiente manera:

$$i_1 = (L/G)op (tw1 - tw2) + i_2$$

si consideramos

$$\frac{L}{G} = \frac{4W/\pi D^2}{4Wa/\pi D^2} = \frac{W}{Wa}$$

y por lo tanto

$$Wa = \frac{W}{(L/G)}$$

2.7.2 Cálculo de NTU

El número de unidades de transferencia de masa (NTU) se define como:

$$NTU = \int_{i_2}^{i_1} \frac{di}{i^* - i}$$

Si trazamos una gráfica de $1/(i^* - i)$ en las ordenadas contra i en las abscisas, el área bajo la curva entre los límites de i_2 e i_1 , representaría el valor numérico de la integral, como puede verse en la figura - - - 2.7.2.1.

Para efectuar el cálculo de los puntos de esta gráfica, se pueden calcular los valores de i a partir de la entalpía de entrada, que es conocida, y la pendiente de la línea de operación, hasta llegar al valor de la entalpía de la salida.

Los valores pueden leerse directamente de la curva de equilibrio para la entalpía de saturación, y para los datos de entalpía de operación, pueden leerse igualmente de la línea de operación.

2.7.3 Determinación de S y T

La definición de los números de especificación, S, y de la torre, T, ya han sido dadas en la sección 2.1, y únicamente analizaremos las variables que los afectan.

Como se había visto:

$$S = \frac{2}{\rho} \frac{\Delta \rho}{\Delta i_{\max}} C_p \Delta T_w \alpha^3$$

y

$$T = S \left[\frac{1}{\text{NTU}} + \frac{1}{2} \right]^{-3}$$

α es el número de enfriamiento de Merkel, y está definido como:

$$\alpha = \frac{i_{\text{MP}} - i_2}{C_p T_w}$$

por lo que si

$$t \Big|_{\text{MP}} = \frac{t_{w1} + t_{w2}}{2}$$

se calcula la entalpía de saturación. Los otros factores son ya conocidos y han sido calculados en este punto.

Los valores de densidades se calculan con el siguiente criterio:

ρ es la densidad del aire en las condiciones ambientales de entrada a la torre.

Se tiene una aproximación confiable para la evaluación del valor de $\Delta\rho$, y es:

$$\frac{\Delta\rho}{\Delta i} = \frac{\Delta\rho_{\max}}{\Delta i_{\max}}$$

de donde, tenemos

$$\Delta\rho = \Delta\rho_{\max} \frac{\Delta i}{\Delta i_{\max}}$$

$\Delta\rho_{\max}$ se calcula con la consideración de que el aire sale saturado a la temperatura de entrada del agua, y esta misma base es aplicable para Δi_{\max} .

2.7.4 Determinación del diámetro de la sección empacada

La evaluación del diámetro de la sección empacada de una torre de enfriamiento de tiro natural está fundamentada en reglas "de dedo", que han sido determinadas a través de la experiencia y el tiempo, y nos dicen que la velocidad de caída del agua en el empaque está en el orden de 16 a 20 ft/hr, equivalentes a un gasto de 100 a -

125 galones por hora por ft². Este criterio totalmente empírico nos lleva a buenos resultados en este tipo de torres de enfriamiento, y es por ello que se toma en cuenta.

En estos términos, el diámetro se calcula fácilmente: si

$$V_L = \frac{w/\rho}{A}$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

entonces,

$$V_L = \frac{4w}{\pi \rho D^2}$$

de donde

$$D = \sqrt{\frac{4w}{\pi \rho V_L}}$$

2.7.5 Cálculo del coeficiente de transferencia de masa

Como se vió en la sección 2.4, se tiene una serie de empaques entre los cuales elegir el más apropiado.

En cada caso, se tienen empaques que coinciden con alguno reportado en la tabla 2.4.1 y de los cuales se obtienen los valores de λ_0 y n , para aplicar la ecuación:

$$\frac{K y a}{L} = \lambda \left[\frac{L}{G} \right]^n$$

Dado que ya se determinó el diámetro, el valor de L se calcula sencillamente.

2.7.6 Altura de empaque

Para el cálculo de la altura del empaque se utiliza la ecuación siguiente:

$$Z = NTU \times HTU$$

El valor de HTU hasta el momento es desconocido, pero se calcula a partir de:

$$HTU = \frac{G}{KyA}$$

En este punto es recomendable revisar lo concerniente a las velocidades de la sección empacada de la torre para evitar caídas de presión excesivas, diámetros desproporcionados o transferencia insuficiente.

Tenemos que:

$$20 \geq V_L \geq 16 \quad \text{ft/h}$$

$$4.5 \geq V_A \geq 3.5 \quad \text{ft/s}$$

$$0.7(L/G)_m \geq (L/G)_o \geq 0.4(L/G)_m$$

Para mantener dentro de estos límites a las tres variables, debemos proceder de la siguiente manera:

La variable que más nos interesa cuidar dentro es la relación $(L/G)_{op}$, ya que influye sobre la transferencia de masa, de calor, y la caída de presión.

El valor de V_L en este punto se ha supuesto como -- igual a 20 ft/h, por lo que debemos de comprobar la del aire:

$$V_A = G / 3600 \times \bar{\rho}$$

Si V_A está fuera de rango, tenemos dos posibilidades y diversas formas de corregir la situación:

Si V_A es menor que 3.5, podemos aumentarla si disminuimos $(L/G)_{op}$, ya que L está fija, y lo haremos hasta -- que nos lo permita el hecho de que esta $(L/G)_{op}$ no debe ser menor al 40% del valor máximo.

Si V_A es menor que 4.5, se disminuye la velocidad -- del agua, con lo que se mantiene la relación líquido/gas y se aumenta el diámetro de la sección empacada, teniendo entonces una velocidad menor de aire, con la res-- tricción de que V_L no debe ser menor a los 16 ft/hr.

2.7.7 Cálculo de la caída de presión

Experimentalmente se han encontrado valores para la determinación de la caída de presión. Estos son función del tipo de empaque, el gasto de agua y la velocidad del aire, como se vió en la sección 2.5.

Una interpolación lineal es lo suficientemente exacta como para utilizarse en un cálculo con confianza, según se vé en la figura 2.7.7.1.

Los valores reportados son para $L = 1000$ y 2000 lb/hr-ft², y $V_A = 3$ y 6 ft/s, a partir de los cuales se interpolan los datos reales.

De la tabla 2.5.1, conocemos los siguientes puntos con sus respectivas coordenadas para cada tipo de empaque.

$$\begin{array}{l} X11 (1000, Np_1) \\ X12 (2000, Np_2) \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} X11 \\ X12 \end{array}} \right\} \text{ para } V_A = 3 \text{ ft/s}$$

$$\begin{array}{l} X21 (1000, Np_3) \\ X22 (2000, Np_4) \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} X21 \\ X22 \end{array}} \right\} \text{ para } V_A = 6 \text{ ft/s}$$

Con estos valores, se hace una interpolación lineal de P a L constante para cada extremo.

Una vez obtenidos los dos valores de P a L contante, para la V_A deseada se hace otra interpolación para el valor deseado de L .

Este procedimiento puede hacerse tanto en forma gráfica como analítica, y en la figura 2.7.7.2 se muestra el procedimiento gráfico para un caso cualquiera.

Una vez con el dato de Np , la caída de presión a través del lecho empacado es calculado por medio de la expresión:

$$N = Np \times Z \times 1.67$$

2.7.8 Cálculo de la altura del tiro

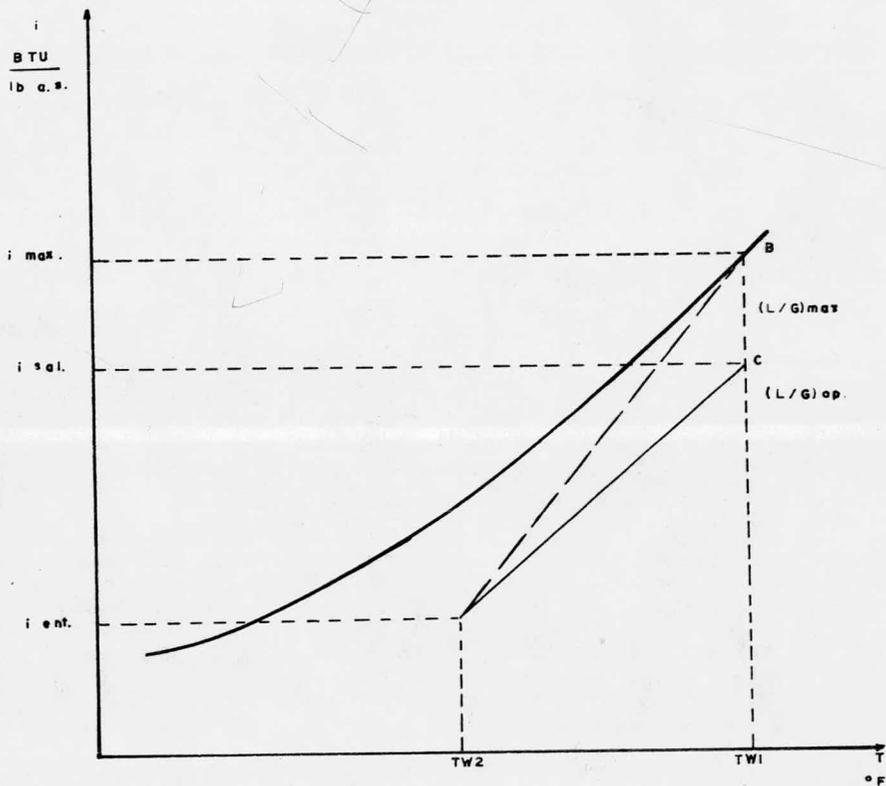
El tiro o chimenea de la torre de enfriamiento de es te tipo es la parte esencial del cálculo, y su determina ción está basada en el número de la torre, T, que nos proporciona una forma de evaluación muy adecuada.

Recordando lo dicho en secciones anteriores, T está definido como:

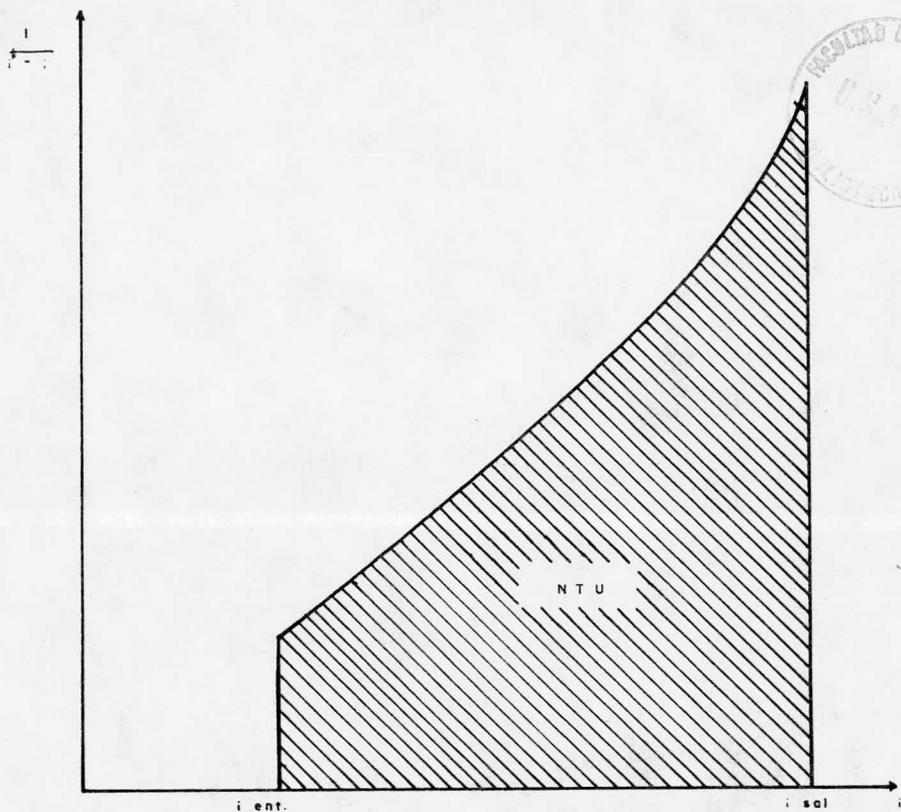
$$T = \frac{NL^2}{Hg\rho^2}$$

En este punto, tenemos todas la s variables calculadas previamente, por lo que simplemente despejamos el va lor de H:

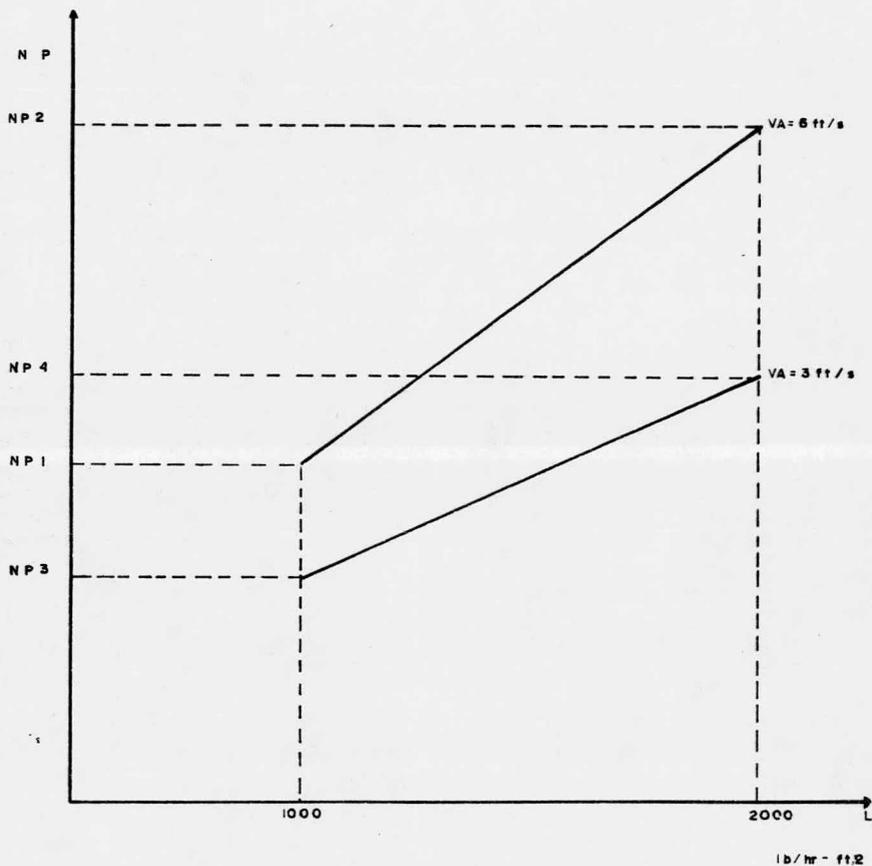
$$H = \frac{NL^2}{Tg\rho^2}$$



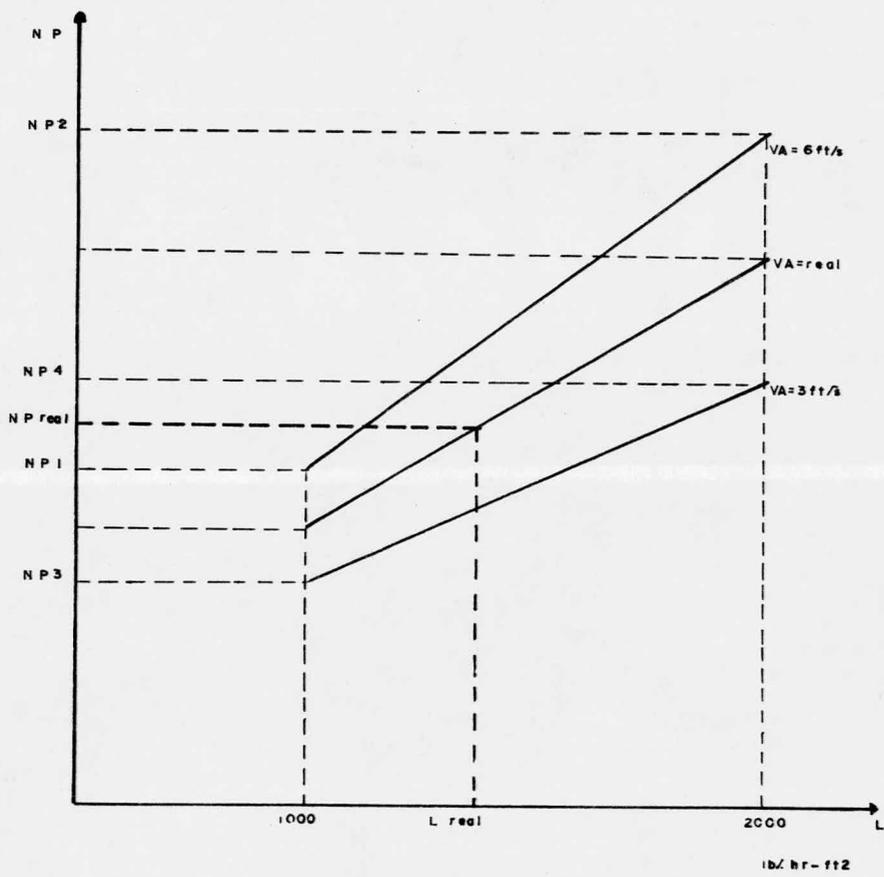
RELACIONES LIQUIDO/VAPOR	
TESIS PROFESIONAL	
U N A M	FAC. QUIMICA
FIGURA 2.7.1.1	1 9 7 9



INTEGRACION NUMERICA DE NTU	
TESIS PROFESIONAL	
U N A M	FAC. QUIMICA
FIGURA 2.7.2.1	1 9 7 9



DATOS GRAFICOS DE NP	
TESIS PROFESIONAL	
U N A M	FAC. QUIMICA
FIGURA 2.7.7.1	1979



DETERMINACION GRAFICA DE NP	
TESIS PROFESIONAL	
UNAM	FAC. QUIMICA
FIGURA 2.7.7.2	1979

2.8 Ejemplos

Para los ejemplos numéricos, se seguirá la misma secuencia de cálculo que se dió en la sección anterior.

Consideremos los siguientes datos de diseño para una torre de enfriamiento de tiro natural:

Presión atmosférica, psia	14.7
Temperatura media de bulbo húmedo, °F	57.0
Temperatura media de bulbo seco, °F	51.7
Gasto de agua, lb/h	18,006,000
Temperatura de entrada del agua, °F	80.0
Temperatura de salida requerida, °F	70.0

Tipo de empaque: Triangular de $1\frac{1}{2}$ " con espaciamiento entre barras de 3" y entre pisos de 12", correspondiente al empaque No. 2, con lo que se define:

$$\lambda_0 = 0.075$$

$$n = 0.42$$

$$X_{11} = 1.7$$

$$X_{12} = 2.4$$

$$X_{21} = 1.3$$

$$X_{22} = 1.7$$

2.8.1 Balance de materia y energía

$$\Delta T_w = t_{w1} - t_{w2} = 80 - 70 = 10 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$\bar{t}_w = (t_{w1} + t_{w2})/2 = (80 + 70)/2 = 75 \text{ } ^\circ\text{F}$$

de la carta psicrométrica, para el punto de entrada a la torre:

$$HR_2 = 68\%$$

$$H_2 = 0.0068 \text{ lb agua/lb aire seco}$$

$$i_2 = 20.9 \text{ BTU/lb aire seco}$$

$$HS_2 = 0.0100 \text{ lb agua/lb aire seco}$$

$$\rho_2 = 0.076 \text{ lb/ft}^3$$

para el punto B:

$$HR_B = 100\%$$

$$H_B = 0.0220 \text{ lb agua/lb aire seco}$$

$$i_B = 43.7 \text{ BTU/lb aire seco}$$

$$HS_B = 0.0220 \text{ lb agua/lb aire seco}$$

$$\rho_B = 0.0702 \text{ lb/ft}^3$$

$$\Delta i_{\max} = i_B - i_2 = 43.7 - 20.9 = 22.8 \text{ BTU/lb aire seco}$$

$$(L/G)_{\max} = \Delta i_{\max} / \Delta t_w = 22.8 / 10 = 2.28 \text{ (ver figura 2.8.1.1)}$$

suponemos

$$(L/G)_{\text{op}} / (L/G)_{\max} = 0.7$$

$$(L/G)_{\text{op}} = 0.7(L/G)_{\max} = 0.7 \times 2.28 = 1.596$$

$$W_a = \frac{W}{(L/G)_{\text{op}}} = \frac{18,006,000}{1.596} = 11,282,000 \text{ lb/h de aire}$$

$$i_1 = (L/G)_{op} \times \Delta t_w + i_2 = 1.596 \times 10 + 20.9 = 36.85$$

BTU/lb a.s.

2.8.2 Cálculo de NTU

$$NTU = \int_{i_1}^{i_2} \frac{di}{i^* - i}$$

i	i*	i* - i	1/i* - i	ord.m.	Δi	area p.
20.900	33.894	12.994	0.077	-----	-----	-----
22.946	34.783	12.287	0.081	0.079	1.596	0.126
24.092	35.565	11.473	0.087	0.084	1.596	0.135
25.688	36.562	10.874	0.092	0.090	1.596	0.143
27.284	37.345	10.061	0.099	0.096	1.596	0.153
28.880	38.235	9.355	0.107	0.103	1.596	0.165
30.476	39.126	8.650	0.116	0.111	1.596	0.178
32.072	40.018	7.946	0.126	0.121	1.596	0.193
33.668	41.125	7.457	0.134	0.130	1.596	0.207
35.264	42.232	6.968	0.144	0.139	1.596	0.222
36.860	43.700	6.840	0.146	0.145	1.596	0.231

$$NTU = \text{Area total} = 1.753$$

2.8.3 Determinación de S y T

$$i_{MP} = 38.6 \text{ BTU/lb aire seco}$$

$$\alpha = \frac{i_{MP} - i_2}{C_p \Delta t_w} = \frac{38.61 - 20.9}{10} = 1.771$$

$$\Delta \rho_{\max} = \rho_2 - \rho_B = 0.0755 - 0.0709 = 0.0058$$

$$\Delta i = i_1 - i_2 = 36.86 - 20.9 = 15.96$$

$$\Delta i_{\max} = 22.8$$

$$\Delta \rho = \Delta \rho_{\max} \times \frac{\Delta i}{\Delta i_{\max}} = 0.0058 \times \frac{15.96}{22.8} = 0.00406$$

$$\rho_1 = \rho_2 - \Delta \rho = 0.076 - 0.00406 = 0.07194$$

$$S = 2 \frac{\Delta \rho}{\rho_2} \frac{\Delta T_w}{\Delta i_{\max}} \alpha^3 = 2 \frac{0.00406}{0.076} \frac{10}{22.8} 1.771^3 = 0.2603$$

$$T = S \left[\frac{1}{NTU} + \frac{1}{2} \right]^{-3} = 0.2122$$

2.8.4 Determinación del diámetro de la sección empacada

Suponemos $V_L = 20$ ft/h

$$D = (4W / \pi \rho V_L)^{\frac{1}{2}} = (18,006,000 \times 4 / 3.14 \times 62.3 \times 20)^{\frac{1}{2}}$$

$$D = 136 \text{ ft}$$

2.8.5 Cálculo del coeficiente de transferencia de masa

$$L = \frac{4W}{\pi D^2} = \frac{4 \times 18,006,000}{3.14 \times 135^2} = 1246 \text{ lb/h-ft}^2$$

$$G = \frac{4W_a}{\pi D^2} = \frac{4 \times 11,282,000}{3.14 \times 135^2} = 780.7 \text{ lb/h-ft}^2$$

$$\frac{K y A}{L} = \lambda_o \left(\frac{L}{G} \right)_{op}^{-n} = 0.075 (1.596)^{-0.42} = 0.06163$$

$$K y A = \frac{K y A}{L} L = 0.06163 \times 1246 = 76.79 \text{ lb/h-ft}^3$$

2.8.6 Altura del empaque

$$HTU = \frac{G}{K y A} = \frac{780.70}{76.79} = 10.167 \text{ ft}$$

$$Z = NTU \times HTU = 1.753 \times 10.167 = 17.82 \text{ ft}$$

Ahora, consideremos las restricciones,

$$\bar{p} = p_2 - \frac{\Delta p}{2} = 0.076 - 0.00406/2 = 0.07397$$

$$V_A = \frac{G}{\bar{p} \times 3600} = \frac{780.7}{0.07397 \times 3600} = 2.93 \text{ ft/s} < 3.5$$

por lo tanto, volvemos al paso 2.8.1, suponiendo otra relación de (L/G)

2.8.1

$$\text{Suponemos } (L/G)_{op}/(L/G)_{max} = 0.5$$

$$(L/G)_{op} = 0.5 \times 2.28 = 1.14$$

$$W_a = 18,006,000 / 1.14 = 15,795,000 \text{ lb/h}$$

$$i_1 = 1.14 \times 10 + 20.9 = 32.3 \text{ BTU/lb aire seco}$$

2.8.2

i	i^*	$i^* - i$	$1/i^* - i$	ord. m	Δi	area p.
20.900	33.894	12.994	0.077	-----	-----	-----
22.040	34.783	12.743	0.078	0.078	1.140	0.089
23.180	35.565	12.385	0.081	0.080	1.140	0.091
24.320	36.562	12.242	0.082	0.081	1.140	0.093
25.460	37.345	11.885	0.084	0.083	1.140	0.095
26.600	38.235	11.635	0.086	0.085	1.140	0.097
27.740	39.126	11.386	0.088	0.087	1.140	0.099
28.880	40.018	11.138	0.090	0.089	1.140	0.101
30.020	41.125	11.105	0.090	0.090	1.140	0.103
31.160	42.232	11.072	0.090	0.090	1.140	0.103
32.300	43.700	11.400	0.088	0.089	1.140	0.101

$$\text{NTU} = \text{Area total} = 0.970$$

$$\alpha = 1.771$$

$$\Delta i = 32.3 - 20.9 = 11.4$$

$$\Delta i_m = 22.8$$

$$\Delta p_m = 0.0046$$

$$\Delta p = 0.0058 \times 11.4 / 22.8 = 0.0029$$

$$p_1 = 0.076 - 0.0029 = 0.0731$$

$$S = 2 \times 0.0029 \times 10 \times 1.771^3 / 0.076 \times 22.8 = 0.1859$$

$$T = 0.1859 \times (1/0.970 + 0.5)^{-3} = 0.0511$$

2.8.4

$$D = 135 \text{ ft}$$

2.8.5

$$L = 1246 \text{ lb/h-ft}^2$$

$$G = 1093 \text{ lb/h-ft}^2$$

$$K \text{ y } A / L = 0.075 (1.14)^{-0.42} = 0.07098$$

$$K \text{ y } A = 88.45$$

2.8.6

$$HTU = 12.3575$$

$$Z = 11.9 \text{ ft}$$

comprobación:

$$\bar{\rho} = 0.076 - 0.0029/2 = 0.07455$$

$$V_A = 4.07 \text{ ft/s dentro del rango}$$

2.8.7 Cálculo de la caída de presión

La evaluación se hace gráficamente, y puede observarse - el resultado en la figura 2.8.7.1

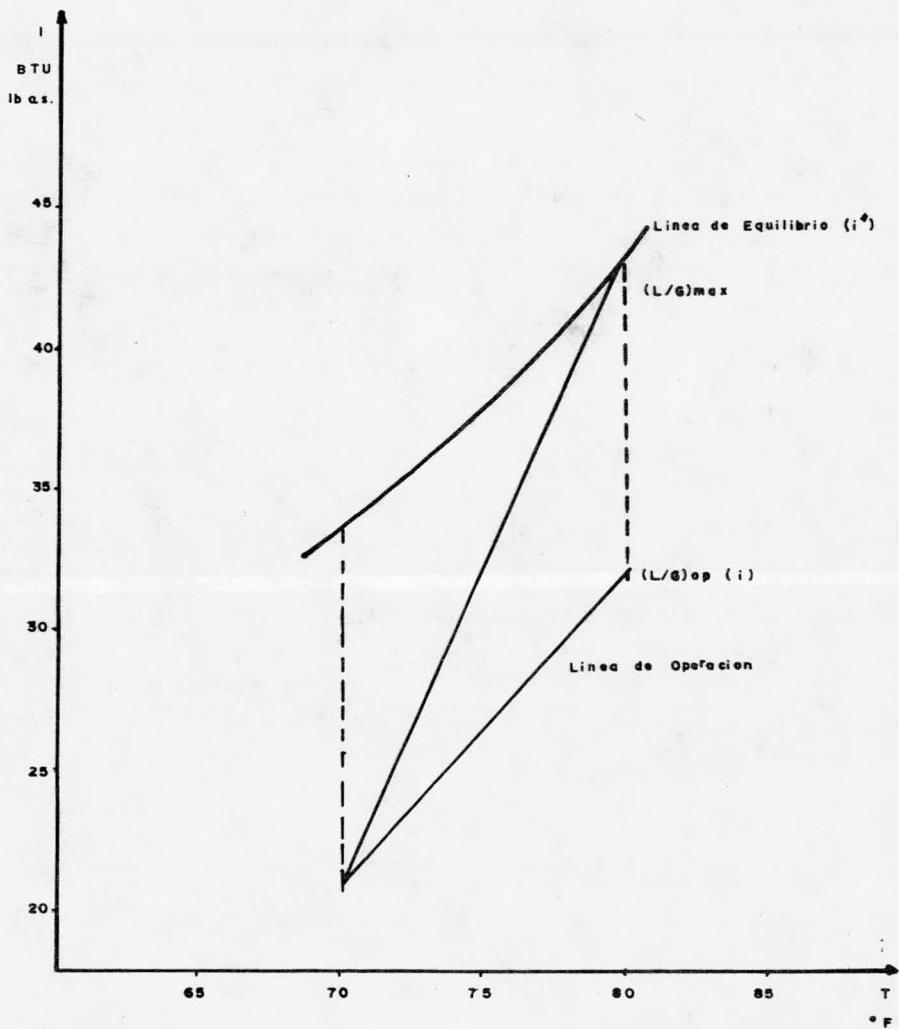
El valor encontrado de N_p fue de 1.567

$$N = N_p Z 1.67 = 1.567 \times 11.9 \times 1.67 = 31.141$$

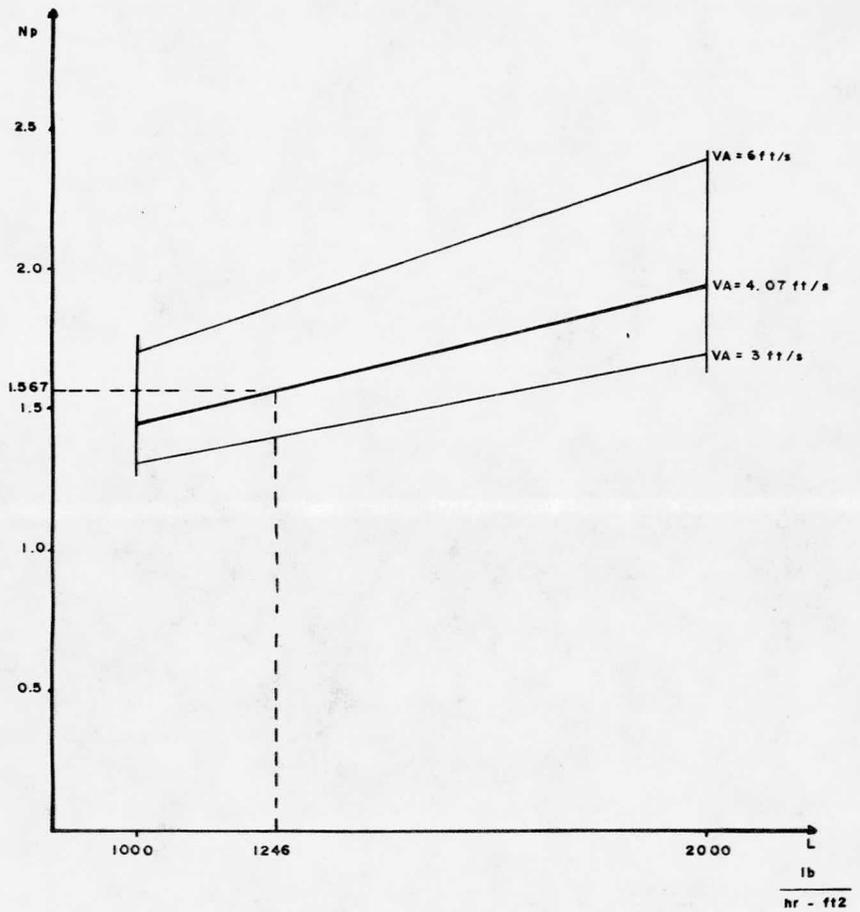
2.8.8 Cálculo de la altura del tiro

$$H = \frac{N_p \times L^2}{T \times 4.17312 \times 10^8 \times \rho_2^2} = \frac{31.141 \times 1246^2}{.0511 \times 4.17312 \times 10^8 \times .076^2}$$

$$H = 392.518 \text{ ft}$$



LINEAS DE EQUILIBRIO Y DE OPERACION	
T E S I S P R O F E S I O N A L	
U N A M	F A C . Q U I M I C A
FIGURA 2.6.1.1	1 9 7 9



DETERMINACION DE CAIDA DE PRESION	
T E S I S P R O F E S I O N A L	
U N A M	FAC. QUIMICA
FIGURA 2.8.7.1	1 9 7 9

2.9 Programa

Con el fin de simplificar los cálculos del predimensionamiento de las torres de enfriamiento de tiro natural, se ha elaborado un programa de computadora en lenguaje FORTRAN V, que permite efectuarlos con un mínimo de tiempo y esfuerzo. A continuación se enlistan los parámetros que requiere el programa y su formato de entrada:

VARIABLE	UNIDADES	FORMATO
Tipo de empaque, de acuerdo con la figura 2.4.1	-----	I2
Flujo de agua	lb/hr	F8.0
Temperatura de entrada del agua a la torre	° F	F10.3
Temperatura requerida de salida del agua	° F	F10.3
Temperatura media de bulbo seco	° F	F10.3
Temperatura media de bulbo húmedo	° F	F10.3
Presión atmosférica	psia	F10.3

Indice de continuación de
lectura de datos:

1 continúa

0 se detiene

I2

El programa cuenta con cuatro funciones y 5 subrutinas para la resolución del problema. De estos subprogramas, las cuatro funciones y dos de las subrutinas son para el cálculo de las propiedades del sistema aire-agua; - una subrutina coordina y llama a las anteriores para la definición de los datos necesarios en el programa principal; otra subrutina hace la integración numérica de NTU por el método de Simpson, y la última efectúa la regre-sión lineal para la determinación de N_p .

El diagrama de flujo del programa, así como las interrelaciones de programas se muestran en la figura 2.9.1.

Las funciones y subrutinas utilizadas son las siguientes:

HUM : Función que determina la humedad absoluta de una mezcla aire-agua a partir de la presión del sistema y la presión de vapor del agua.

CALLAT: Función que calcula el calor latente de evaporación del agua a una temperatura dada en °F. El resultado se expresa en BTU/lb.

PRETEM: Función que calcula la presión de vapor del agua a una temperatura dada en ° F. El resultado se expresa en psia.

ENTSAT: Función que determina la entalpía de saturación de la mezcla aire-agua con datos de temperatura y humedad absoluta del sistema, expresando el resultado en BTU/lb aire seco.

- HUMREL:** Subrutina que calcula la humedad relativa del -- sistema aire-agua a partir de datos de presión - atmosférica, presiones de vapor del agua a las - temperaturas de bulbo húmedo y seco, y las tempe raturas de bulbo seco y húmedo.
- DENDAD:** Subrutina que determina la densidad del sistema a partir de datos de presión atmosférica, tempe- ratura y humedad absoluta, dando el resultado en lb/ft³.
- RGSION:** Subrutina que calcula la caída de presión a tra- vés de la sección empacada del aire a partir de datos experimentales, gasto de líquido y veloci- dad del aire. El resultado está en cabezas de ve cidad / ft de empaque.
- AINTE** : Subrutina que efectúa la integración numérica de la función de NTU por el método de Simpson, lla- mando datos de ENTSAT, PRETEM y HUM para lograr- lo.
- PROTER:** Subrutina que coordina y llama a los subprogra- mas de propiedades para la determinación de la - mezcla aire-agua. Proporciona estos valores de - humedades absoluta y relativa, entalpía, entalpía de saturación y densidad para un juego de datos de presión atmosférica, y temperaturas de bulbo - húmedo y seco.

El tiempo total de ejecución del programa en una com putadora UNIVAC modelo 1106, con tres torres fue de 1 mi nuto con 7.63 segundos, de los cuales 10.3 segundos fue- ron de CPU y el resto de compilación, rastreo y entrada y salida. La memoria utilizada de máquina fue de 42 CORE

equivalentes a 21 K aproximadamente.

El listado del programa, así como los resultados, se presentan a continuación. Al final, se encuentra el desglose del tiempo de máquina y otros datos importantes.

GRUPO CARWAL 4 EB0671BE7ED72750 JOSE ANTONIO MARTINEZ NIT EXT 2003

FOR: IS *PI* CALLAT
FOR 00E3-11/09/78-09:19:40

FUNCTION CALLAT ENTRY POINT 000037

STORAGE USED: CODE(1) 000043; DATA(0) 000026; BLANK COMMON(2) 000000

EXTERNAL REFERENCES (BLOCK, NAME)

0003 APRK
0004 HERR35

STORAGE ASSIGNMENT (BLOCK, TYPE, RELATIVE LOCATION, NAME)

0000 R 000003 A 0000 R 000000 CALLAT 0000 R 000006 ENTALP 0000 R 000004 EX 0000 000021 INJPS
0000 R 000005 PRE 0000 R 000001 TK 0000 R 000002 TRED

00100	1*	C			000000
00100	2*	C	FUNCION PARA LA DETERMINACION DEL CALOR LATENTE DE VAPORIZACION		000000
00100	3*	C	DEL AGUA		000000
00100	4*	C			000000
00100	5*	C	T=TEMPERATURA, F		000000
00100	6*	C	CALLAT=CALOR LATENTE DE VAPORIZACION, BTU/LB		000000
00100	7*	C			000000
00101	8*		FUNCION CALLAT(T)		000000
00103	9*		TK=(T-32.)/1.8+273.		000000
00104	10*		INLQ=TK/647.3		000000
00105	11*		A=1.-TRED		000004
00106	12*		EX=A/.4340594		000000
00107	13*		PRE=EX**+.30		000010
00110	14*		ENTALP=977.9*PRE		000012
00111	15*		CALLAT=ENTALP*T*+.0912543-18.758931		000021
00112	16*		RETURN		000020
00113	17*		END		000042

END OF COMPILATION: NO DIAGNOSTICS.

MPOR15 #1P#4#PRETEM
FOR 00E3-11/09/78-09:20:02

FUNCTION PRETEM ENTRY POINT 000050

STORAGE USED: COLE(1) 000054; DATA(0) 000031; BLANK COMMON(2)-000000

EXTERNAL REFERENCES (BLOCK, NAME)

0003 EXP
0004 XPKK
0005 MERRK3\$

STORAGE ASSIGNMENT (BLOCK, TYPE, RELATIVE LOCATION, NAME)

0000 R 000003 EXPO 0000 000023 INJP\$ 0000 R 000005 P 0000 R 000004 PREPRE 0000 R 000000 PRETEM
0000 R 000001 TLMFK 0000 R 000002 TR

00100	1*	C		00000n
00100	2*	C	FUNCION PARA LA DETERMINACION DE LA PRESION DE VAPOR DEL AGUA	00000n
00100	3*	C	A UNA TEMPERATURA DADA	00000n
00100	4*	C		00000n
00100	5*	C	TEMPERATURA, F	00000n
00100	6*	C	PRESION DE VAPOR, PSIA	00000n
00100	7*	C		00000n
00101	8*		FUNCION PRETEM(TEMP)	00000n
00103	9*		TEMP=(TLMF-32.)/1.8+273.	00000n
00104	10*		TR=TEMP/647.3	00000n
00105	11*		LAPO=(-20.)+(TR-0.163)**2.)	00000n
00106	12*		PREPRE=(-3.1423/TR)+8.361-EXP(EXPO)	00001p
00107	13*		P=(10.**PREPRE*14.69n/760.)*(TEMP*(-.0001001)+1.03078n)	00002p
00110	14*		PRETEM=P	00003n
00111	15*		RETURN	00003p
00112	16*		END	00005p

END OF COMPILATION: NO DIAGNOSTICS.

FORM 15 * 1PF 5 * ENT SAT
 FOR 0003-11/09/70-09:23:18

FUNCTION: ENT SAT LTPY POL: L 000020

STORAGE USED: CORE(1) 000036; DATA(0) 000013; BLANK COMMON(2) 000000

EXTERNAL REFERENCES (BLOCK, NAME)

0003 CALLAT
 0004 IENKRS

STORAGE ASSIGNMENT (BLOCK, TYPE, RELATIVE LOCATION, NAME)

0003 R 000000 CALLAT 0000 R 000000 ENT SAT 0000 0001/05 IN: P5

00100	1*	C						000000
00100	2*	C	FUNCION PARA LA DETERMINACION DE LA ENTALPIA DE SATURACION					000000
00100	3*	C	DEL SISTEMA AIRE-AGUA					000000
00100	4*	C						000000
00100	5*	C	TEMPERATURA DE ABLUO HUMERO, F					000000
00100	6*	C	ENTALPIA DE SATURACION, BTU/LB A.S.					000000
00100	7*	C						000000
00101	3*	C	FUNCTION: ENT SAT (TR5*HS)					000000
00103	3*	C	ENT E=24*(US*HS*(CALLAT(7BS))+45*(TR5-32.))					000000
00104	1*	C	ENT SAT=ENT					000014
00105	1*	C	RETURN					000014
00106	1*	C	END					000035

END OF COMPILATION: NO DIAGNOSTICS.

090URJLS *TPI*3, HUMIDEL
FOR 00EJ3-11/09//8-09:26:19

SUBROUTINE HUMIDEL ENTRY POINT 000025

STORAGE USED: CODE(1) 000031, DATA(0) 000013, BLANK COMMON(27) 000000

EXTERNAL REFERENCES (BLOCK, NAME)

0003 HERR35

STORAGE ASSIGNMENT (BLOCK, TYPE, RELATIVE LOCATION, NAME)

0000 K 000000 F1 0000 K 000001 F2 0000 R 000002 F3 0000 000007 INJPS

00100	C	SUBROUTINA PARA LA DETERMINACION DE LA HUMEDAD RELATIVA DEL SISTEMA	000000
00100	1*	AIRE-AGUA	000000
00100	2*		000000
00100	3*		000000
00100	4*		000000
00100	5*	PRESION DEL SISTEMA, PSIA	000000
00100	6*	T1=TEMPERATURA DE BULBO SECO, F	000000
00100	7*	T2=TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO, F	000000
00100	8*	P1=PRESION DE VAPOR DEL AGUA A TEMPERATURA DE BULBO SECO, PSIA	000000
00100	9*	P2=PRESION DE VAPOR DEL AGUA A TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO, PSIA	000000
00100	10*	H=HUMEDAD RELATIVA	000000
00100	11*		000000
00100	12*	SUBROUTINA HUMREL(P,T1,T2,P1,P2,H)	000000
00103	13*	F1=(12+1539)/1571	000000
00104	14*	F2=(1+T1)/100	000000
00105	15*	F3=F2/F2+F1	000000
00106	16*	H=H*F3/P1*100	000000
00107	17*	RETURN	000000
00110	18*	END	000000

END OF COMPILATION: NO DIAGNOSTICS.

WORKING POINT REGRESSION
FOR 00E3-11/09/78-09:33:05

SUBROUTINE REGION ENTRY POINT 000042

STORAGE USED: COLE(1) 000047; DATA(0) 000022; BLANK COMMON(2) 000000

EXTERNAL REFERENCES (BLOCK, NAME)

0003 HERR35

STORAGE ASSIGNMENT (BLOCK, TYPE, RELATIVE LOCATION, NAME)

0000 R 000000 AM 0000 R 000007 DP 0000 R 000006 DY 0000 000014 INJP3 0000 R 000001 PM
0000 R 000002 YA 0000 R 000004 YA1 0000 R 000003 YP 0000 R 0000 5 YP1

00100	1*	C		00000n
00100	2*	C	SUBROUTINA QUE EFECTUA LA REGRESION LINEAL PARA LA DETERMINACION	00000n
00100	3*	C	DE LA CAIDA DE PRESION	00000n
00100	4*	C		00000n
00100	5*	C	ALIC=FLEUDO DE LIQUIDO, LB/HP-FT2	00000n
00100	6*	C	VA=VELOCIDAD DEL AIRE, FT/SEG	00000n
00100	7*	C	ENL=CAIDA DE PRESION, CABEZAS DE VELOCIDAD	00000n
00100	8*	C		00000n
00101	9*	C	SUBROUTINE REGION(ALIC,VA,X11,X12,X21,X22,ENE)	00000n
00103	10*		AM=(X12-A22)/3.	00000n
00104	11*		PM=(X11-X21)/3.	00000n
00105	12*		YA=VA-3.	000007
00106	13*		YB=VA-3.	000012
00107	14*		YA1=AM*YA+X22	000013
00110	15*		YP1=PM*YP+X21	000017
00111	16*		DY=(YA1-YP1)/1000.	000021
00112	17*		DP=DY*(ALIC-1000.)*YP1	000024
00113	18*		ENL=DP.	000031
00114	19*		RETURN	000032
00115	20*		END	000046

END OF COMPILATION: NO DIAGNOSTICS.

WORK IS IN PROGRESS
 FOR 00L3-11/09/70-09:33:55

SUBROUTINE AINT ENTRY POINT 000100

STORAGE USED: CODE(1) 000117; DATA(0) 000113; BLANK COMMON(21) 000000

EXTERNAL REFERENCES (BLOCK, NAME)

0003 PRETEM
 0004 HUM
 0005 LNTSAT
 0006 HERR35

STORAGE ASSIGNMENT (BLOCK, TYPE, RELATIVE LOCATION, NAME)

0001	000062	1L	0001	000011	111G	0000	R	000064	AREA	0000	P	000074	AREAP	0000	R	000062	DELTA		
0000	R	000000	DE5	0000	R	000071	DP	0000	R	000073	C5	0005	R	000000	ENTSAT	0000	R	000070	ES5
0000	R	000031	ES5	0000	R	000067	H55	0004	R	000000	HUM	0000	I	000065	I	0000		000100	INJPS
0000	R	000072	DA	0003	R	000000	PRETEM	0000	R	000066	P5	0000	R	000063	TP				

00100	1*	C																000000
00100	2*	C																000000
00100	3*	C																000000
00100	4*	C																000000
00100	5*	C																000000
00100	6*	C																000000
00100	7*	C																000000
00100	8*	C																000000
00100	9*	C																000000
00100	10*	C																000000
00101	11*	C																000000
00103	12*	C																000000
00104	13*	C																000000
00105	14*	C																000000
00106	15*	C																000000
00107	16*	C																000000
00110	17*	C																000011
00113	18*	C																000011
00114	19*	C																000015
00115	20*	C																000022
00116	21*	C																000027
00117	22*	C																000032
00120	23*	C																000035
00121	24*	C																000041
00122	25*	C																000044
00124	26*	C																000047
00125	27*	C																000052
00126	28*	C																000055
00127	29*	C																000057
00130	30*	C																000061
00132	31*	C																000061
00133	32*	C																000065
00134	33*	C																000116

DATA DOCUMENTATION CENTER

PROGRAM: PROTER
FOR 00LS-11/09/78-09:34:10

SUBROUTINE PROTER ENTRY POINT 000060

STORAGE USED: CODE(1) 000120; DATA(0) 000007; BLANK COMMON(2) 000000

EXTERNAL REFERENCES (BLOCK, NAME)

0003 HRLTLM
0004 HUM
0005 HUMREL
0006 LNTSAT
0007 DENDAD
0010 WERRK35

STORAGE ASSIGNMENT (BLOCK, TYPE, RELATIVE LOCATION, NAME)

0006 R 000000 LNTSAT 0004 R 000000 HUM 0000 000003 INJPS 0000 R 000001 PH 0003 R 000000 PRETEM
0000 R 000000 PS

00100	1*	C		000000
00100	2*	C	SUBROUTINA QUE LLAMA A LAS FUNCIONES Y SUBROUTINAS DE PROPIEDADES	000000
00100	3*	C	TERMOFISICAS	000000
00100	4*	C		000000
00100	5*	C	PS=PRESION DE VAPOR DEL AGUA A TEMPERATURA DE BULBO SECO, PSIA	000000
00100	6*	C	PH=PRESION DE VAPOR DEL AGUA A TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO, PSIA	000000
00100	7*	C	T=TEMPERATURA DE BULBO SECO, F	000000
00100	8*	C	TH=TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO, F	000000
00100	9*	C	HS=HUMEDAD DE SATURACION DEL SISTEMA, LB AGUA/LB A.S.	000000
00100	10*	C	H=HUMEDAD RELATIVA, %	000000
00100	11*	C	HA=HUMEDAD ABSOLUTA DEL SISTEMA, LB AGUA/LB A.S.	000000
00100	12*	C	ES=ENTALPIA DE SATURACION, BTU/LB A.S.	000000
00100	13*	C	E=ENTALPIA DEL SISTEMA, BTU/LB A.S.	000000
00100	14*	C	LE=LENSIDAD DEL SISTEMA, LB/FT3	000000
00100	15*	C		000000
00101	16*	C	SUBROUTINE PROTER(P,TBS,TH,HS,HR,H,ES,F,HD)	000000
00103	17*	C	PS=PRETEM(TBS)	000000
00104	18*	C	PH=PRETEM(TH)	000000
00105	19*	C	HS=HUM(H,PS)	000003
00106	20*	C	CALL HUMREL(P,TBS,TH,PS,PH,HR)	000007
00107	21*	C	H=HS*HR/100.	000010
00110	22*	C	ES=ENTSAT(HS,HS)	000020
00111	23*	C	E=ENTSAT(TH,TH)	000030
00112	24*	C	CALL DENDAD(P,TH,H,HD)	000030
00113	25*	C	RETURN	000040
00114	26*	C	END	000050
				000117

END OF COMPILATION: NO DIAGNOSTICS.

WFOR:IS (TYPE, NAME)
 FOR 0005-11/09/78-09:34:37

MAIN PROGRAM

STORAGE USED: CODE(1) 000520; DATA(0) 000556; BLANK COMMON(2) 000000

EXTERNAL REFERENCES (BLOCK, NAME)

0000 AINT
 0004 PRTER
 0005 PRETR
 0006 IUT
 0007 ENTSAT
 0010 RBSICH
 0011 ALTR3
 0012 MKDU3
 0013 H023
 0014 HERR23
 0015 SORT
 0016 XPRR
 0017 MPHIS
 0020 WSTOP3

STORAGE ASSIGNMENT (BLOCK, TYPE, RELATIVE LOCATION, NAME)

0001	000036	1L	0001	000113	10L	0000	000076	102F	0000	000102	103F	0000	000133	104F		
0000	000213	105F	0000	000307	106F	0000	000362	107F	0000	000457	108F	0000	000117	11L		
0001	000043	2L	0001	000165	20L	0001	000002	200L	0001	000266	21L	0001	000355	22L		
0001	000073	23L	0001	000050	3L	0001	000055	4L	0001	000062	5L	0001	000067	6L		
0001	000074	7L	0001	000101	0L	0001	000106	9L	0000	R	000043	A	0000	R	000054	ALFA
0000	R	000051	ALFA3	0000	R	000044	B	0000	R	000041	DR	0000	R	000057	CD	
0000	R	000056	DL	0000	R	000042	DEM	0000	R	000064	DIAM	0000	P	000071	CP	
0000	R	000060	DI	0000	R	000033	D2	0000	R	000040	ED	0000	R	000173	EKE	
0007	R	000000	ENTSAT	0000	R	000053	ETWM	0000	R	000046	E1	0000	R	000032	E2	
0000	R	000021	E25	0000	R	000050	FAC1	0000	R	000065	FAC2	0000	R	000066	GAS	
0000	R	000026	HA	0000	R	000035	HRH	0000	R	000027	HR2	0000	R	000034	FSB	
0000	R	000067	H1U	0000	R	000052	HTWM	0006	R	000000	HUM	0000	P	000030	H2	
0000	I	000010	I0ENT	0000	R	000037	KYA	0000	R	000000	KYAL	0000	R	000001	L	
0000	R	000004	LENGO	0000	I	000005	L1U	0000	R	000002	N	0000	R	000000	NTU	
0005	R	000000	PRETR	0000	R	000051	PTWM	0000	R	000062	SPEC	0000	R	000015	TRH	
0000	R	000063	TORRE	0000	R	000025	TWM	0000	R	000012	TW1	0000	R	000013	TW2	
0000	R	000047	VL	0000	R	000011	W	0000	R	000045	WA	0000	R	000020	X11	
0000	R	000022	X21	0000	R	000023	X22	0000	R	000070	Z					

00100	1*	C		000000
00100	2*	C	PROGRAMA PARA EL DIMENSIONAMIENTO PRELIMINAR DE TORRES	000000
00100	3*	C	DE ENFRIAMIENTO DE TIRO NATURAL	000000
00100	4*	C	TESIS PRESENTADA POR: JOSE ANTONIO MARTINEZ NII	000000
00100	5*	C	ASESOR DE TESIS: ING. ANTONIO FRIAS MENDOZA	000000
00100	6*	C		000000
00101	7*	C	REAL I.TU.L.N.LENGO,LENGO,LIC,KYAL,KYA	000000
00101	8*	C		000000
00101	9*	C	LECTURA DE DATOS	000000
00101	10*	C		000000
00103	11*	C	200 READ(5,102) IDENT,W,TW1,TW2,TDS,TBH,PATM,ICONT	000000

00103	12*	C	
00103	13*	C	
00103	14*	C	
00115	15*		SELECCION DE VARIABLES DE ACUERDO CON EL TIPO DE EMPAQUE
00116	16*		GO TO (1,2,3,4,5,6,7,8,9,10),IDFNT
00117	17*		1 L=0.094
00120	18*		N=0.50
00125	19*		DATA X11,X12,X21,X22/3.7,4.8,3.3,3.9/
00126	20*		GO TO 11
00127	21*		2 L=0.075
00130	22*		N=0.42
00135	23*		DATA X11,X12,X21,X22/1.7,2.4,1.3,1.7/
00136	24*		GO TO 11
00137	25*		3 L=0.110
00140	26*		N=0.72
00145	27*		DATA X11,X12,X21,X22/0.8,1.1,0.6,0.8/
00146	28*		GO TO 11
00147	29*		4 L=0.110
00150	30*		N=0.66
00155	31*		DATA X11,X12,X21,X22/1.0,1.6,0.5,0.8/
00156	32*		GO TO 11
00157	33*		5 L=0.679
00160	34*		N=0.58
00165	35*		DATA X11,X12,X21,X22/0.9,1.7,0.75,1.2/
00166	36*		GO TO 11
00167	37*		6 L=0.163
00170	38*		N=0.71
00175	39*		DATA X11,X12,X21,X22/4.3,5.4,3.8,4.3/
00176	40*		GO TO 11
00177	41*		7 L=0.203
00200	42*		N=0.70
00205	43*		DATA X11,X12,X21,X22/2.7,3.1,2.5,3.0/
00206	44*		GO TO 11
00207	45*		8 L=0.154
00210	46*		N=0.67
00215	47*		DATA X11,X12,X21,X22/2.1,2.6,1.8,2.2/
00216	48*		GO TO 11
00217	49*		9 L=0.086
00220	50*		N=0.52
00225	51*		DATA X11,X12,X21,X22/2.5,3.1,1.9,2.7/
00226	52*		GO TO 11
00227	53*		10 L=0.080
00230	54*		N=0.53
00230	55*		DATA X11,X12,X21,X22/1.7,2.5,1.4,1.8/
00230	56*	C	
00230	57*	C	2.9.1 BALANCE DE MATERIA Y ENERGIA
00235	58*	C	
00236	59*		11 DTW=(T1-T2
00236	60*		TIME)/(TW1+TW2)/2.
00236	61*	C	
00236	62*	C	CALCULO DE PROPIEDADES DEL AIRE A LA ENTRADA
00237	63*		CALL PROTER(PATM,TUS,1,HB,H2,HR2,H2,E2B,E2,DB)
00237	64*	C	
00237	65*	C	CALCULO DE PROPIEDADES DEL AIRE EN EL PUNTO DBB
00237	66*	C	CALL PROTER(PATM,TW1,TW1,HSB,HRB,HB,E2B,EB,DB)
00240	67*		
00240	68*	C	
00240	69*	C	DETERMINACION DE L/G MAXIMA Y DE OPERACION
00240	70*	C	
00241	71*		DEF=EL-L2
00242	72*		LEIGH=DEF/DTW

000002
000002
000002
000017
000037
000037
000041
000041
000043
000044
000046
000046
000050
000050
000051
000053
000053
000054
000054
000056
000060
000060
000062
000063
000065
000065
000067
000070
000072
000072
000075
000075
000077
000077
000101
000102
000102
000106
000106
000106
000107
000111
000111
000111
000114
000114
000117
000117
000117
000117
000121
000121
000121
000121
000125
000125
000125
000125
000140
000140
000140
000140
000140
000140
000140
000140
000153
000153
000156

00243	7.0*		LENGO=LENGM*.70			000160
00243	7.4*	C				000160
00243	7.0*	C	CALCULO DEL FLUJO DE AIRE Y ENTALPIA DE SALIDA			000160
00243	7.0*	C				000160
00244	7.7*		WBU.			000160
00245	7.0*		WBL.			000160
00246	7.0*		20 WAF=W/LENGO			000160
00247	8.0*		L1=LENGO*ETW*E2			000160
00250	8.1*		VL=20.			000170
00250	8.2*	C				000170
00250	8.3*	C	2.9.2 CALCULO DEL NUMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA			000170
00250	8.4*	C				000170
00251	8.0*	C	CALL XINT(PATW*TW2*TW1*E2,LENGO,NTU)			000170
00251	8.0*	C				000170
00251	8.7*	C	2.9.3 DETERMINACION DE LOS NUMEROS DE ESPECIFICACION Y DE LA TORRE			000170
00251	8.0*	C				000170
00252	8.7*		FAC1=1./HTU*0.5			000200
00253	9.0*		PIW=PRELEM*(TWM)			000210
00254	9.1*		HTW=HUM*(PATM*PTWM)			000210
00255	9.2*		LTW=LENTSAI*(TWM,HTWM)			000220
00256	9.3*		ALFA=LTW*(F21/DTW)			000220
00257	9.4*		UO=UO2-UO			000230
00260	9.0*		W=UO-E2			000230
00261	9.0*		UO=UO2*DE/UEM			000240
00262	9.7*		U1=UO2-UO			000240
00263	9.0*		ALFA3=ALFA**3.			000240
00264	9.0*		SPLC2=UO*DTW*ALFA3/(D2*UEM)			000250
00265	10.0*		TORRE=SPLC*(FAC1**(3.))			000250
00265	10.1*	C				000260
00265	10.2*	C	2.9.4 DETERMINACION DEL DIAMETRO DE LA SECCION EMPACADA			000260
00265	10.3*	C				000260
00266	10.4*		21 DIAM=SQR((W*.020437232/VL)			000260
00266	10.5*	C				000260
00266	10.5*	C	2.9.5 CALCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA			000260
00266	10.7*	C				000260
00267	10.0*		FAC2=1.27323955/(DIAM**2.)			000260
00270	10.0*		LIG=FAC2**.			000270
00271	11.0*		WAS=W*FAC2			000300
00272	11.1*		KYAL=L*(LENGO**(N))			000300
00273	11.2*		KTA=KYAL*LIG			000310
00273	11.0*	C				000310
00273	11.1*	C	2.9.6 ALTURA LE EMPAQUE			000310
00273	11.0*	C				000310
00274	11.0*		HTU=6AS/KTA			000320
00275	11.7*		Z=HTU*NTU			000320
00275	11.0*	C				000320
00275	11.9*	C	2.9.7 CALCULO DE LA CAIDA DE PRESION			000320
00275	12.0*	C	VERIFICACION DE VELOCIDADES DE AIRE Y AGUA			000320
00275	12.1*	C				000320
00276	12.2*		UO=UO2-UO/2.			000320
00277	12.0*		V=6AS/(D4*3600.)			000320
00300	12.4*		IF (VA,GE.3.5)GO TO 22			000330
00302	12.0*		A=A+1.			000330
00303	12.0*		IF (A,GT.3.)GO TO 23			000340
00305	12.7*		LENGO=LENGM*(.7-.1*A)			000340
00306	12.0*		GO TO 20			000340
00307	12.9*		22 IF (VA,LE.4.5)GO TO 23			000350
00311	13.0*		U=U+1.			000350
00312	13.1*		IF (R,GT.4.)GO TO 23			000360
00314	13.2*		VL=VL-B			000360
00315	13.0*		GO TO 21			000370

MAPRZ 72R101 11/07/70 03:51:21

1. IN IPFS.HDR
2. IN IPFS.CALLAT
3. IN IPFS.FORCLM
4. IN IPFS.FIGAT
5. IN IPFS.HORPDL
6. IN IPFS.DENPDL
7. IN IPFS.KRSSION
8. IN IPFS.AINT
9. IN IPFS.PRTER
10. IN IPFS.MARK

ADDRESS LIMITS 001000 013406 5303 10ANK WORDS DECIMAL
 040000 045054 2005 10ANK WORDS DECIMAL
 STARTING ADDRESS 012007

SEGMENT 3MATH3 001000 013406 040000 045054

NSWTC3/FOR-03	3(1)	001000	001024		
NRDLK3/FOR-L2	3(1)	001025	001047		
NRFLD3/FOR-L2	3(1)	001050	001133	3(2)	040000 040011
NRFL3/FOR-L2	3(1)	001134	001141	3(2)	040012 040031
NRUCV3/FOR-L3	3(1)	001132	001172	3(2)	040032 040107
NFTCH3/FOR-L2	3(1)	001473	001755	3(2)	040110 040123
NFIV3/FOR-L2	3(1)	001756	002000		
NCHVT3/FOR-00	3(1)	002001	002222	3(2)	040124 040220
NCLCS3/FOR-L3	3(1)	002223	002460	3(2)	040221 040246
NRDLK3/FOR-00	3(1)	002461	002572		
NRSHL3/FOR-L3	3(1)	002573	002627		
NRFDAS/FOR-00	3(1)	002630	002663		
NRFOUS	3(1)			3(2)	040247 042462
NRDR3/FOR-L3	3(1)	002664	003111	3(2)	042463 042632
NR0312	3(1)	003112	004626	3(2)	042633 042674
NRINT3/FOR-L3	3(1)	004627	005055	3(2)	042675 042702
NRINT3/FOR-L3	3(1)	005056	005445	3(2)	042703 042736
NRMT3/FOR-L3	3(1)	005446	007330	3(2)	042737 043013
NRCHK3/FOR-L3	3(1)	007331	010322	3(2)	043014 043164
	3(3)	010323	010323	3(4)	043165 043236
NRAB3/FOR-L3	3(1)			3(2)	043237 043275
FORCOR3/FOR-10	3(1)			3(2)	043276 043303
FORVCOM3/FOR-TE3	3(1)			3(2)	043304 043313
LRU3/SYS7304					
NRCONB3/FOR-TE3	3(1)	010324	010403	3(2)	043314 043327
NRSTOP3/FOR-TE3	3(1)	010404	010446	3(2)	043328 043337
NRSTMS3/FOR-L3	3(1)	010447	010711	3(2)	043338 043341
NRST3/FOR-03	3(1)	010712	010752	3(2)	043342 043353
NRILK3/FOR-L3	3(1)	010753	011130	3(2)	043354 043473
NRIDF3/FOR-L2	3(1)	011131	011170	3(2)	043474 043474
NRINT3/FOR-L3	3(1)	011171	011243	3(2)	043475 043512
NRXP3/FOR-03	3(1)	011244	011333	3(2)	043513 043533
NRXP3/FOR-L3	3(1)	011334	011531	3(2)	043534 043605
NRERR3/FOR-L3	3(1)	011532	012075	3(2)	043606 043776
BLANKCOMMON(COMMONLOCK)					
HUM	3(1)	012076	012117	3(0)	043777 044007
				3(2)	BLANKCOMMON
CALLAT	3(1)	012120	012162	3(0)	044010 044035

PRETEM	*(1)	012163	012236	*(2)	BLANK\$COMMON
				*(0)	044036 044066
ENTSAT	*(1)	012237	012274	*(2)	BLANK\$COMMON
				*(0)	044067 044101
HUMREL	*(1)	012275	012325	*(2)	BLANK\$COMMON
				*(0)	044102 044114
DENDAD	*(1)	012326	012360	*(2)	BLANK\$COMMON
				*(0)	044115 044132
RGSION	*(1)	012361	012427	*(2)	BLANK\$COMMON
				*(0)	044133 044154
AINT	*(1)	012430	012546	*(2)	BLANK\$COMMON
				*(0)	044155 044267
PROTER	*(1)	012547	012666	*(2)	BLANK\$COMMON
				*(0)	044270 044276
MAIN	*(1)	012667	013406	*(2)	BLANK\$COMMON
				*(0)	044277 045054

SYSTORLIBS. LEVEL 7SR1
END MAP

0XQT

11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

PRESION ATMOSFERICA 14.696 PSIA

TEMPERATURAS MEDIAS: BULBO HUMEDO 51.70 F

BULBO SECO 57.00 F

TIPO DE EMPAQUE 2

TEMPERATURA DEL AGUA: ENTRADA 80.00 F

SALIDA 70.00 F

RESULTADOS

CONDICIONES DEL AIRE

	A LA ENTRADA:	A LA SALIDA:	EN EL PUNTO R:
HUMEDAD RELATIVA (%)	69.77	NO CALCULADO	100.00
HUMEDAD (LB AGUA/LB A.S.)	.00686	NO CALCULADO	.02214
ENTALPIA (BTU/LB A.S.)	19.77	31.35	42.89
DENSIDAD (LB/FT ³)	.07682	.07394	.07107

RELACIONES LIQUIDO/VAPOR: MAXIMO 2.5123 NORMAL 1.1561

FLUJO DE LIQUIDO: 10006000.00 LB/HR
1246.00 LB/HR-FT²
20.00 FT/HR

FLUJO DE VAPOR: 15574293.00 LB/HR
1077.73 LB/HR-FT²
3.97 FT/S

NUMEROS ADIMENSIONALES: ALFA 1.8205 TORRE .0529 ESPECIFICACION .1955

COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA: 07.93 LP/HR-FT³

NUMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA: .956

ALTURA DE LA UNIDAD DE TRANSFERENCIA: 12.26 FT

CAIDA DE PRESION: 39.37 CABEZAS DE VELOCIDAD

DIMENSIONES:

ALTURA DEL EMPAQUE: 11.7 FT DIAMETRO DE LA SECCION EMPACADA: 135.65 FT

ALTURA DEL TIRO: 362. FT

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

PRESION ATMOSFERICA 14.696 PSIA

TEMPERATURAS MEDIAS: BULBO HUMEDO 42.20 F

BULBO SECO 46.20 F

TIPO DE EMPAQUE 8

TEMPERATURA DEL AGUA: ENTRADA 85.60 F

SALIDA 72.40 F

RESULTADOS

CONDICIONES DEL AIRE

	A LA ENTRADA:	A LA SALIDA:	EN EL PUNTO B:
HUMEDAD RELATIVA (%)	71.73	NO CALCULADO	100.00
HUMEDAD (LB AGUA/LB A.S.)	.00471	NO CALCULADO	.02673
ENTALPIA (BTU/LB A.S.)	15.18	32.16	49.14
DENSIDAD (LB/FT ³)	.07854	.07419	.06984

RELACIONES LIQUIDO/VAPOR: MAXIMO 2.5726 NORMAL 1.2663

FLUJO DE LIQUIDO: 716000. LB/HR	FLUJO DE VAPOR: 5566293. LB/HR
1216.00 LB/HR-FT ²	968.66 LB/HR-FT ²
20.00 FT/HR	3.52 FT/S

NUMEROS ADIMENSIONALES: ALFA 2.1092 TORRE .0917 ESPECIFICACION .4043

COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA: 162.10 LB/HR-FT³

NUMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA: .877

ALTURA DE LA UNIDAD DE TRANSFERENCIA: 5.98 FT

CAIDA DE PRESION: 17.12 CAEZAS DE VELOCIDAD

DIMENSIONES:

ALTURA DE EMPAQUE: 5.2 FT

DIAMETRO DE LA SECCION EMPACADA: 85.54 FT

ALTURA DEL TIRO: 113. FT

0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30

RUNID: JAMWA4 ALCY: LB0671BL PROJECT: E
TIME: TOTAL: 00:01:07.629 CHSUPS: 023169877
CORE: 42 CPU: 00:00:10.303 I/O: 00:00:37.782
 CC/ER: 00:00:19.542 WAIT: 00:00:00.000
SUAS USED: \$ 3.33 SUAS RLMWAITING: \$ 0.00
IMAGES READ: 382 PAGES: 22
START: 09:08:12 NOV 09,1978 FIN: 09:36:11 NOV 09,1978

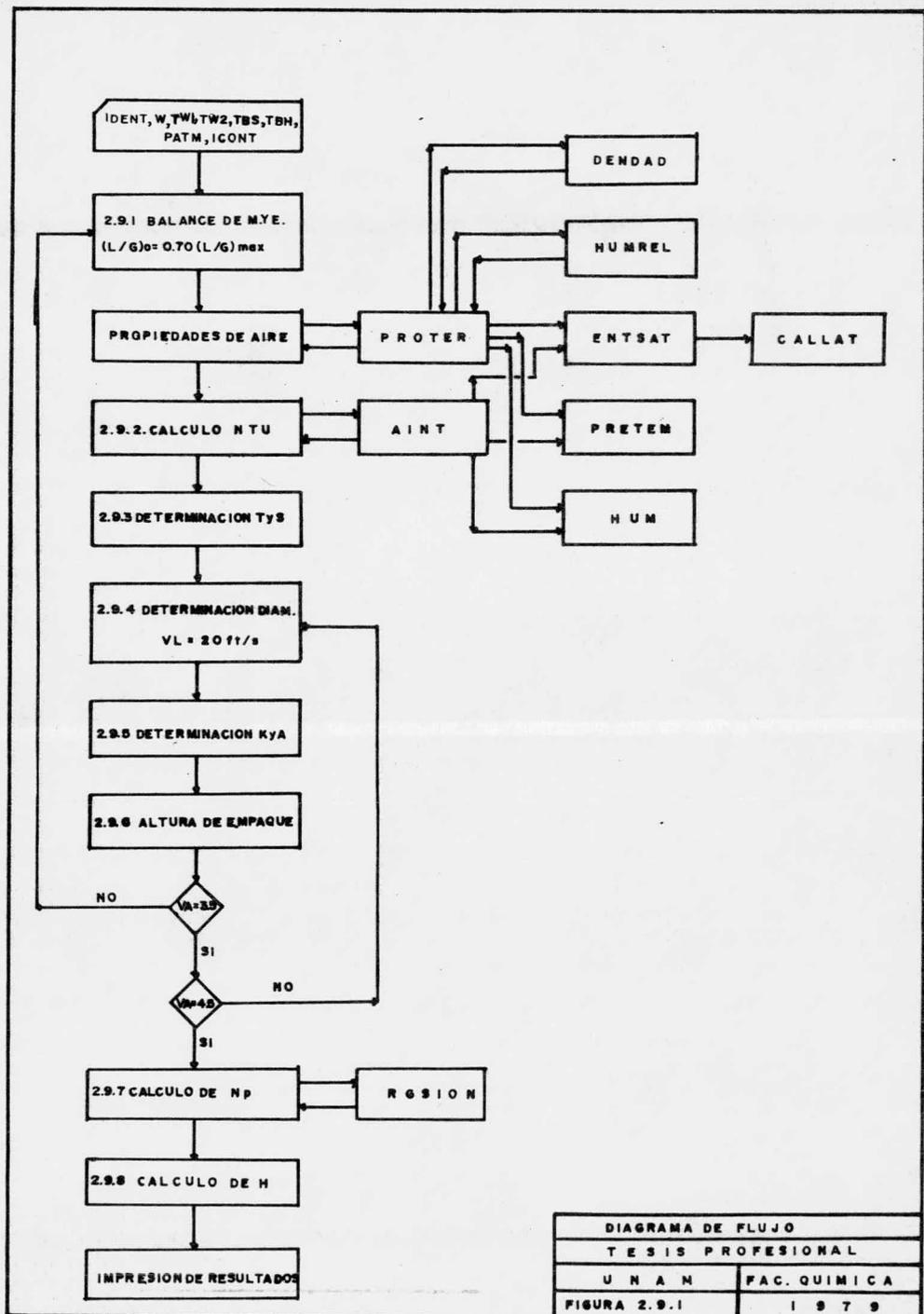


DIAGRAMA DE FLUJO	
TESIS PROFESIONAL	
U N A N	FAC. QUIMICA
FIGURA 2.9.1	1 9 7 9

3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

3.1 Resultados

Como se vió a lo largo de las secciones 2.8 y 2.9, - los resultados proporcionados por la lectura de gráficas o tablas, y los determinados numéricamente, son simila-- res, y las desviaciones entre unos y otros no exceden un límite razonable en ningún caso.

Para el ejemplo de la sección 2.8, se tomó uno de -- muestra de un artículo, y los resultados a los que se -- llegan son los siguientes:

Diámetro de la sección empacada:	140 ft
Altura del tiro:	373 ft
Altura del empaque:	25 ft

En el segundo ejemplo de la sección 2.9, los datos - se obtuvieron de una torre ya existente y en operación, cuyas características son las siguientes:

Localización:	Leicester, Inglaterra.
Presión atmosférica:	14.7 psia
Altura del tiro:	116 ft
Diámetro:	82 ft
Altura de empaque:	3.5 ft
Tipo de empaque:	tablones de 1 3/4 de espacia <u>a</u> miento.

Para el primer ejemplo, se puede observar que la altura del empaque calculada está por debajo de la altura real. Dado que no se reporta el tipo de empaque en la -- fuente, la razón de la diferencia posiblemente sea que -- entre el tipo seleccionado y el real existan diferencias tales que la caída de presión a través de los empaques -- sea similar en ambos casos, pese a la diferencia de altura, aunque el coeficiente de transferencia de masa sea -- distinto, y haga por ello necesario una altura real mayor.

En el segundo caso, el error nuevamente está presente en la altura del empaque. Se hizo la prueba con dos -- tipos de empaque de comportamiento y forma similar al -- real, que no concordó con ninguno de los seleccionados -- aquí, y no fue posible reproducir el dato de la altura de empaque. Si analizamos el hecho de que en el caso anterior la altura del empaque representa más del 6% de la -- altura del tiro, y en este segundo caso representa sólo el 4%, podemos decir que posiblemente la altura haya sido tomada con otra base para el último ejemplo, y por -- ello sea tan pequeña, y pudiera ser en realidad por lo -- menos el 5% de la altura total, como se reporta en otras fuentes como mínimo, con lo que el resultado del programa sería el más lógico.

3.2 Situación de las torres de enfriamiento de tiro natural en México.

Actualmente, se carece de información sobre las torres de enfriamiento de tiro natural en México, y al parecer, no existen en nuestro medio. Esta situación es debida a que es necesario que el flujo de agua de enfriamiento sea lo suficientemente grande como para hacerse competitiva frente a las torres de tiro inducido o forzado, ya que su principal atractivo es el ahorro de la energía destinada a los accionadores de los ventiladores y por ello necesita ser significativo este ahorro. Estos flujos son casi exclusivos de plantas de refinación de petróleo, plantas petroquímicas y de generación de energía, áreas explotadas por empresas estatales con ideas acerca de servicios auxiliares sumamente conservadoras y difíciles de cambiar, y este sentimiento aplica a las grandes empresas particulares que pudieran modificar su cuadro de servicios.

En cuanto a las plantas pequeñas, el ahorro que pudiera significar la eliminación de los accionadores no justifica el hecho de tener que importar tecnología para el diseño de estas torres, además del hecho de que existe un desconocimiento casi total de su funcionamiento y utilidad.

Quizá en un futuro no lejano la crisis de energéticos nos alcance en forma tal que sea indispensable tomar muy en cuenta la posibilidad de instalar torres de tiro natural en lugar de tiro inducido o forzado, y se tomará el ejemplo de otros países donde los energéticos son más escasos, pero por lo pronto existe una indiferencia mar-

cada hacia este tipo de torres que posiblemente permanezcan marginadas por algún tiempo, como hasta ahora han estado.

3.3 Conclusiones

Después de hacer el análisis de este trabajo, es posible enunciar las siguientes conclusiones:

1. Ofrece una serie de definiciones de términos y conceptos que representan una guía sencilla para el estudiante o profesional interesados en las operaciones aire-agua.
2. Presenta las ecuaciones básicas para la determinación de propiedades tanto físicas como termofísicas del sistema aire-agua en condiciones ambientales, con buena precisión.
3. Brinda un breve panorama sobre lo que representa la consideración de una torre de enfriamiento de tiro natural para una planta o complejo de refinación, químico, petroquímico o de generación de energía.
4. El manejo del modelo es muy sencillo y los resultados a los que llega son prácticamente directos, puesto que las restricciones de valores son lo suficientemente amplios como para que los valores caigan dentro de ellos sin iterar demasiado.
5. Los resultados obtenidos son buenos para un cálculo preliminar, donde aún es necesario afinar las dimensiones de acuerdo a otras consideraciones de tipo estructural.
6. En forma global, cumple con sus objetivos sin ser demasiado corto, y sin caer en excesos sin sentido.

BIBLIOGRAFIA

1. Badger W.L. Banchemo J.T. INTRODUCTION TO CHEMICAL ENGINEERING. Cap. 8 pp 379-399. McGraw-Hill/Kogakusha. Tokio.1955
2. Barlett D.A. Foster A.R. NATURAL DRAFT DRY COOLING TOWER -- PERFORMANCE WITH VARYING AMBIENT CONDITIONS APPLIED TO A DIRECT CYCLE HTGR. ASME Proceedings at the Winter Annual Meeting, Houston, Tx. pp 1-12. 1975
3. Butler P. DRY COOLING BY NATURAL DRAUGHT COULD SOLVE SOME COOLING WATER PROBLEMS.
4. Furzer I.A. NATURAL DRAFT COOLING TOWER. An Approximate Solution. Ind and Eng Chem. Process Design and Development. - V 7 No. 4 pp 555-560. 1968
5. Goldberg A.E. THE NUMERICAL INTEGRATION METHOD: A Survey of Applications in Reactor and Power Technology. Int Conf on - Str Mech in Reactor Tech. 3rd Trans. pp 1-12. London. 1975
6. Haggerty D. LeFebre M. THE GROWING ROLE OF NATURAL DRAFT -- COOLING TOWERS IN U.S. POWER PLANTS. Power Eng. pp 60-63. - 1976
7. Hougén O.A. Watson K.M. Ragatz R.A. PRINCIPIOS DE LOS PROCESOS QUIMICOS. Tomo I. pp 287-294. Ed Reverté S.A. México. - 1964
8. Lowe H.J. Christie D.G. HEAT TRANSFER AND PRESSURE DROP DATA ON COOLING TOWER PACKINGS, AND MODEL STUDIES OF THE RESISTANCE OF NATURAL DRAUGHT TOWERS TO AIRFLOW. Int Devel in Heat Transfer. Int Heat Transfer Conf, Colorado. Part V pp 933-950. 1961
9. McKelvey K.K. Brooke M. THE INDUSTRIAL COOLING TOWER. Elsevier Publishing Co. Cap 11 pp 263-266. Amsterdam. 1959

10. Perry R.H. Chilton C.H. CHEMICAL ENGINEER'S HANDBOOK. Cap
12 pp 12-2 a 12-6. 5a. Ed. McGraw-Hill/Kogakusha. Tokio.
1973
11. Peterman W.A. Frey G.R. Limbird A.G. INITIAL INVESTIGATION
OF THE EFFECTS OF HEAT AND MOISTURE DISSIPATION FROM A LARGE
NATURAL-DRAFT COOLING TOWERS. pp 420-425.
12. Reinschmidt K.F. Narayanan R. THE OPTIMUM SHAPE OF COOLING
TOWERS. Computers and Structures. V 5 pp 321-325. Pergamon
Press. 1975
13. Rish R.F. THE DESIGN OF A NATURAL DRAUGHT COOLING TOWER. -
Int Devel in Heat Transfer. Int Heat Transfer Conf, Coloraa
do. Part V pp 951-958. 1961
14. Wood B. Betts P. A CONTRIBUTION TO THE THEORY OF NATURAL -
DRAUGHT COOLING TOWERS. Int Devel in Heat Transfer. Int --
Heat Transfer Conf, Colorado. Part V pp 54-74. 1961

1979

ESTA TESIS SE IMPRIMIO EN:



MATRIZ: AV. CHAPULTEPEC N° 54 TELS. 16-81-21 Y 16-08-86
AV. JUAREZ 587 TEL. 14-63-67, CONDOMINIO: TEL. 12-76-64, PLAZA DEL SOL TEL 21-00-61
L. COTILLA 277 14-37-62, MINERVA: VALLARTA N° 2783 16-60-58, TOLSA 349, 26-06-62
PLAZA PATRIA LOCAL 9 ZONA J. TELEFONO 41-50-88, MULBAR CORONA 179 TEL. 13-61-99
CIRCUNVALACION PROVIDENCIA 1077 TELEFONO 41-52-48 GUADALAJARA, JALISCO, MEXICO