

DISEÑO Y EVALUACION DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO
ATMOSFERICA DE FORMA HELICOIDAL

DISEÑO Y EVALUACION DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO
ATMOSFERICA DE FORMA HELICOIDAL

ING. ALBERTO RUIZ GARCIA

Trabajo de Investigación de Grado para optar por el título de Ingeniero en Mecánica y Ciencias de la Ingeniería

Guatemala

1992

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades

DISEÑO Y EVALUACION DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO
ATMOSFERICA DE FORMA HELICOIDAL

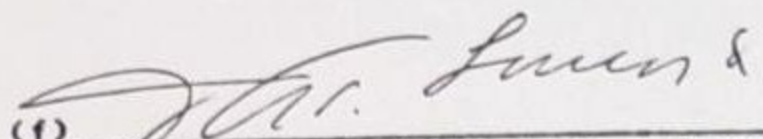
LUIS ALBERTO PAZ MASEK

Trabajo de Investigación presentado para optar al
grado académico de Licenciado en Ingeniería y
Ciencias de Alimentos

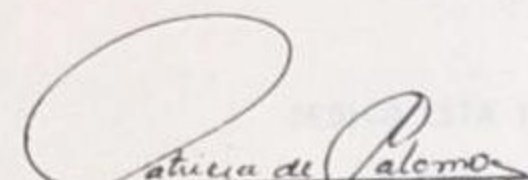
Guatemala


1992

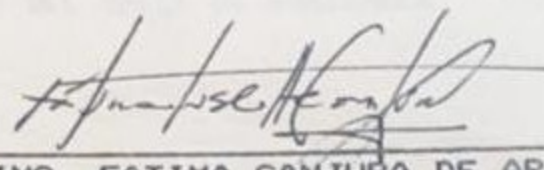
Vo.Bo. ASESOR DE TESIS

(f) 
ING. JOSE ALBERTO LUNA AZURDIA

Vo.Bo. TRIBUNAL EXAMINADOR

(f) 
LIC. PATRICIA PALOMO DE PALACIOS
DIRECTORA DEL DEPARTAMENTO DE
CIENCIAS DE ALIMENTOS Y NUTRICION

(f) 
ING. JOSE ALBERTO LUNA AZURDIA
ASESOR DE TESIS

(f) 
ING. FATIMA CANJURA DE ARCE

Fecha de aprobación: 16 de Octubre 1992

DEDICO ESTA TESIS

A DIOS Y A LA VIRGEN MARIA

A mis padres: Angel y Reneé

A la memoria de mi abuela Helena

A mis hermanos: Juan, Miguel y Karla

A mis amigos: Familia Molina Botrán, Familia Di Donato, Rubén, Erick y
Carlos Emilio.

A mis catedráticos en general

A mis compañeros de promoción

A LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

RECONOCIMIENTO

Agradezco a la empresa Olmeca, S.A. por haberme permitido realizar el presente trabajo de investigación en sus instalaciones.

De manera especial deseo reconocer la dirección y asesoría del Ingeniero Jose Alberto Luna Azurdia, así como la ayuda prestada por el señor Edgar Zúñiga; a quienes se debe en gran parte la culminación de esta tesis.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación consistió en diseñar y evaluar una torre de enfriamiento atmosférica de forma helicoidal, para luego comparar su capacidad de enfriamiento con una torre de enfriamiento atmosférica cuadrada de forma convencional.

Los resultados obtenidos muestran que la torre de enfriamiento de forma helicoidal tiene una capacidad de enfriamiento levemente mayor que la torre de enfriamiento atmosférica de forma cuadrada (1°C), y es debida principalmente a dos factores, como lo son la velocidad de choque del aire con el agua y la distribución más homogénea del agua en cada sección de empaque.

Es importante mencionar que la capacidad de enfriamiento de la torre de enfriamiento atmosférica de forma helicoidal, está relacionada con el ángulo de inclinación de cada sección de empaque, obteniéndose mejores resultados con aberturas de ángulo reducidas (en este caso 13.8 grados).

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	11
I. INTRODUCCION	1
II. ANTECEDENTES	3
A. Tipos de torres de enfriamiento	5
1. Torre de enfriamiento atmosférica	5
2. Torre de enfriamiento de tiro natural	6
3. Torre de enfriamiento de tiro forzado	6
4. Torre de enfriamiento de tiro inducido	6
B. Términos utilizados en el diseño de torres de enfriamiento	7
1. Temperatura de bulbo húmedo	7
2. Rango de enfriamiento	7
3. Approach (Aproximación)	7
4. Make-up (Relleno)	7
5. Purga o sangrado	8
6. Pérdidas por viento	8
7. Recirculación	8
C. Tratamiento de agua para torres de enfriamiento	8
1. Control de sólidos	9
2. Control de corrosión	9
3. Control microbiológico	9

	Página
III. JUSTIFICACION DEL PROYECTO	11
IV. OBJETIVOS	13
V. HIPOTESIS	14
VI. DESARROLLO DEL PROYECTO	15
A. Diseño de la torre atmosférica de forma cuadrada	15
B. Variación en ángulos de decks en torre de enfriamiento helicoidal	15
C. Ensamblaje de los decks para formar la torre y equipo	15
D. Forma de ejecución de corridas de las torres	16
1. Prueba con ángulos mínimo y máximo en las secciones de empaque de la torre helicoidal	16
2. Corridas en torre de 14 decks (helicoidal)	17
3. Comparación (Corrida en torre cuadrada)	18
VII. CALCULOS	19
METODO 1	
A. Cálculo de temperaturas de aproximación y rango	19
B. Asumir un número determinado de tablonos	19
C. Asumir valores de L/G	19
D. Intersección en gráfica E	19

	Página
E. Cálculo de entalpía en cualquier punto de la línea de operación	19
F. Altura de la torre	20
G. Cálculo de G_a máximo	20
H. Cálculo de L (Velocidad del agua)	20
I. Determinación del área de la torre	20
METODO 2	
A. Cálculo de factores de corrección	21
1. Factor de corrección de velocidad del viento	21
2. Factor de corrección de T_{wb}	21
3. Factor de corrección de altura	21
B. Determinación de concentración de agua con fórmula general	21
C. Cálculo del área de la torre	21
D. Determinación del área de contacto	22
VIII. DISEÑO DE TORRE CUADRADA	23
IX. MATERIALES	27
X. DISCUSIONES	29
XI. CONCLUSIONES	33
XII. RECOMENDACIONES	34

XIII. BIBLIOGRAFIA

35

APENDICES

36

Los procesos de enfriamiento de agua se encuentran en la naturaleza en algunos que haya desarrollado el hombre. Por ejemplo, el agua se enfría exponiendo su superficie al aire. Aunque en estos procesos son lentos, como el enfriamiento de agua en la superficie de un estanque, otros son comparativamente más rápidos como el rociado del agua hacia el aire. Debido a lo anterior es que todos estos procesos implican la exposición de la superficie del agua al aire con "diferentes grados". (1)

Dichos procesos de enfriamiento son utilizados en procesos industriales en donde se produce calor y la remoción del mismo es vital para la correcta operación del equipo. La remoción de calor en la industria sucede comúnmente en condensadores e intercambiadores de calor donde ocurre una transferencia de calor hacia el agua de refrigeración, incrementando su temperatura para luego ser recirculada a sistemas de enfriamiento, de los cuales resultan ser las TORRES DE ENFRIAMIENTO EVAPORATIVAS, las más eficientes en la remoción de dicho incremento de temperatura de el agua, con la cual puede volver a ser utilizada como refrigerante.

Entre las torres de enfriamiento evaporativas utilizadas en la industria tenemos las de tiro natural (hiperbólicas), las de tiro forzado, las de tiro inducido y las atmosféricas. En estas torres de enfriamiento se produce una transferencia de calor latente debido a la evaporación de una porción pequeña de agua.

Las torres de enfriamiento, aparte de proporcionar un descenso en la temperatura del agua de procesos industriales, viene a ser de fe-

I. INTRODUCCION

"Los procesos de enfriamiento de agua se encuentran entre los más antiguos que haya desarrollado el hombre. Por lo común, el agua se enfría exponiendo su superficie al aire. Algunos de estos procesos son lentos, como el enfriamiento de agua en la superficie de un estanque, otros son comparativamente más rápidos como el rociado del agua hacia el aire. Debido a lo anterior es que todos estos procesos implican la exposición de la superficie del agua al aire en diferentes grados". (9)

Dichos procesos de enfriamiento son utilizados en procesos industriales en donde se produce calor y la remoción del mismo es vital para la perfecta operación del equipo. La remoción de calor en un sistema dado ocurre comúnmente en condensadores e intercambiadores, en donde ocurre una transferencia de calor hacia el agua de refrigeración, incrementando su temperatura para luego ser recirculada a sistemas de enfriamiento, de los cuales resultan ser las TORRES DE ENFRIAMIENTO EVAPORATIVAS, las más eficientes en la remoción de dicho incremento de temperatura en el agua, con lo cual puede volver a ser utilizada como refrigerante.

Entre las torres de enfriamiento evaporativas utilizadas en la industria tenemos las de tiro natural (hiperbólicas), las de tiro forzado, las de tiro inducido y las atmosféricas. En estas torres de enfriamiento se produce una transferencia de calor latente debido a la evaporación de una porción pequeña de agua.

Las torres de enfriamiento, aparte de proporcionar un descenso en la temperatura del agua de procesos industriales, viene a ser de in-

terés económico en la industria, ya que sin sistemas de recirculación, el agua se pierde en los drenajes, lo que representa un gasto monetario; a la vez que vienen a constituir un interés nacional, ya que sin sistemas de recirculación se está perdiendo un recurso natural, del cual en estos tiempos se tiene gran demanda.

Este proyecto pretende desarrollar, experimentalmente, el diseño de una torre de enfriamiento atmosférica de forma helicoidal de 1 metro de ancho, para luego comparar su capacidad de enfriamiento con una torre cuadrada de forma convencional con la misma área de contacto.

La importancia del proyecto es que puede ser utilizado por plantas industriales que necesiten de una torre de enfriamiento de dimensiones pequeñas con un diseño diferente, y a la vez venga a tener un costo relativamente bajo. Se menciona también que se estará probando una forma diferente de empaque, la que hará que la torre de enfriamiento tenga una estructura original y se realice una innovación en lo que se refiere a las formas cuadradas y rectangulares que suelen tener dichas torres atmosféricas de enfriamiento. (Ver gráfica A)

También podrá ser utilizada la información del presente trabajo para consulta de algunos tópicos generales de diseño de torres de enfriamiento.

II. ANTECEDENTES

Al considerar una gota de agua en una torre de enfriamiento, tenemos que en su superficie total existe una capa delgada de aire que la atraviesa, ocurriendo entonces una transferencia de masa y calor, siendo por el mecanismo de evaporación en donde se logra remover la mayoría de calor de la gota de agua, debido a la cual las torres funcionan bajo un proceso de enfriamiento evaporativo. (9)

"La evaporación que ocurre cuando el agua y el aire se encuentran en contacto es causada por la diferencia de presiones entre el vapor de agua en la superficie de la gota de agua y el aire. La presión de vapor es función de la temperatura del agua y el grado de saturación del aire". (12)

"La eliminación teórica de calor posible por libre de aire circulado en una torre de enfriamiento depende del contenido de humedad del aire. La relación de temperaturas de bulbo húmedo y temperatura ambiental es un indicador del contenido de humedad del aire. Por lo tanto, desde un punto de vista ideal, la temperatura de bulbo húmedo es la temperatura teórica más baja a la que se puede enfriar el agua. Prácticamente, la temperatura del agua se acerca, pero no llega a ser equivalente a la de bulbo húmedo del aire en una torre de enfriamiento, debiéndose a que es imposible establecer un contacto de toda el agua con el aire fresco conforme ésta desciende por la superficie mojada de llenado hasta el estanque. La magnitud del acercamiento a la temperatura de bulbo húmedo depende del diseño de la torre. Entre otros factores importantes están el tiempo de contacto entre el agua y el aire, la cantidad de superficie de llenado y la separación del agua en gotitas. En la práctica, las torres de enfriamiento rara vez se diseñan para acercamientos menores de 5°F". (9)

"La teoría del proceso de transferencia de calor de una torre de enfriamiento que ha merecido una aceptación más generalizada es la que desarrolló Merkel, y su análisis se basa en la diferencia de entalpía como fuerza impulsora. La ecuación de Merkel se expresa en forma integrada de la siguiente manera:

$$\frac{KaV}{L} = \int_{T_2}^{T_1} \frac{dT}{h' - h}$$

ecuación A

donde;

- K = coef. de transferencia de masa (lb agua/(hr)(pie)²)
- a = área de contacto de volumen de torre (p²/p³) p₃ = p₂e
- V = volumen de enfriamiento activo de área plana (pie³/pie²)
- L = velocidad del agua (lb/(h)(pie²))
- h' = entalpía del aire saturado a la temperatura del agua $\frac{BTU}{lb}$
- h = entalpía de la corriente de aire (BTU/lb)
- T₁ y T₂ = temperaturas del agua en la entrada y salida (° F)

El lado derecho de la ecuación se expresa por completo en términos de las propiedades del aire y el agua y es independiente de las dimensiones de la torre".(9)

"La gráfica B nos muestra las relaciones del agua y el aire y el potencial impulsor que existe en una torre de enfriamiento. La comprensión de dicho diagrama constituye una base importante para entender el proceso de la torre de enfriamiento". (9)

"La línea de operación del agua está representada por la línea AB y se especifica por medio de las temperaturas del agua de la torre en la entrada y la salida. La línea de operación del aire principia en C, verticalmente por debajo de B, y en un punto que tiene una entalpía correspondiente a la del bulbo húmedo del aire de entrada. La línea BC representa la fuerza impulsora inicial (h' - h). Para enfriar el agua 1 grado fahrenheit, la entalpía por libra de aire aumenta 1 BTU multiplicada por la razón de libras de agua por libra de aire. La razón líquido/gas (L/G) es la pendiente de la línea de operación. El aire que sale de la torre se representa por medio del punto D y la gama de enfriamiento es la longitud proyectada de la línea CD sobre la escala de temperatura. La diferencia útil de temperaturas en la torre de enfriamiento se ilustra en el diagrama como la diferencia entre la temperatura del agua fría que sale de la torre y la de bulbo húmedo".(9)

"Las coordenadas se refieren directamente a la temperatura y la entalpía de cualquier punto en la línea de operación de agua; pero, en la línea de operación de aire, la referencia se hace tan sólo a la entalpía de un punto. La temperatura de bulbo húmedo correspondiente a cualquier punto de CD se encuentra proyectando dicho punto en sentido horizontal a la curva de saturación y luego en sentido vertical a la coorde-

nada de temperaturas. La integral de la ecuación A se representa por medio del área ABCD del diagrama, y dicho valor se conoce como la característica de la torre, que varía con la razón L/G'' . (9)

La entalpía de la línea de operación en una torre de enfriamiento viene entonces a ser dada por la siguiente ecuación:

$$H_1 = H_2 + (L/G) (T_1 - T_2) \quad \text{ecuación B}$$

La cantidad de aire que circula por la torre de enfriamiento es un factor importante en la cantidad de evaporación que se produce en la misma. (1)

Las torres de enfriamiento tienen la ventaja de que sus costos de operación e instalación compensan los costos de agua que se desperdician por carecer de equipos de recirculación. (10)

A. Tipos de torres de enfriamiento

Los cuatro tipos de torres de enfriamiento utilizados comúnmente en la industria son los siguientes:

1. Torre de enfriamiento atmosférica. Este tipo de torre funciona solamente con el tiro del aire ambiental que fluye a través de ella. Usualmente se utilizan en zonas abiertas para recibir la mayor cantidad de aire que venga de cualquier dirección. Estas torres de enfriamiento funcionan en flujo cruzado de aire ambiental con el agua que cae a través de la torre. Su rango de operación se encuentra usualmente arriba de los 4°F sobre la temperatura de bulbo húmedo del aire. No requiere ventiladores para forzar el aire a través de la misma, pero consume energía por la bomba que impulsa el agua a la parte superior de la torre. (13)

Las torres de enfriamiento atmosféricas pueden utilizarse ampliamente en la ciudad de Guatemala, debido a la velocidad predominante del viento, la cual es mayor de 4.83 Kms por hora.

2. Torre de enfriamiento de tiro natural. El funcionamiento de esta torre de enfriamiento depende de la humedad relativa del aire ambiental, por lo que en un día húmedo su efectividad disminuye respecto de días secos. Estas torres de enfriamiento son relativamente altas y requieren energía para bombear el agua a un punto de la torre que usualmente es inferior al de la torre atmosférica. No tiene costos por ventiladores. (5)

3. Torre de enfriamiento de tiro forzado. Este tipo de torre de enfriamiento utiliza ventiladores para forzar el aire a través del empaque de la misma. Debido a la baja velocidad del aire que sale de la torre, hay una tendencia en la cual el aire caliente recircula y reduce la efectividad de funcionamiento de la torre. El tamaño de esta torre de enfriamiento es considerablemente menor que el de las torres atmosféricas y de tiro natural, debido a que hay una mayor circulación de aire. (13)

4. Torre de enfriamiento de tiro inducido. Esta torre de enfriamiento utiliza ventiladores en su parte superior para impulsar el aire de la base a su parte más alta. En este tipo de torre de enfriamiento se descarga el aire verticalmente a la atmósfera, lo que reduce la posibilidad de que retorne a la torre como en las de tiro forzado. (7)

Usualmente son empleadas donde el rendimiento térmico es independiente de la velocidad del viento. Su requerimiento de espacio es reducido y es disponible en cualquier tamaño. (2)

Las torres de enfriamiento que utilizan ventiladores tienen la desventaja de que en lugares contaminados con brumas, basura, etc., sus costos de operación y mantenimiento son más elevados que en las torres de enfriamiento atmosféricas. (2)

B. Términos utilizados en el diseño de torres de enfriamiento

1. Temperatura de bulbo húmedo. Es la temperatura teórica a la cual se puede enfriar el agua de una torre de enfriamiento. Esta temperatura nunca puede ser alcanzada, pero si se le puede aproximar. El parámetro debe ser bien conocido y evaluado a la hora de diseñar una torre de enfriamiento, ya que de ésta depende cuánto se enfrie el agua que entra a la torre de enfriamiento. (13)

2. Rango de enfriamiento. Es la diferencia de temperatura entre el agua caliente que entra a la torre y el agua fría que sale de la misma. Este refleja los requerimientos de agua que se va a enfriar. (7)

3. Approach (Aproximación). Es la diferencia de temperatura entre el agua fría que sale de la torre de enfriamiento y la temperatura de bulbo húmedo del aire ambiental. Usualmente un approach de 5°F es considerado como mínimo. (13)

4. Make-up (relleno). Es el agua requerida para reemplazar el agua

circulante que es perdida por evaporación, arrastre, purgas y fugas. Este es expresado en porcentaje de agua circulante. (7)

5. Purga o sangrado. Es el derrame continuo e intermitente de una pequeña cantidad del agua circulante de la torre de enfriamiento. Tiene por objetivo prevenir el incremento en la concentración de sólidos en el agua debido a pérdidas por evaporación y arrastre; siendo expresado en porcentaje de agua circulante. (13)

6. Pérdidas por viento. Es la pérdida de agua en la torre de enfriamiento, en forma de pequeñas gotas, en el aire que circula por la misma. (13)

7. Recirculación. Es el fenómeno en el cual parte de los vapores de descarga de la torre de enfriamiento, vuelven a entrar a la misma con el aire de admisión. (7)

En torres de enfriamiento atmosféricas y de tiro natural es importante el cálculo de unidades de bombeo efectivo para que de esta forma se pueda economizar energía en el proceso de enfriamiento. (10)

Pritchard sugiere que para efectos económicos de diseño de torres de enfriamiento se tome una velocidad de aire entre 2000 y 1400 lbs/hr, para una altura efectiva de 12 - 40 pies. (13)

X C. Tratamiento de agua para torres de enfriamiento.

En cualquier sistema de enfriamiento hay varios controles que suelen utilizarse para garantizar el funcionamiento normal del equipo, entre los cuales tenemos:

1. Control de sólidos. La finalidad de este control es evitar incrustaciones en el equipo, que son causadas principalmente por precipitación de sales de sílica, magnesio y calcio. Entre los métodos que tenemos para la prevención de incrustaciones están la desmineralización del agua y el tratamiento de agua con fosfato trisódico o álcali para mantener los sólidos en suspensión. La cantidad de sólidos en suspensión en una torre de enfriamiento se puede regular realizando purgas periódicas, tomando en cuenta a la vez la cantidad de agua que se evapora en la misma. La adherencia de sales no se produce únicamente en las paredes de la tubería y equipo de bombeo, sino también en la torre de enfriamiento, lo que produce colapsos en el empaque y reduce su capacidad de enfriamiento. (12)

2. Control de corrosión. Básicamente la corrosión es debida a variaciones bruscas en el pH del agua, el cual preferiblemente debe ser levemente alcalino. Cuando en una torre de enfriamiento se confirman condiciones corrosivas, se sugiere un tratamiento correctivo utilizando químicos para regular el pH del agua. (12)

3. Control microbiológico. Debido a las impurezas orgánicas en el agua de las torres de enfriamiento, el crecimiento de microorganismos (como bacterias y algas) es frecuente y debido a su crecimiento relativamente rápido (especialmente en los meses de verano), presentan dificultades considerables en la operación de la torre. El método común para controlar este problema es tratar el agua con amonio cuaternario o carbamatos. También se recomienda el uso de cromato de

cobre para control de hongos, ya que éstos utilizan la celulosa de la madera de la cual están construidas las torres para su reproducción, lo que causa colapsos en los empaques y estructuras de las mismas. Es recomendable hacer una rotación quincenal de cada producto mencionado anteriormente para evitar resistencia de los microorganismos hacia los mismos.

Es importante mantener el agua de circulación en un lugar con poca exposición al sol, ya que de éste las algas obtienen energía para su crecimiento. (12)

III. JUSTIFICACION DEL PROYECTO

Actualmente, en Guatemala, algunas empresas se encuentran con el problema de que las torres de enfriamiento que se venden comercialmente tienen una capacidad de enfriamiento mucho mayor de la que ellos necesitan, por lo que prefieren tirar a los drenajes el agua de enfriamiento proveniente de sus equipos de procesamiento, que realizar una inversión monetaria en la adquisición de la torre. Desde el punto de vista económico, si se recibe agua municipal hay que pagar la tarifa por el agua desperdiciada y si el agua es extraída de un pozo, el costo de ésta tiende a ser más elevado por la energía gastada en la operación de bombeo. Adicionalmente, se está desperdiciando un recurso natural del que se tiene gran demanda.

Debido a lo anterior, una empresa guatemalteca (Olmeca S.A.) tiene interés en que se realice el estudio de diseño y evaluación de una torre de enfriamiento atmosférica de dimensiones pequeñas, ya que puede ser tomado como referencia por empresas que necesitan de la torre, a la vez que utilizarán la teoría y los resultados del estudio para construir una torre de enfriamiento y sustituir a otra que se encuentra en malas condiciones.

Este proyecto tiene la ventaja de que la torre es de tipo atmosférico, con lo cual se estarán utilizando las excelentes condiciones del aire ambiental que hay en el país. Un aspecto interesante

a la vez, es que la torre tendrá forma helicoidal, lo que aportará una nueva estructura de torre a la mayoría que actualmente existen que son de tipo cuadrado o rectangular. También se estará probando una forma diferente de empaque y comparándolo con un empaque utilizado comercialmente.

Ejemplificando el problema de gasto de agua en la Universidad Del Valle de Guatemala, nos encontramos que en varios laboratorios se utilizan equipos con condensadores, y el agua utilizada para enfriamiento en los mismos es desechada a los drenajes.

Así en el laboratorio de control de calidad de la carrera de Ingeniería en Ciencias de Alimentos hay dos unidades (una de grasa y otra de fibra) que están provistas de condensadores que utilizan agua como refrigerante y ésta es desechada a los drenajes, siendo las pérdidas las que se muestran en los cuadros 13 y 14. El mismo caso ocurre en una unidad de destilación del laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad.

Con una torre de enfriamiento para estos equipos se evitará dicho desperdicio, a la vez que al agua en el estanque de la torre se le puede proporcionar un tratamiento de ablandamiento, con lo cual se evita a mediano y largo plazo la formación de costras en la superficie del equipo por donde pasa el agua.

IV. OBJETIVOS

- A. Diseñar y evaluar una torre de enfriamiento atmosférica de forma helicoidal con un ancho de 1 metro.
- B. Comparar la capacidad de enfriamiento de la torre atmosférica de forma helicoidal con una torre de enfriamiento cuadrada convencional con la misma área de contacto.

V. HIPOTESIS

La torre de enfriamiento atmosférica de forma helicoidal tiene una capacidad de enfriamiento igual o mayor que una torre de enfriamiento atmosférica convencional de forma cuadrada con la misma área de contacto.

VI. DESARROLLO DEL PROYECTO

A. Diseño de la torre atmosférica de forma cuadrada

Se diseñará la torre de enfriamiento cuadrada según fórmulas de diseño y gráficas adjuntas. Luego, con el área de contacto obtenida para cada deck de la torre cuadrada, se diseñará un deck para la torre de enfriamiento atmosférica de forma helicoidal (se utilizará un área equivalente), con la especificación de que el deck tenga un metro de ancho.

B. Variación en ángulos de decks de torre de enfriamiento helicoidal

Según la gráfica A, cada deck tiene una pendiente de caída de agua, por lo que se utilizarán dos ángulos de inclinación (uno de 13.8 y el otro de 27.6 grados), que son los límites inferior y superior en el ángulo de la pendiente del deck. De esta forma se podrá determinar cuál es el más conveniente para su utilización en la torre helicoidal.

C. Ensamblaje de los decks para formar la torre y equipo

Los diferentes decks de la torre helicoidal irán unidos en la parte central con un alambre de hierro de 1.5 cms. de grueso.

Una vez ensamblada se colocará en una pila de metal provista de una bomba de 1 Hp que impulsará el agua a la torre. A la pila se le hará una añadidura para colocar la torre cuadrada para que de esta forma puedan realizarse las corridas en las mismas condiciones.

A la pila llegará una manguera que transportará el vapor, para que de esta forma aumente la temperatura del agua que se lanzará a la torre de enfriamiento. Se tomará como estándar de temperatura de entrada a la torre 31.5°C .

La tubería que llevará el agua a la torre helicoidal terminará paralela a la misma y se le harán agujeros para la salida de agua. Se hará un pequeño punto de soldadura para fijarla al eje central de la torre (ver figura A).

El rotámetro estará colocado en una posición intermedia entre la bomba y una llave de paso que dirigirá el flujo de agua hacia cualquiera de las dos torres.

D. Forma de ejecución de las corridas de las torres

Por la capacidad de la bomba, se fijaron tres flujos para realizar las corridas, estos eran de 9, 14 y 18 litros/min.

La temperatura del agua de entrada a la torre fue de 31.5°C (referencia).

La temperatura de bulbo húmedo se midió, con un termómetro normal, con un algodón mojado en el bulbo de mercurio.

Las variaciones de temperatura en las diferentes áreas de la torre se harán con un termómetro de laboratorio $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

La velocidad del viento se midió con un anemómetro y debido a información del cuadro No. 11, se tomaron como velocidades de referencia 300, 500 y 700 pies/min.

1. Prueba con ángulos mínimo y máximo en las secciones de empaque de la torre helicoidal. En esta fase del experimento no se

utilizó la torre de enfriamiento cuadrada, ya que sólo se pretendía saber qué ángulo era el más indicado para logra un mayor descenso de la temperatura del agua que circulaba por la torre.

Se ensamblaron 6 decks de cada ángulo en varillas de hierro (eje central) y luego se colocaron sobre la pileta de pruebas. Bajo las mismas condiciones ambientales y de velocidad de viento, se bombeó agua caliente a 31.5°C (t. de entrada) y se midió la temperatura de salida del agua. Como no se quería comparación de flujos, se utilizó el flujo mínimo de 9 lts/min.

2. Corridas en torre de 14 decks (helicoidal). Las pruebas se realizaron en tres humedades diferentes, mostrándose en la sección de corridas en los cuadros 2, 3 y 4. Las humedades trabajadas fueron de 65%, 52% y 41%.

Las corridas se efectuaron de la siguiente manera:

- Se introdujo cierta cantidad de vapor al agua de la pileta.
 - Al llegar a 31.5°C se bombeó a la torre de enfriamiento por medio de una bomba tipo Allen.
 - Se tomó la temperatura de entrada del agua a la torre helicoidal (cerciorándose de que estuviera a la temperatura requerida).
 - Se tomó la temperatura en la parte central de la torre.
 - Se tomó la temperatura del agua 3 decks antes de llegar al final de la torre de enfriamiento helicoidal, y se tomó la temperatura del agua en el último deck.
 - Se realizó 3 veces el procedimiento para asegurar resultados.
- * En la ejecución de los pasos anteriores se midió la velocidad del

viento en las cercanías a la torre y en las parte aledañas a la misma.

3. Comparación (Corrida en torre cuadrada). Antes de realizar la corrida en la torre cuadrada se tomó la velocidad del viento en la parte interior y exterior a la misma (hasta que alcanzó la velocidad del viento con la que se trabajó en la torre helicoidal). Se midió la temperatura de bulbo húmedo y bulbo seco del ambiente, y con estos parámetros se determinó la humedad a la cual se habían hecho las corridas, tanto para la torre helicoidal como para la cuadrada.

Luego se siguieron los pasos que se mencionaron con anterioridad en el inciso D.2, realizando las mediciones de temperatura a una velocidad de viento igual que con las realizadas en las corridas de la torre helicoidal.

VII. CALCULOS

Se utilizaron dos métodos para el diseño de las torres de enfriamiento, siendo éstos:

METODO 1:

A. Cálculo de temperaturas de aproximación y rango

$$T_{\text{aprox.}} = \text{Temp. sal. agua} - \text{Temp. bulbo húmedo}$$

$$T_{\text{rango}} = \text{Temp. agua ent.} - \text{Temp. agua salida}$$

B. Asumir un número determinado de tablonés

En nuestro caso se utilizaron 14 tablonés, debido a la altura que tendrán los soportes de los tablonés de la torre helicoidal.

C. Asumir valores de L/G para encontrar KaV/L, con la siguiente ecuación

$$KaV/L = 0.07 + A'N' (L/G)^{-n}$$

N' es el número de tablonés de la torre, y A' y n son valores teóricos para el deck tipo F que se utilizará (ver referencia 13).

D. Con los puntos obtenidos se hace una recta en la gráfica E, e intersectando con la curva del valor de la temperatura de aproximación se encuentran los valores de L/G y KaV/L respectivos.

E. Cálculo de entalpía en cualquier punto de la línea de operación

$$h = H + (L/G) (T_2 - T_1)$$

$$\text{donde } T_2 - T_1 = \text{rango}$$

H se calculará con la siguiente fórmula:

$$H = (0.29 + 0.45 Y') (T_{\text{seco}} - 32) + 1075.8 Y' \quad (\text{ref. 14})$$

El valor de Y' se obtendrá en tabla de la referencia 14.

F. Altura de la torre

Se utilizó la siguiente regla gruesa para torres de enfriamiento:

$$\text{Altura} = (N - 1) (V/12)$$

donde;

N = número de tablonos

V = valor para deck F (ver ref. 13)

G. Cálculo de G_a máximo (vel.viento por unidad de área)

$$G_a \text{ max} = G_{\text{amin}} + X$$

Donde X se obtiene de la relación de área base vrs altura

$$\frac{40' - 12'}{40' - 3'} = \frac{2000 - 1400}{x}$$

H. El valor de L (velocidad del agua) se obtendrá de la relación

$$L'/G_a = \text{valor obtenido en inciso D}$$

I. El área de la torre se determinó con la siguiente fórmula

$$\text{Area} = \text{flujo agua}/L$$

Con el área obtenida se trazará un esquema de la forma de cada nivel de la torre y con base en esto se determinará el área equivalente del nivel de la torre de enfriamiento atmosférica de forma helicoidal (área de contacto), teniendo presente que la torre tendrá un ancho de 1 metro. (ver figura C)

METODO 2

La fórmula general a utilizar será la siguiente:

$$C = \frac{G_t * C_w}{L * a_n * C_v * C_h}$$

donde;

C_w = factor corrección velocidad del viento

C_v = factor corrección T_{wb}

C_h = factor de corrección de altura de la torre

L = largo de la torre (pies)

a_n = ancho de la torre (pies)

G_t = cantidad de agua (gal/min)

C = concentración de agua (gal/pie²)

A. Cálculo de factores de corrección

1. Factor de corrección de velocidad del viento

$$C_w = 1.118 - 0.056 (\text{Vel. viento en mph})$$

2. Factor de corrección de T_{wb} (Bulbo húmedo)

$$C_v = 0.0295 (T_{wb}) - 1.0594$$

3. Factor de corrección de altura

$$C_h = 0.30 * (\text{Altura de la torre}) - 0.5$$

B. Utilizando la fórmula general se determinará la concentración de agua

C. El área de la torre de enfriamiento se calculará con la siguiente fórmula

$$\text{Area} = \frac{G_t * C_w}{C * C_v * C_h}$$

D. Con el área total se determinará el área de contacto para un deck tipo F.

VIII. DISEÑO DE TORRE CUADRADA

METODO 1

$$T_{\text{aprox}} = T_{\text{sal.}} - T_{\text{wb}}$$

$$T_{\text{aprox}} = 74.3 - 62.6 = 11.7^{\circ}\text{F}$$

$$T_{\text{rango}} = T_2 - T_1 = 15.3^{\circ}\text{F}$$

Se asumen 14 niveles o tablonas

Se asumen dos valores de L'/Ga

$$\text{Valor 1} = 0.3$$

$$\text{Valor 2} = 1.0$$

Sustituyendo en fórmula:

$$KaV/L = 0.07 + A N (L/Ga)^{-n}$$

$$\text{Para deck F } A = 0.1 \quad n = 0.51$$

$$KaV/L = 2.65$$

$$KaV/L = 1.47$$

Trazando una recta en gráfica E con los valores obtenidos e intersectando con la T de aproximación

$$\text{Valor de } L/Ga = 0.45$$

Calculando el valor de la entalpía en cualquier punto de la línea de operación

$$H = (0.24 + 0.45Y') (T_{\text{seco}} - 32) + 1075.84 Y'$$

$$\text{con } Y' = 0.015$$

$$H = 26.3454 \text{ BTU/lb aire}$$

la entalpía en la línea de operación será entonces:

$$h = H + (L/Ga) (T_2 - T_1)$$

de donde;

$$h = 34.75 \text{ BTU/lb aire}$$

Calculando la altura de la torre

$$(N-1) * (V/12) = \text{ALTURA}$$

$$(N-1) = 13$$

$$(V/12) = 0.35 \text{ pies}$$

$$\text{Altura de torre} = 4.55 \text{ pies}$$

Calculando el área de la torre de enfriamiento

$$(40 - 12)/(40 - 4.55) = (2000 - 1400)/x$$

$$\text{donde } x = 759.64 \text{ lb/ft}^2\text{hr}$$

$$Ga_{\text{max}} = G_{\text{min}} + x$$

$$Ga_{\text{max}} = 2159.64 \text{ lb/ft}^2\text{hr}$$

$$L/Ga = 0.45$$

$$\text{donde } L = 971.83 \text{ lb/ft}^2\text{hr}$$

$$\text{Area} = \text{flujo de agua}/L$$

$$\text{Area} = 0.1137 \text{ m}^2$$

$$\text{Area} = 34 \times 34 \text{ cms.}$$

De esta área total se saca el área de contacto efectiva que se muestra en la gráfica C (para un deck tipo F)

$$\text{Area de contacto efectiva} = 734.4 \text{ cm}^2 \text{ (por nivel)}$$

METODO 2

Calculando factores de corrección de bulbo húmedo, viento y altura.

FACTOR DE CORRECCION DE BULBO HUMEDO

$$C_v = 0.0295(64.4 F) - 1.0594$$

$$C_v = 0.8404$$

FACTOR DE CORRECCION DEL VIENTO

$$C_w = 1.118 - 0.056 (7)$$

$$C_w = 0.726$$

FACTOR DE CORRECCION DE ALTURA

$$C_h = 0.3*(4.55) - 0.5$$

$$C_h = 0.865$$

CALCULO DEL AREA DE LA TORRE

Sustituyendo los factores de corrección, una concentración de agua de 2.8 gal/pie² (referencia 9) y un flujo de agua de 3.4 gal/min, en la fórmula:

$$\text{Area} = \frac{G_t * C_w}{C_v * C_h}$$

$$C_v * C_h$$

$$\text{Area} = 1.2197 \text{ pies}^2 (1133 \text{ cm}^2)$$

Con esta área tenemos un área efectiva de contacto similar a la del método número 1.

Con el área de contacto encontrada, se saca el área equivalente de contacto en la torre atmosférica de forma helicoidal.

Tenemos un ancho de 1 metro del cual descontamos 2 cm de los topes en las orillas del empaque y 4 cm en el centro para apoyo. (ver gráfica C). De lo anterior nos queda un largo de 47 cm por caída con lo cual tenemos que dar un ancho de 8.5 cms. al empaque (ver gráfica C).

IX. MATERIALES

- MADERA

Para torre helicoidal 0.65 mts²

Para torre cuadrada 0.68 mts²

La madera utilizada para construir las torres fue de desperdicio (partes sin uso).

- HIERRO

Este se utilizó como eje central de la torre helicoidal. Sus medidas son de 1.45 mts. de alto y 15. cms. de diámetro.

- BOMBA TIPO ALLEN DE 1/2 HP

- PILETA DE METAL (ya construida)

Esta pileta tuvo la función de estanque, y en la misma estaban colocadas ambas torres de enfriamiento.

- TUBERIA DE HIERRO DE 1 PULGADA DE ANCHO (3 metros)

Sirvió para transportar el agua de la bomba a ambas torres de enfriamiento.

- CODOS DE HIERRO (5 unidades)

- MANGUERA DE HULE

Esta sirvió para transportar el vapor de una unidad de procesamiento a la pileta de pruebas.

- ANEMOMETRO Marca Kurz, Modelo 440

- ROTAMETRO

- TERMOMETRO (± 0.5 °C)

- BEAKERS DE 100 ml.

En el cuadro 1 se observa que a mayor abertura del ángulo de inclinación de cada deck (tablón) de la torre de enfriamiento atmosférica de forma helicoidal, ocurre un menor descenso en la temperatura del agua que entra a la misma. Esto, básicamente, lo podemos atribuir a que el tiempo de residencia del agua en cada tablón es menor, lo que a la misma tasa una mayor velocidad de caída en su recorrido por la torre. La inclinación de 13,6 grados era la menor que se podía utilizar para lograr una buena caída de agua y evitar estancamientos. Se tomó el doble de la misma para apreciar si había una diferencia significativa en el descenso de temperatura, lo cual quedó comprobado.

En los cuadros 2, 3 y 4 se observan los resultados obtenidos en las diferentes corridas realizadas en el experimento, en las cuales hay tendencias bastante definidas en lo que se refiere a descensos de temperatura en ambas torres. Notamos que ocurre un descenso ligeramente mayor en la torre de enfriamiento helicoidal (1°C), siendo éste atribuido a los siguientes factores:

A. Velocidad promedio de choque de viento con el agua en la torre

En el cuadro 5 se compara la velocidad de choque del aire con el agua que baja por la torre, siendo mayor en la torre de enfriamiento de forma helicoidal debido a que la caída de agua está expuesta totalmente al viento, en así en la torre de forma cuadrada en

X. DISCUSIONES

En el cuadro 1 se observa que a mayor abertura del ángulo de inclinación de cada deck (tablón) de la torre de enfriamiento atmosférica de forma helicoidal, ocurre un menor descenso en la temperatura del agua que entra a la misma. Esto, básicamente, lo podemos atribuir a que el tiempo de residencia del agua en cada tablón es menor, ya que la misma toma una mayor velocidad de caída en su recorrido por la torre. La inclinación de 13.8 grados era la menor que se podía utilizar para lograr una buena caída de agua y evitar estancamientos. Se tomó el doble de la misma para apreciar si había una diferencia significativa en el descenso de temperatura, lo cual quedó comprobado.

En los cuadros 2, 3 y 4 se observan los resultados obtenidos en las diferentes corridas realizadas en el experimento, en las cuales hay tendencias bastante definidas en lo que se refiere a descensos de temperatura en ambas torres. Notamos que ocurre un descenso levemente mayor en la torre de enfriamiento helicoidal (1°C), siendo éste atribuido a los siguientes factores:

A. Velocidad promedio de choque de viento con el agua en la torre

En el cuadro 5 se compara la velocidad de choque del aire con el agua que baja por la torre, siendo mayor en la torre de enfriamiento de forma helicoidal debido a que la caída de agua está expuesta totalmente al tiro del viento, no así en la torre de forma cuadrada en

donde las aletas direccionales de viento disminuyen la velocidad del mismo en su encuentro con el agua que recorre la torre.

B. Distribución homogénea del agua en cada sección de empaque (tablón)

Este es un factor importante ya que se observó una mejor distribución del agua en las secciones de empaque de la torre helicoidal que en la torre cuadrada, a la vez que el agua entra en contacto con la mayor parte de la sección de empaque en cada nivel.

En los cuadros 6 y 7 se presentan los resultados obtenidos de las temperaturas de aproximación. En estos se observa que con un flujo mínimo de 9 lts por minuto se obtuvieron temperaturas de aproximación bastante aceptables, ya que estuvieron cercanas a los 5°C sobre la temperatura de bulbo húmedo del ambiente. Con el flujo máximo (18 lt/min), las temperaturas de aproximación tendían a subir como es lógico debido a que hay menor transferencia de calor a lo largo de la caída de agua, ya que el tiempo de residencia del agua en la sección de empaque es más corto.

En el cuadro 8 se encuentra una proyección de la caída de temperatura a lo largo de la torre helicoidal a un flujo de 9 lts/min, obteniendo un resultado interesante y es que la temperatura del agua obtiene su valor más bajo un nivel de empaque antes del último de la torre, con lo cual tenemos la altura real a la que se obtiene el mayor descenso en la temperatura del agua.

En el cuadro 9 apreciamos diferentes temperaturas de rango (descensos de temperatura en la torre) de la torre helicoidal. Tenemos que

cuando un flujo se duplica, la temperatura de rango disminuye a la mitad aproximadamente, y cuando el flujo es igual y se duplica el área de contacto en la torre de enfriamiento helicoidal, aproximadamente se duplica la temperatura de descenso de agua a lo largo de la torre, lo que nos da parámetros gruesos para cálculos de diseño de torres de enfriamiento helicoidales.

Como ayuda complementaria al trabajo, se tienen los cuadros 10 y 11, en los cuales aparecen las humedades promedio y las velocidades de viento promedio que se registran anualmente en la ciudad de Guatemala. La velocidad máxima de viento (700 pies/min = 12.8 Kms/hr) y la mínima de 300 pies/min (5.48 Kms/hr), fueron buenos parámetros de medición, ya que se trabajó con una velocidad mínima de viento bastante inferior a las registradas en el cuadro, lo cual es importante, ya que en lugares donde no hay velocidad de viento alta como en la costa, puede ser de mucha utilidad. Observamos que la velocidad máxima con la que se trabajó es bastante inferior a las velocidades máximas registradas en el cuadro, lo que constituye una ventaja adicional, ya que con mayores velocidades de viento se puede lograr un aumento significativo en la temperatura de descenso de agua en la torre.

Con lo que se refiere a humedades, se trabajó con humedades inferiores a las promedio del departamento de Guatemala, pero la tendencia de disminución de temperatura en la torre helicoidal a diferentes humedades (de referencia) es bastante definida para hacer estimaciones gruesas de diseño (ver cuadro 9).

En lo que se refiere a montaje de la torre de enfriamiento heli-

coidal, ésta presenta desventajas y ventajas respecto de la torre de enfriamiento de forma cuadrada. Entre las desventajas tenemos que el soporte central de la torre helicoidal debe estar completamente vertical, ya que con un poco de inclinación, el agua tiende a desplazarse hacia los lados, lo que hace que no se distribuya uniformemente en toda la sección de empaque. Lo anterior no sucede con la torre de enfriamiento de forma cuadrada, ya que tiene soportes en las cuatro esquinas de la misma.

Una ventaja de la torre helicoidal es que se puede desmontar con facilidad, pudiéndosele aumentar el área de contacto de cada nivel o bien trasladarla a otro lugar y luego volverse a montar por su sistema de eje central.

En el aspecto económico, la torre de enfriamiento helicoidal utilizó menos cantidad de madera que la torre de enfriamiento cuadrada en su construcción, a la vez que su montaje es más sencillo.

XI. CONCLUSIONES

- A. La torre de enfriamiento atmosférica de forma helicoidal tiene una capacidad de enfriamiento levemente mayor que la torre de enfriamiento de forma cuadrada (1°C), lo que confirma la hipótesis planteada.
- B. Se logra un mejor descenso de temperatura del agua en la torre de enfriamiento atmosférica de forma helicoidal, con secciones de empaque con aberturas de ángulo pequeñas (en este caso 13.8 grados).
- C. La torre de enfriamiento de forma helicoidal, por su diseño, no causa una reducción de la velocidad de choque del viento con el agua que circula en su estructura, como lo hace la torre de enfriamiento de forma cuadrada.
- D. Existe una mejor distribución de agua en las secciones de empaque de la torre de enfriamiento atmosférica de forma helicoidal.

XII. RECOMENDACIONES

Al construir una torre de enfriamiento atmosférica de forma helicoidal, es importante seleccionar la madera de las secciones de empaque, ya que madera con muchos nudos provoca desviaciones en el empaque, con lo cual se afecta la distribución homogénea del agua en el mismo.

El eje central debe ser completamente perpendicular a la superficie en donde se instale la torre para evitar la caída de agua en sus extremos.

Los extremos de los empaques de la torre de enfriamiento atmosférica de forma helicoidal deben tener topes que se acoplen con las otras secciones de empaque, para que de esta forma se logre una estructura más fuerte y evitar pérdidas por caída de agua.

Recomiendo la construcción de torres de enfriamiento atmosféricas de forma helicoidal en la Universidad Del Valle de Guatemala y fábricas que las necesiten, ya que sus secciones de empaque, aparte de contribuir a lograr un mejor descenso de temperatura del agua de circulación, forman una estructura que puede servir de adorno en un área específica.

(12) Standford, W. and ...
1969 ...

(13) ...
1983 ...

(14) ...
1988 ...

XIII. BIBLIOGRAFIA

- (1) Bathia, M. Cooling towers fundamentals and application principles. 1980 Thecmonec Co. Publishers, USA. 232 pp.
- (2) Bennett, C. and Myers, J. Heat and mass transfer. 2da. edición. Mc 1975 Graw Hill Publishing Co, USA. 607 - 631 pp.
- (3) Chemical Engineering. Junio 1987. 173 - 174 pp.
- (4) Clark, L and Davidson, R. Operations of mass transfer. 2a edición. 1975 Mc Graw Hill, New York, USA. 472 - 481 pp.
- (5) Gurney, J. and Cotter, M. Cooling Towers. Mc Laren and Sons, Ltd. 1966 London. 658 pp.
- (6) Jackson, T. Cooling Towers. Butterworth Scientific Publ, London. 1951 204 pp.
- (7) Marley Company. Cooling Towers. Kansas City, USA. 68 pp 1967
- (8) Mc Cabe, W. Unit Operations of Chemical Engineering. 3a edición. 1980 Mc Graw Hill, New York, USA. 1028 pp.
- (9) Perry, R. and Chilton, C. Chemical Engineer Handbook. 5a. edición. 1973 Mc Graw Hill Co., New York, USA. 12-12, 12-15
- (10) Peters, M and Timmerhaus, K. Plant design and economics for engineers. 3a edición. Mc Graw Hill, New York, USA. 885-890 pp.
- (11) Sherwood, T. and Pigford, R. Mass Transfer. Mc. Graw Hill Co. 1975 New York, USA. 291-95, 280-86 pp.
- (12) Standford, W and G. Hill. Cooling Towers Principles and Fundamentals. Carter Thermal Co, USA. 454 pp. 1969
- (13) Timmerman, R. Applied process design for chemical and petrochemical plants. 3a. edición. Stanley Publishers, USA. vol 2 1983 1000 pp.
- (14) Treyball, R. Mass transfer operations. Mc Graw Hill Co, New York. 1980 259 - 269 pp.

CUADRO NO. 1

EXPERIMENTALES OBTENIDAS EN LOS TORRES MENTIONADAS EN EL CUADRO ANTERIOR
 ANGIO DE INCLINACION DE CADA TABLA

TEMPERATURA = 17°C
 HUMEDAD = 81%
 VIENTO RELATIVA = 60%

VELOCIDAD DEL VIENTO EN TORRES

ANGULO	NIVELES	ALTIMETRIA TORRES	VELOCIDAD DEL VIENTO
11.9	5	0.9 MTS.	3.75
27.6	5	0.60 MTS.	3.75

APENDICES

VELOCIDAD DEL VIENTO EN TORRES

ANGULO	NIVELES	ALTIMETRIA TORRES	VELOCIDAD DEL VIENTO
11.9	5	0.9 MTS.	3.75
27.6	5	0.60 MTS.	3.75

VELOCIDAD DEL VIENTO EN TORRES

ANGULO	NIVELES	ALTIMETRIA TORRES	VELOCIDAD DEL VIENTO
11.9	5	0.9 MTS.	3.75
27.6	5	0.60 MTS.	3.75

TEMPERATURAS DE LOS TORRES EN CADA UNO DE LOS TORRES EN GRADOS CENTIGRAOS Y EN
 LOS NIVELES EN CADA TORRE EN LOS TORRES

CUADRO NO. 1

DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS EN DOS TORRES HELICOIDALES CON DIFERENTE ANGULO DE INCLINACION EN CADA TABLON

T. BULBO HUMEDO = 17°C
T. BULBO SECO = 21°C
HUMEDAD RELATIVA = 65%

VELOCIDAD DEL VIENTO 300 PIES/MIN				
ANGULO	NIVELES	ALTURA TORRE	T. ENT.	T. SAL.
13.8	6	0.9 MTS.	31°C	28.5°C
27.6	6	0.60 MTS.	31°C	29°C

VELOCIDAD DEL VIENTO 500 PIES/MIN				
ANGULO	NIVELES	ALTURA TORRE	T. ENT.	T. SAL.
13.8	6	0.9 MTS.	31°C	27.5°C
27.6	6	0.60 MTS	31°C	28.5°C

VELOCIDAD DEL VIENTO 700 PIES/MIN				
ANGULO	NIVELES	ALTURA TORRE	T. ENT.	T. SAL.
13.8	6	0.9 MTS.	31°C	27.0°C
27.6	6	0.60 MTS	31°C	28°C

LAS TEMPERATURAS DE ENTRADA Y SALIDA ESTAN DADAS EN GRADOS CENTIGRADOS $\pm 0.5^\circ$
EL FLUJO UTILIZADO EN ESTAS PRUEBAS FUE DE 9 LTS/MIN.

CUADRO NO. 2

CORRIDAS DE TORRE DE ENFRIAMIENTO HELICOIDAL VRS TORRE DE ENFRIAMIENTO CUADRADA

TEMPERATURA DE BULBO SECO: 21.5°C
 TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO: 17°C
 HUMEDAD RELATIVA: 65%

FLUJO (LT/MIN)	T. ENT.	VELOCIDAD DEL VIENTO 300 pies/min		VELOCIDAD DEL VIENTO 500 pies/min		VELOCIDAD DEL VIENTO 700 pies/min	
		T. SAL. HELICOIDAL	T. SAL. CUADRADA	T. SAL. HELICOIDAL	T. SAL. CUADRADA	T. SAL. HELICOIDAL	T. SAL. CUADRADA
9	31.5	25	26	24.5	25.5	24	25
14	31.5	27	28	26.5	27.5	25.5	26.5
18	31.5	28.5	29.5	28	29	27	28

LAS TEMPERATURAS DE ENTRADA Y SALIDA ESTAN DADAS EN GRADOS CENTIGRADOS ± 0.5°C

CUADRO NO. 3

CORRIDAS DE TORRE DE ENFRIAMIENTO HELICOIDAL VRS TORRE DE ENFRIAMIENTO CUADRADA

TEMPERATURA DE BULBO SECO: 23.5°C
 TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO: 17°C
 HUMEDAD RELATIVA: 54%

FLUJO (LT/MIN)	T. ENT.	VELOCIDAD DEL VIENTO 300 pies/min		VELOCIDAD DEL VIENTO 500 pies/min		VELOCIDAD DEL VIENTO 700 pies/min	
		T. SAL. HELICOIDAL	T. SAL. CUADRADA	T. SAL. HELICOIDAL	T. SAL. CUADRADA	T. SAL. HELICOIDAL	T. SAL. CUADRADA
9	31.5	24.5	25.5	23.5	24.5	23	24
14	31.5	26	27.0	25	26	24	25
18	31.5	28	29	27.5	28.5	26.5	27

LAS TEMPERATURAS DE ENTRADA Y SALIDA ESTAN DADAS EN GRADOS CENTIGRADOS ± 0.5°C

CUADRO NO. 4

CORRIDAS DE TORRE DE ENFRIAMIENTO HELICOIDAL VRS TORRE DE ENFRIAMIENTO CUADRADA

TEMPERATURA DE BULBO SECO: 27°C
 TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO: 18°C
 HUMEDAD RELATIVA: 41%

FLUJO (LT/MIN)	T. ENT.	VELOCIDAD DEL VIENTO 300 pies/min		VELOCIDAD DEL VIENTO 500 pies/min		VELOCIDAD DEL VIENTO 700 pies/min	
		T. SAL. HELICOIDAL	T. SAL. CUADRADA	T. SAL. HELICOIDAL	T. SAL. CUADRADA	T. SAL. HELICOIDAL	T. SAL. CUADRADA
9	33.5	25	26	24.5	25.5	--	--
14	33.5	27.5	28.5	26.5	27.5	--	--
18	33.5	29.5	30.5	29	30	--	--

LAS TEMPERATURAS DE ENTRADA Y SALIDA ESTAN DADAS EN GRADOS CENTIGRADOS ± 0.5°C

CUADRO NO. 5
COMPARACION DE VELOCIDADES PROMEDIO DEL VIENTO EN LAS DOS TORRES (HELICOIDAL VRS. CUADRADA)

VEL VIENTO AMBIENTAL (PIES/MIN)	VEL VIENTO TORRE HELICOIDAL (PIES/MIN)	VEL VIENTO TORRE CUADRADA (PIES/MIN)
300	300	175
500	500	370
700	700	600

CUADROS NO. 6 Y 7
 DIFERENCIA DE TEMPERATURA ENTRE T. DE SALIDA DE LA TORRE HELICOIDAL
 Y T. DE BULBO HUMEDO A FLUJO MINIMO Y MAXIMO

FLUJO MINIMO: 9 LITROS/MIN

HUMEDAD	VELOCIDAD DE VIENTO (300 PIES/MIN)		VELOCIDAD DE VIENTO (500 PIES/MIN)		VELOCIDAD DE VIENTO (700 PIES/MIN)	
	TORRE HELICOIDAL	TORRE CUADRADA	TORRE HELICOIDAL	TORRE CUADRADA	TORRE HELICOIDAL	TORRE CUADRADA
65%	8	9	7.5	8.5	7	8
54%	7.5	8.5	6.5	7.5	6	7
41%	7	8	6.5	7.5	--	--

FLUJO MAXIMO: 18 LITROS/MIN

HUMEDAD	VELOCIDAD DE VIENTO (300 PIES/MIN)		VELOCIDAD DE VIENTO (500 PIES/MIN)		VELOCIDAD DE VIENTO (700 PIES/MIN)	
	TORRE HELICOIDAL	TORRE CUADRADA	TORRE HELICOIDAL	TORRE CUADRADA	TORRE HELICOIDAL	TORRE CUADRADA
65%	11.5	12.5	11	12	10	9
54%	11	12	10.5	11.5	9.5	10
41%	11.5	12.5	11	12	--	--

LAS TEMPERATURAS DE APROXIMACION ESTAN DADAS EN GRADOS CENTIGRADOS $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$

CUADRO NO. 8
 DESCENSOS DE TEMPERATURA DE AGUA A LO LARGO DE LA TORRE HELICOIDAL
 A FLUJO MINIMO (9 LITROS/MIN)

NIVEL	ALTURA (METROS)	VELOCIDAD DEL VIENTO 500 PIES/MIN : HUMEDAD 41%	VELOCIDAD DEL VIENTO 500 PIES/MIN : HUMEDAD 54%	VELOCIDAD DEL VIENTO 500 PIES/MIN : HUMEDAD 65%	VELOCIDAD DEL VIENTO 700 PIES/MIN : HUMEDAD 41%	VELOCIDAD DEL VIENTO 700 PIES/MIN : HUMEDAD 54%	VELOCIDAD DEL VIENTO 700 PIES/MIN : HUMEDAD 65%
1	0	33.5	31.5	31.5	--	31.5	31.5
6	0.6	29	27.5	28	--	27	27.5
12	1.2	25.5	25.5	26	--	25	26
13	1.3	24.5	23.5	24.5	--	23	24
14	1.4	24.5	23.5	24.5	--	23	24

LAS TEMPERATURAS REGISTRADAS ESTAN DADAS EN GRADOS CENTIGRADOS ± 0.5°C

CUADRO NO. 9.
DESCENSOS DE TEMPERATURA REGISTRADOS EN TORRE HELICOIDAL
DE 1.4 MTS DE ALTURA

FLUJO (LTS/MIN)	HUMEDAD	VELOCIDAD DEL VIENTO		
		300 PIES/MIN	500 PIES/MIN	700 PIES/MIN
9	65%	6.5 °C	7.0 °C	7.5 °C
	54%	7.0 °C	8.0 °C	8.5 °C
	41%	8.5 °C	9.0 °C	---
14	65%	4.5 °C	5.0 °C	6.0 °C
	54%	5.5 °C	6.5 °C	7.5 °C
	41%	6.0 °C	7.0 °C	---
18	65%	3.0 °C	3.5 °C	4.5 °C
	54%	3.5 °C	4.0 °C	5.0 °C
	41%	4.0 °C	4.5 °C	---

LAS TEMPERATURAS DE DESCENSO TIENEN INCERTIDUMBRE DE $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$

CUADRO NO. 10
HUMEDADES RELATIVAS PROMEDIO DEL DEPARTAMENTO
DE GUATEMALA

MES	AÑO				
	1988	1989	1990	1991	1992
ENERO	79%	76%	75%	74%	74%
FEBRERO	74%	74%	73%	71%	72%
MARZO	75%	73%	72%	71%	73%
ABRIL	80%	76%	77%	74%	--
MAYO	76%	78%	77%	74%	--
JUNIO	87%	86%	86%	84%	--
JULIO	83%	83%	82%	81%	--
AGOSTO	90%	85%	86%	84%	--
SEPTIEMBRE	88%	89%	87%	86%	--
OCTUBRE	82%	84%	83%	81%	--
NOVIEMBRE	81%	83%	84%	82%	--
DICIEMBRE	79%	81%	82%	80%	--

INFORMACION PROPORCIONADA POR EL INSIVUMEH

CUADRO NO. 11
VELOCIDAD DEL VIENTO PROMEDIO DEL DEPARTAMENTO
DE GUATEMALA (EN KMS/HR)

MES	AÑO				
	1988	1989	1990	1991	1992
ENERO	17	16.1	16.5	17.3	17.8
FEBRERO	16.5	18.2	17	17.2	16.8
MARZO	14.6	12.8	13.1	14.3	12.9
ABRIL	11.3	12.1	12.5	11.7	11.1
MAYO	10.4	10.5	11.0	10.0	--
JUNIO	6.8	8.2	9.0	7.5	--
JULIO	11.6	11.8	11.1	11.5	--
AGOSTO	7.8	8.3	8.4	8.1	--
SEPTIEMBRE	10.2	9.3	10.0	9.1	--
OCTUBRE	13.9	12.1	13.0	13.5	--
NOVIEMBRE	13.5	12.7	12.6	13.3	--
DICIEMBRE	16.4	13.2	16.0	15.5	--

INFORMACION PROPORCIONADA POR EL INSIVUMEH

CUADRO NO. 12

RELACION DE CAMBIO DE AREA CONTRA
FLUJO Y TEMPERATURA DE DESCENSO

HUMEDAD RELATIVA: 65%

VELOCIDAD DEL VIENTO: 500 PIES/MIN

NIVELES	AREA (EN CM2)	FLUJO (LT/MIN)	DESCENSO TEMPERATURA (EN °C)
13	5499	18	3.5
13	5499	14	5
13	5499	9	7
6	2538	9	3.5

CUADRO NO. 13

GASTO DE AGUA POR CADA EQUIPO AL MES
EN LITROS

UTILIZANDOLO 1 VEZ POR SEMANA	17280
UTILIZANDOLO 3 VE- CES POR SEMANA	51840

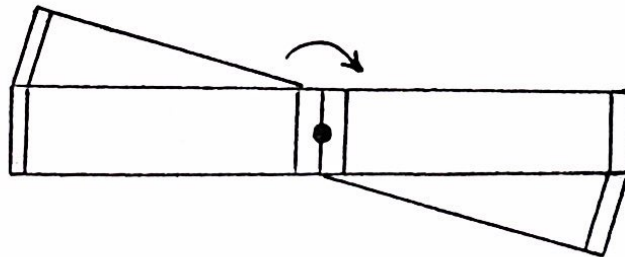
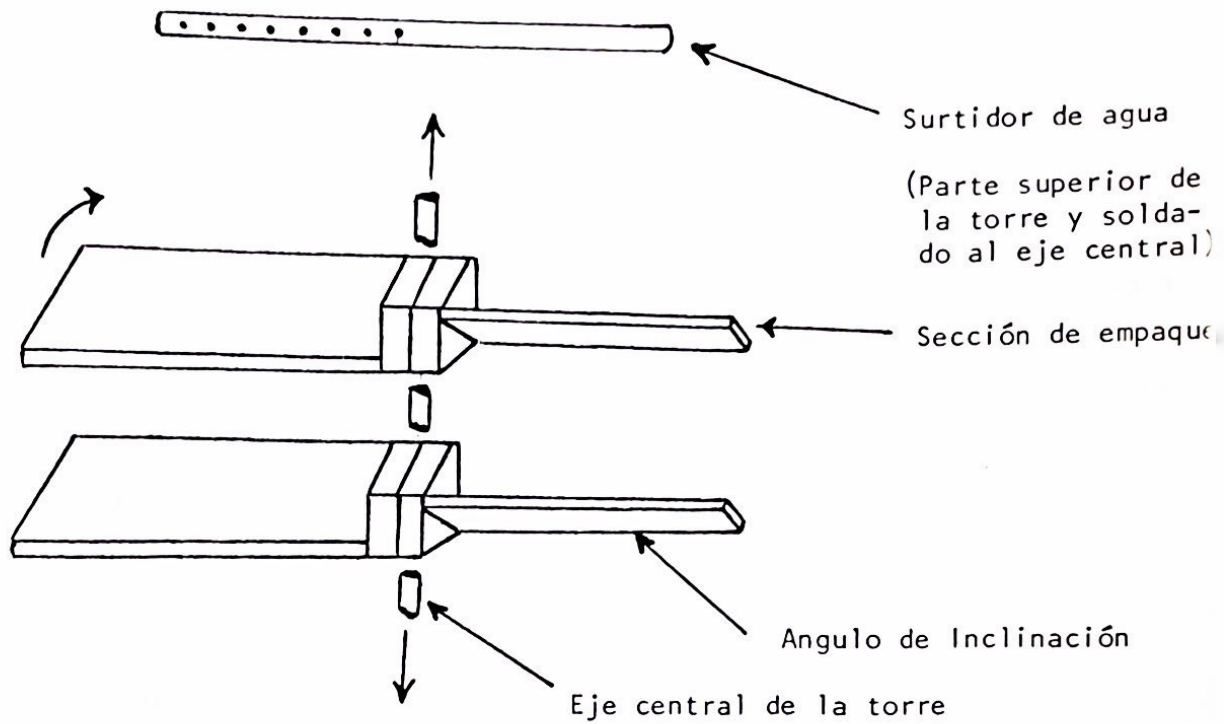
CUADRO NO. 14

GASTO DE AGUA POR CADA EQUIPO AL AÑO
EN LITROS

UTILIZANDOLO 1 VEZ POR SEMANA	172800
UTILIZANDOLO 3 VE- CES POR SEMANA	518400

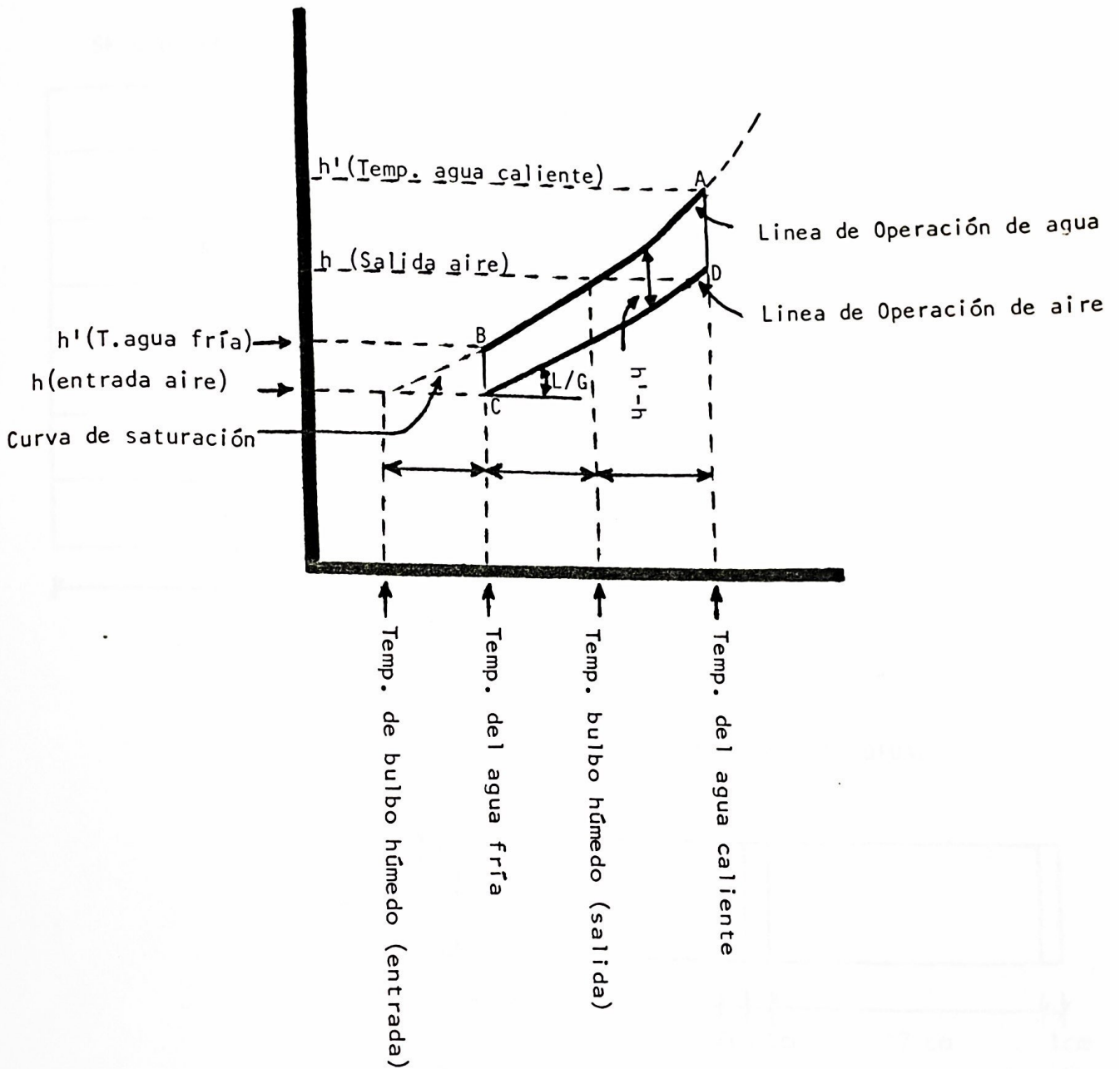
GRAFICA A

ESQUEMA DE TORRE DE ENFRIAMIENTO
ATMOSFERICA DE FORMA HELICOIDAL



Vista de la torre
helicoidal (Arriba)

GRAFICA B
BALANCE CALORIFICO DE UN PROCESO
DE TORRE DE ENFRIAMIENTO

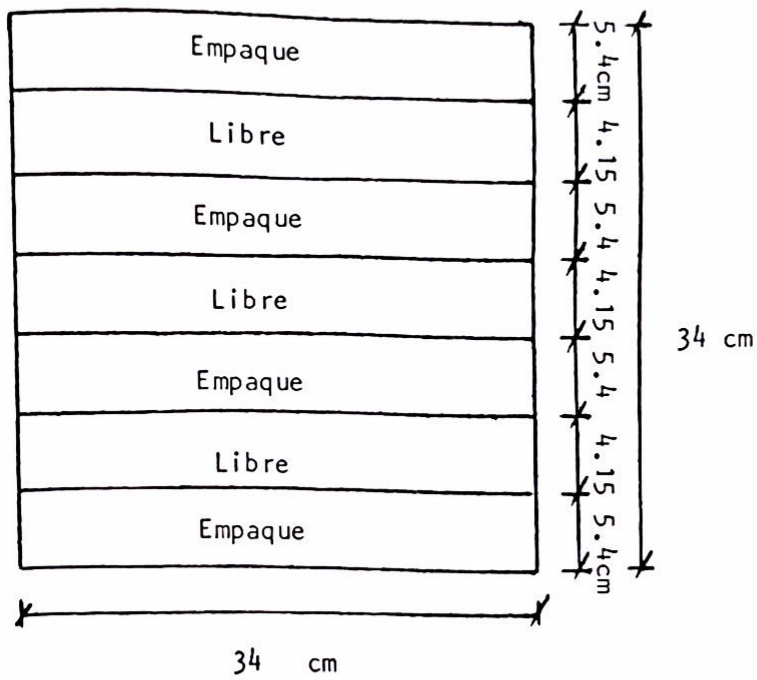


Gráfica tomada de referencia No. 9

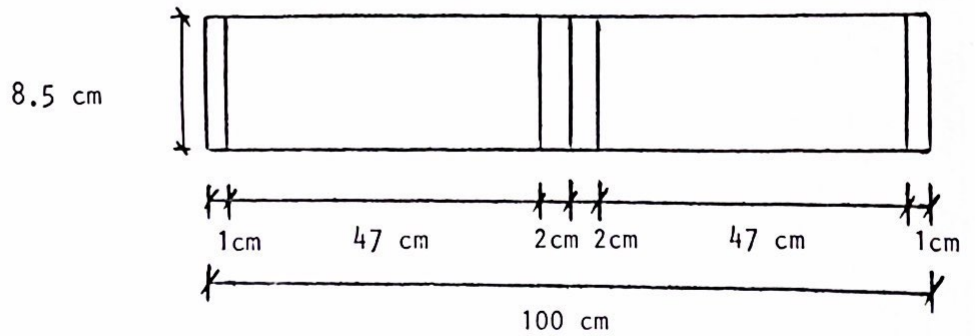
GRAFICA C

ESQUEMA DE SECCIONES DE EMPAQUE
TORRES DE ENFRIAMIENTO CUADRADA Y HELICOIDAL

SECCION DE EMPAQUE TORRE CUADRADA

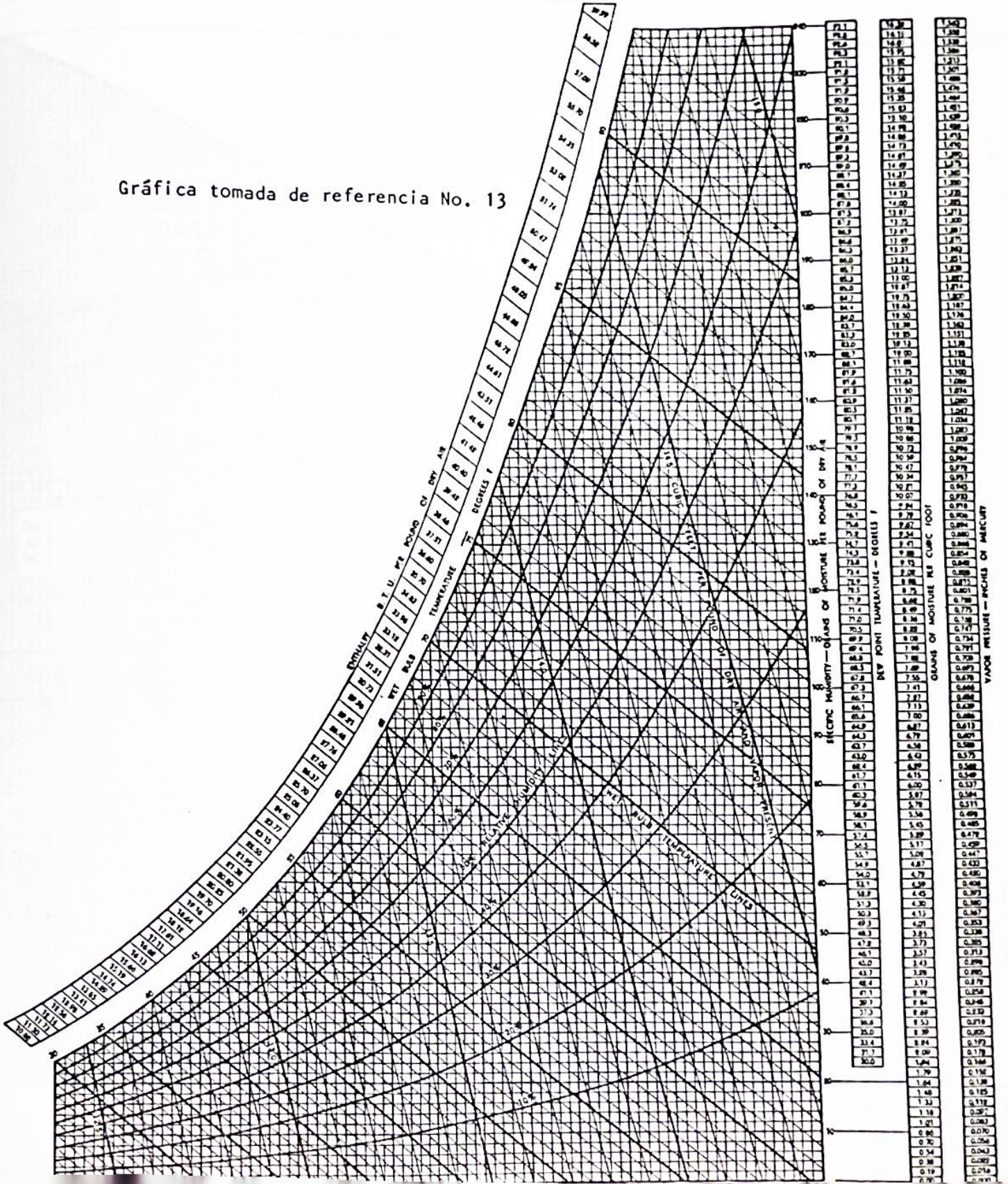


SECCION DE EMPAQUE TORRE HELICOIDAL



GRAFICA D
CARTA PSICROMETRICA

Gráfica tomada de referencia No. 13



GRAFICA E

Gráfica tomada de referencia No. 13

APPROACH

3

5

7

10

15

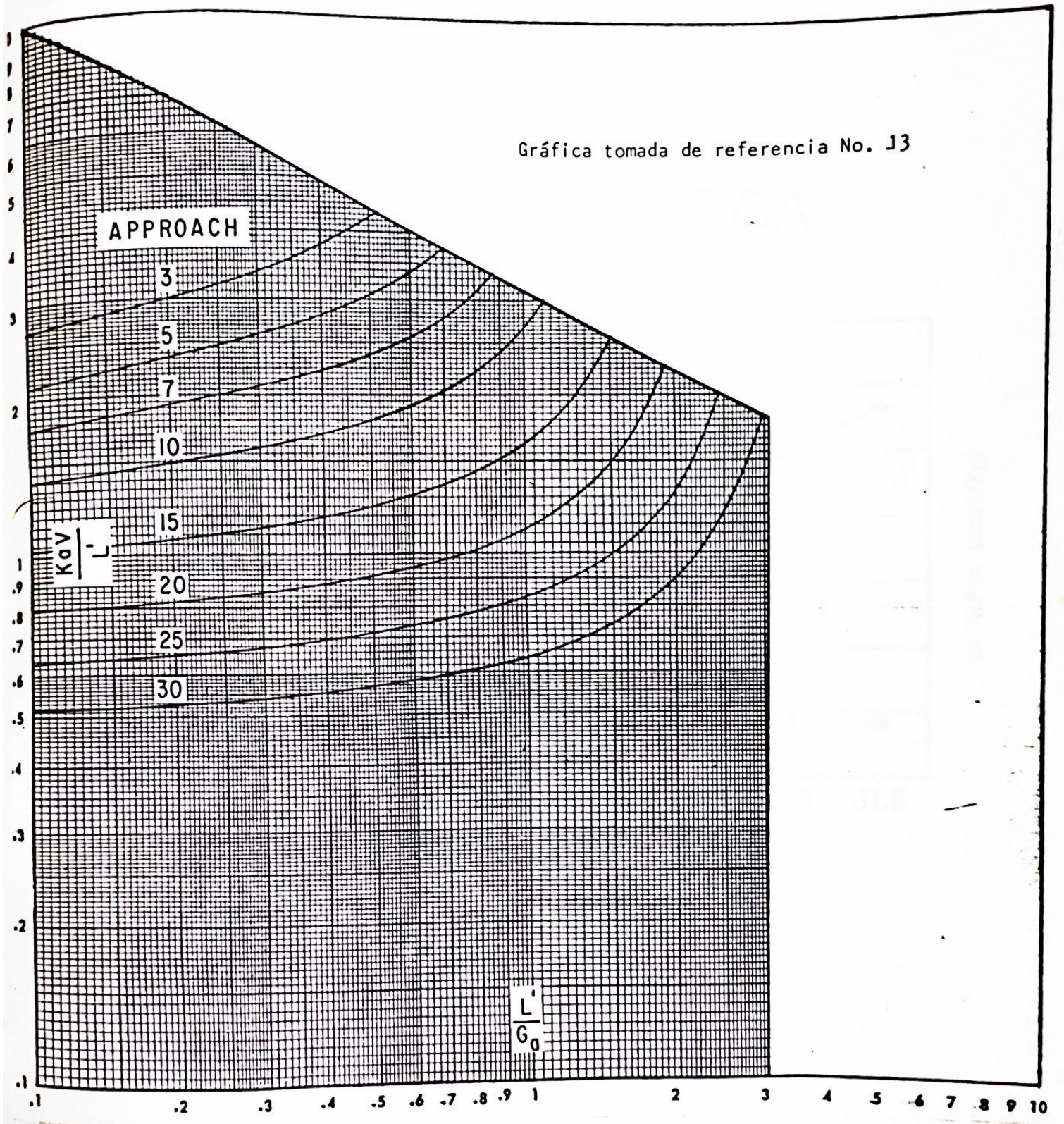
20

25

30

$\frac{K_{av}}{K_0}$

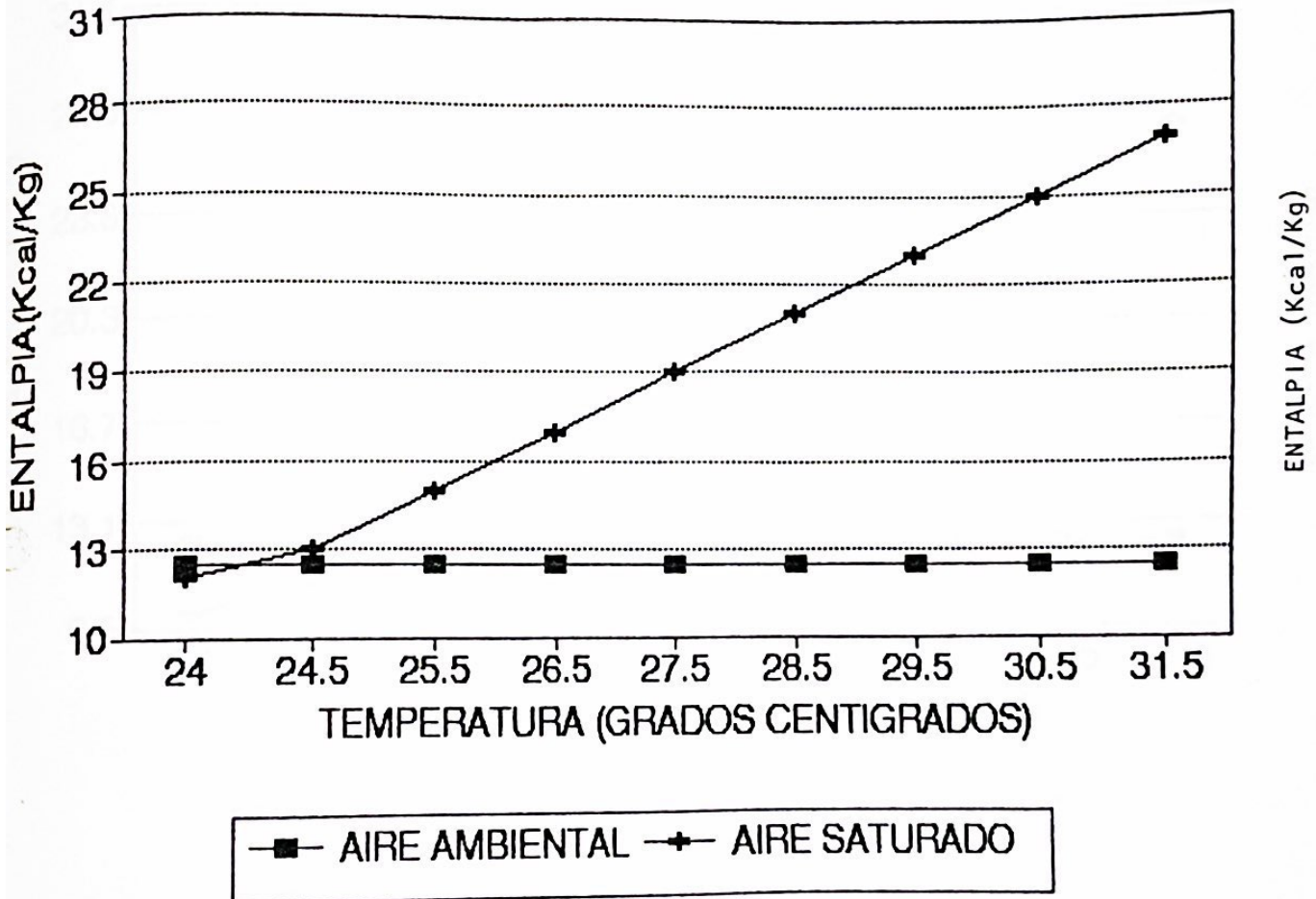
$\frac{L'}{G_0}$



GRAFICA F
CARTA PSICROMETRICA DE TORRE
DE ENFRIAMIENTO ATMOSFERICA DE FORMA HELICOIDAL
HUMEDAD RELATIVA DE 65%

CARTA PSICROMETRICA

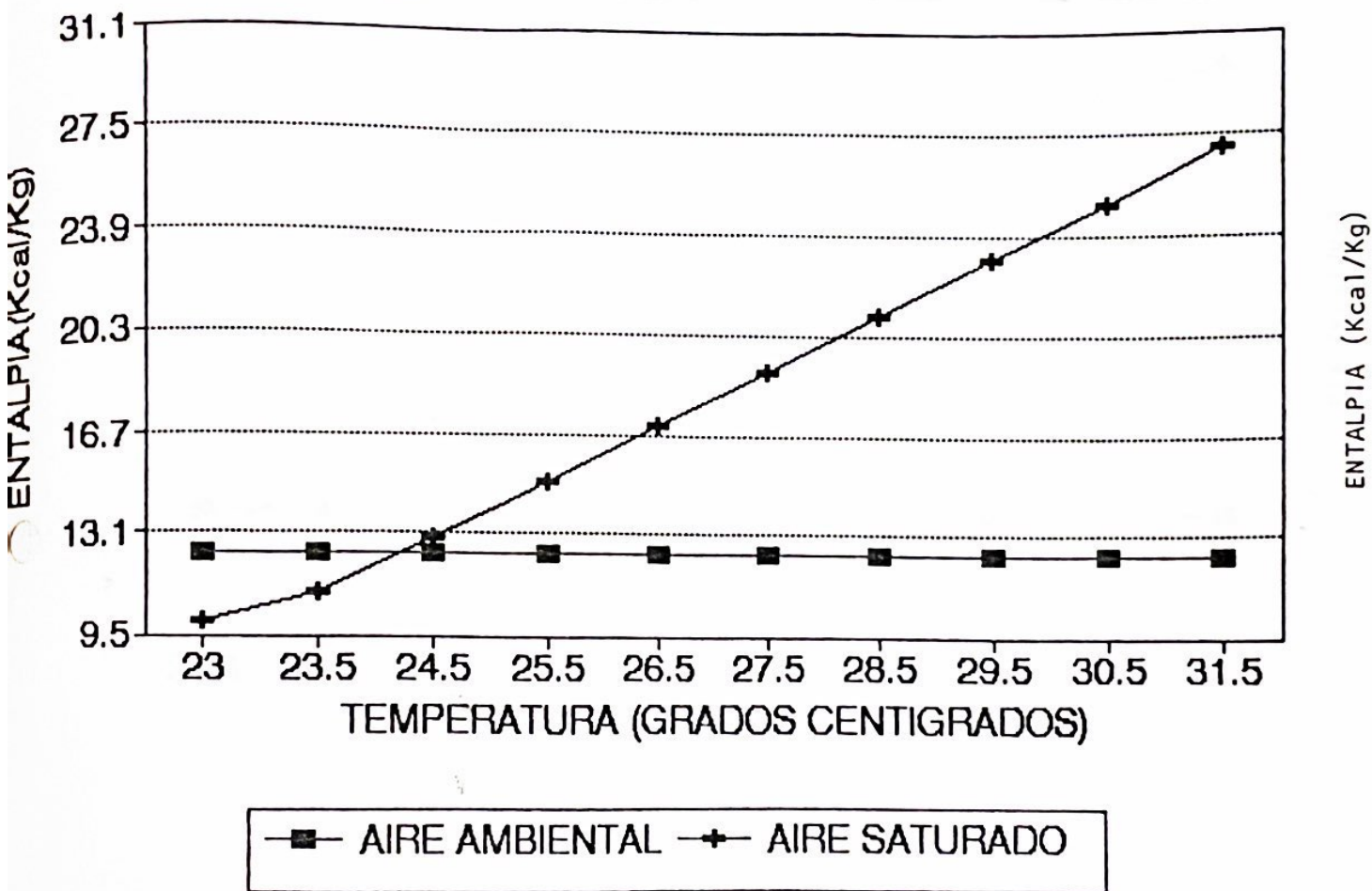
640 mmHg



GRAFICA G
CARTA PSICROMETRICA DE TORRE
DE ENFRIAMIENTO ATMOSFERICA DE FORMA HELICOIDAL
HUMEDAD RELATIVA DE 54%

CARTA PSICROMETRICA

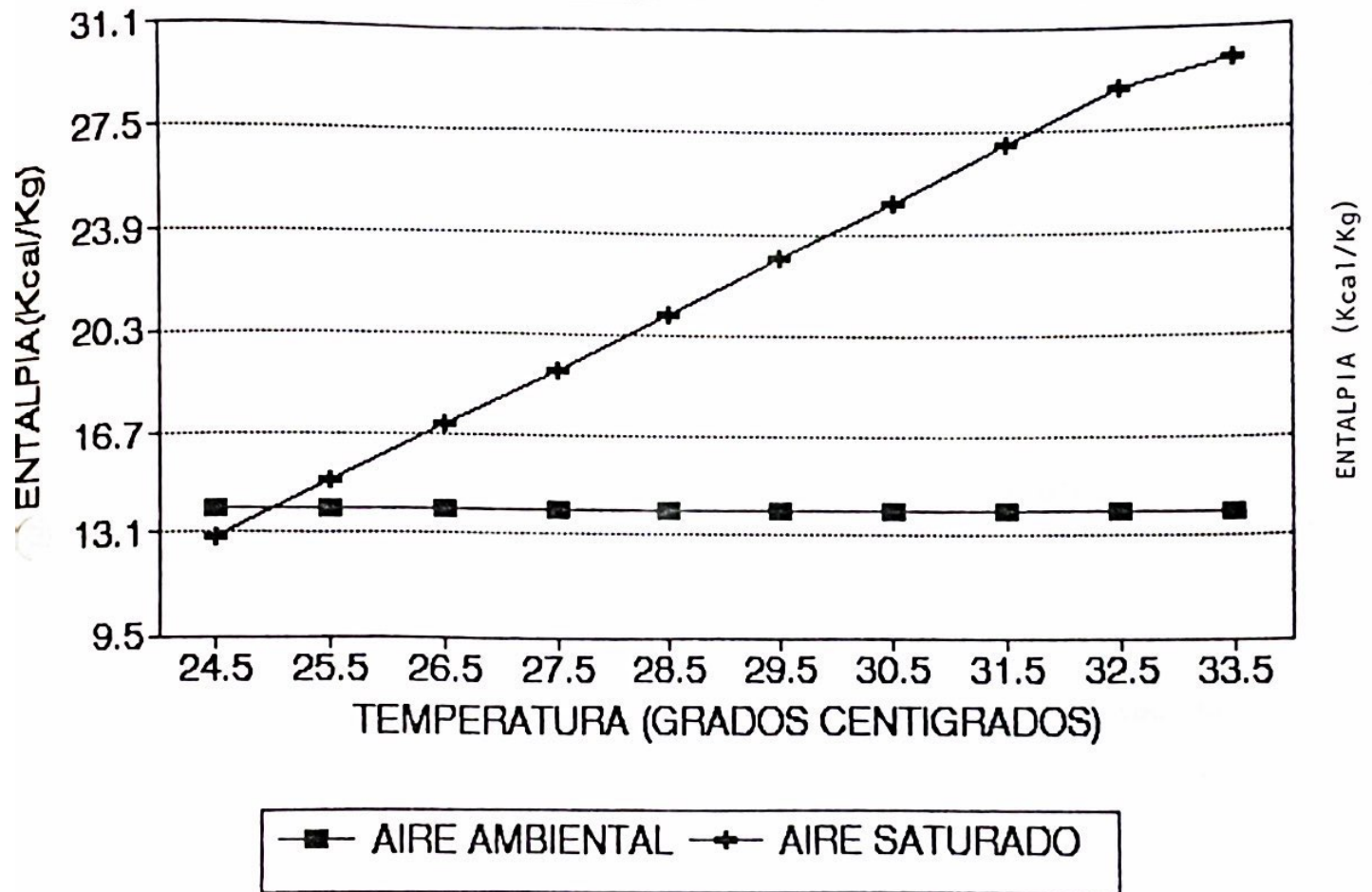
640 mmHG



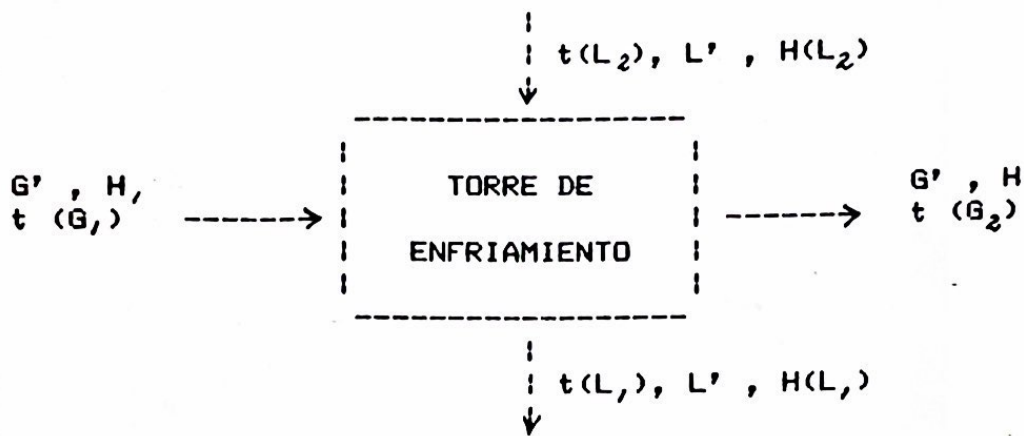
GRAFICA H
CARTA PSICROMETRICA DE TORRE
DE ENFRIAMIENTO ATMOSFERICA DE FORMA HELICOIDAL
HUMEDAD RELATIVA DE 41%

CARTA PSICROMETRICA

640 mmHG



BALANCE ENERGETICO
EN TORRES DE ENFRIAMIENTO



ENERGIA ENTRANDO = ENERGIA SALIENDO

$$L'Ca(L)t(L_2) + G'H_1 = L'Ca(L)t(L_1) + G'H_2$$

Donde;

- L' = flujo del liquido
- G = flujo de gas
- Ca = Capacidad Calorifica del liquido
- H = entalpia

FOTOGRAFIAS
DE TORRE DE ENFRIAMIENTO CUADRADA Y HELICOIDAL
MONTADAS EN PILETA DE PRUEBAS

