

24/4



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

**OPTIMIZACION DE LAS CONDICIONES DE
OPERACION DE UNA TORRE
HUMIDIFICADORA INSTALADA EN
EL LABORATORIO DE
INGENIERIA QUIMICA**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A
JUAN CARLOS AGUILAR RIOS

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



México, D. F. 1988

**EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA**



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 está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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

" Optimización de las condiciones de operación
de una torre humidificadora instalada en el
laboratorio de ingeniería química"

I.- INTRODUCCION

II.- GENERALIDADES

- 1.- antecedentes que hicieron posible elegir este tema de tesis
- 2.- Protocolo de experimentación
- 3.- Diagrama de secuencia de la experimentación

III.- EXPERIMENTACION

- 1.- Localización del área de trabajo
- 2.- Descripción del equipo empleado
- 3.- Descripción de la operación
- 4.- Procedimiento de arranque del equipo
- 5.- Determinación de las variables de operación
- 6.- Operaciones anormales de la torre
- 7.- Tablas de datos y resultados obtenidos experimentalmente
- 8.- Gráficas de los resultados obtenidos experimentalmente
- 9.- Correlaciones matemáticas obtenidas con los resultados experimentales

IV.- INFORMACION BIBLIOGRAFICA UTILIZADA PARA COMPARAR
LOS RESULTADOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE

V.- COMPARACION DE DATOS OBTENIDOS MEDIANTE LAS
CORRELACIONES EXPERIMENTALES Y CORRELACIONES
BIBLIOGRAFICAS

VI.- RESULTADOS, CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

BIBLIOGRAFIA

APENDICE

CAPITULO I

"INTRODUCCION"

INTRODUCCION

Ante la complejidad de los problemas existentes en la -
investigación en México, se requiere de una contribución cien-
tífica que garantice ciertas condiciones necesarias de apren-
dizaje para abrir nuevas alternativas y contribuyan en su mo-
mento, a librarnos al menos en parte, de una dependencia y -
subordinación científico-tecnológica y todo lo que ésto impli-
ca.

Es por ello que la presente investigación pretende cond-
ucir a la realización de ciertas prácticas profesionales en
las cuales se pretende optimizar los recursos existentes con
los que dispone el laboratorio de Ingeniería química, con fi-
nes didácticos y de servicio a la industria.

El presente trabajo tiene como objetivo primordial, de-
terminar las condiciones óptimas de operación de la torre em-
pacada instalada en el laboratorio de Ingeniería química, en
la cual se realiza la práctica de enfriamiento y humidifica-
ción de aire.

Es importante optimizar las condiciones de operación -
de éste equipo debido a la gran utilidad que tiene ésta ope-
ración en diferentes procesos industriales y es por eso que
se debe tener un equipo que opere adecuadamente en el cual -
los alumnos refuerzan sus conocimientos de las operaciones
de humidificación y enfriamiento de aire.

La determinación de dichas condiciones de operación, -
se pretenden evaluar por medio de la experimentación de di-

ferentes grupos de variables de operación (flujo de aire, flujo de agua, temperatura de aire alimentado a la torre, humedad del aire a la entrada de la torre). Las variables enunciadas se correlacionarán, pretendiendo con ello tener un cuadro estadístico muy diverso que permita visualizar los efectos que dichas variables generan en el proceso en cuestión. De los rangos permitidos por el equipo para la experimentación, se procederá a establecer un rango de operación en el cual el funcionamiento del equipo cumple con los objetivos didácticos previamente fijados (determinar los coeficientes de transferencia de masa y calor por medio del método gráfico de Mickley en la operación de humidificación y enfriamiento de aire).

Mediante el análisis sistemático de los resultados obtenidos en la experimentación, se espera contar con los elementos suficientes para poder determinar el margen y condiciones óptimas de operación de la torre.

En este contexto se dispone de una torre equipada con anillos raschig de cerámica que a su vez es alimentada con agua y aire en condiciones adecuadas a su funcionamiento.

Los resultados obtenidos de la tesis, como es lógico suponer, conducirán necesariamente al mejor desempeño de las prácticas profesionales en la Facultad, lo cual contribuye directamente a formar cuadros técnicos calificados que el país requiere en momentos actuales.

CAPITULO II

"GENERALIDADES"

GENERALIDADES

I.- Antecedentes que hicieron posible elegir ésta tem de tesis.

No cabe duda que la investigación científica surge de alguna incertidumbre que se genera en el proceso de conocimiento, al enfrentarse a algún problema concreto.

Como es obvio suponer, la construcción del conocimiento científico lleva implícitos principios metodológicos y con ellos se desarrollan las diferentes etapas del proceso de investigación.

La primera aproximación al objeto de conocimiento, surge cuando se perciben ciertas deficiencias en la torre humidificadora cuando se efectuara la práctica correspondiente, creanddo de ésta forma una inquietud en mi persona.

Es así como emerge el interés por desarrollar un trabajo que permitiera comprender la esencia de las deficiencias que no permiten que el equipo en cuestión funcione adecuadamente, y de ésta forma, proponer e implementar medidas para el mejor desarrollo del equipo anteriormente mencionado.

Ahora bien, lo que simultaneamente me motivó a desarrollar éste trabajo, fué la importancia que tiene la operación de enfriamiento y humidificación de gases en los procesos industriales, lo que hace necesaria la comprensión íntegra de ésta operación por parte de los estudiantes de ingeniería química, siendo éste tesis un pequeña aportación para éste efecto.

Dada la importancia que tiene dicha operación, el laboratorio de ingeniería química dispone de una torre empacada - para realizar la práctica de "enfriamiento y humidificación de aire" en la cual se suministra al equipo aire caliente - con baja humedad y agua a temperatura ambiente en un intervalo restringido de flujos.

El eje medular de la práctica consiste en determinar - experimentalmente los valores de los coeficientes volumétricos de transferencia de masa y calor, utilizando para ello - el método gráfico de Mickley.

Sin embargo las metas previamente fijadas no podían - ser alcanzadas con éxito, debido a que la torre desempeña la función de enfriar y humidificar el aire, pero dentro de los rangos de las variables de operación que maneja el equipo, no era posible determinar los coeficientes de transferencia de masa y calor mediante el método gráfico de Mickley.

Al realizar la práctica correspondiente en el equipo - mencionado anteriormente, el obstáculo al que se enfrentaban los alumnos al tratar de determinar los coeficientes en cuestión, era el siguiente:

Al trazar la línea de operación en el diagrama ental - pia-temperatura, dicha línea se cruzaba con la curva de equilibrio, haciendo imposible la determinación de los correspondientes coeficientes por éste método.

Observando ésta situación, solicité a las personas correspondientes su aprobación para desarrollar éste tema de - tesis teniendo como objetivo primario, determinar experimentalmente las condiciones óptimas de operación de la torre hu-

modificadora, en las cuales sea posible desempeñar exitosamente la práctica correspondiente.

2.- Protocolo de experimentación.-

El desarrollo del presente trabajo se aceptó como tema de tesis, siguiendo el protocolo de trabajo experimental que a continuación se presenta:

En primer término, se efectuarán corridas experimentales con el equipo sin hacerle modificación alguna, esto con la finalidad de tener una visión más amplia de las posibles causas que generen las fallas del equipo.

posteriormente se checará el funcionamiento adecuado de todos y cada uno de los instrumentos y equipo en general empleados en la experimentación, para tener certeza en los valores de las variables manejadas en cálculos posteriores.

Si se llegara a descubrir alguna falla o limitante en algún elemento del equipo empleado, se procederá a tratar de remediarla o a elegir alguna alternativa que logre compensar dicha falla o limitante.

Teniendo todo el equipo chequeado y corregido, se realizarán corridas experimentales probando diferentes grupos de variables de operación bajo la secuencia que a continuación se muestra:

a) Se fijará un gasto de agua en un valor conocido, variando el gasto de aire tanto como el equipo lo permita, manteniendo constante la temperatura del aire a la entrada de la torre.

La humedad del aire y temperatura del agua a la entrada de la torre, dependen enteramente de las condiciones am-

bientales.

b) Con el gasto de agua fijo, se variará el gasto de aire y temperatura del aire a la entrada de la torre.

c) Se fijará el gasto de aire en algún valor conocido, variando el flujo de agua tanto como sea posible. La temperatura del aire a la entrada de la torre permanecerá constante.

d) Manteniendo fijo el gasto de aire, se variará el gasto de agua y la temperatura del aire a la entrada de la torre.

Es importante mencionar que no se tiene control sobre las variables que representan la humedad del aire y temperatura del agua a la entrada de la torre, las cuales dependen enteramente de las condiciones ambientales.

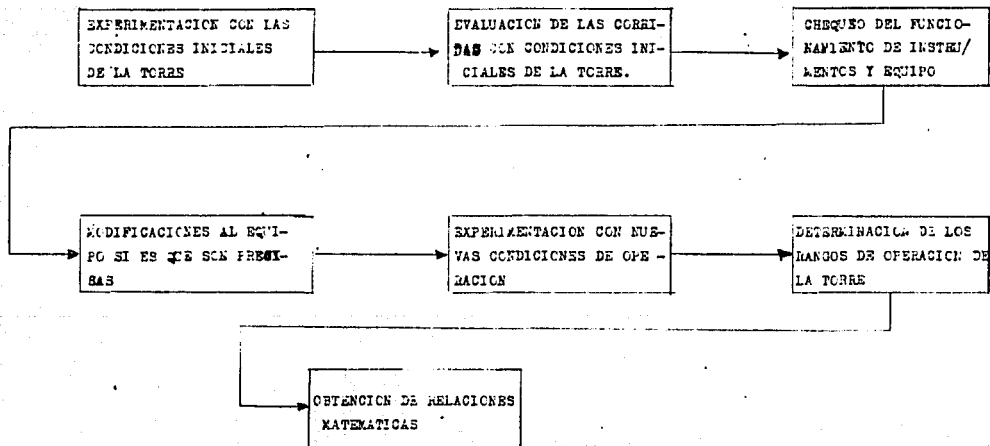
Con los datos obtenidos de la experimentación anterior, se evaluarán los resultados y se procederá a hacer un análisis de los mismos.

Mediante el análisis de los resultados obtenidos de la evaluación anteriormente mencionada, se espera poder determinar los rangos de operación de la torre para su adecuado funcionamiento.

Una vez que se hayan determinado los rangos de operación en los cuales la torre funciona adecuadamente, se procederá a proponer relaciones matemáticas que describan el comportamiento de los coeficientes en función de las variables manejadas, en los rangos de operación que se consideren adecuados.

3.-

DIAGRAMA DE SECUENCIA DE EXPERIMENTACION



CAPITULO III

"EXPERIMENTACION"

I.- Localización del área de trabajo

Descripción del laboratorio de ingeniería química.-

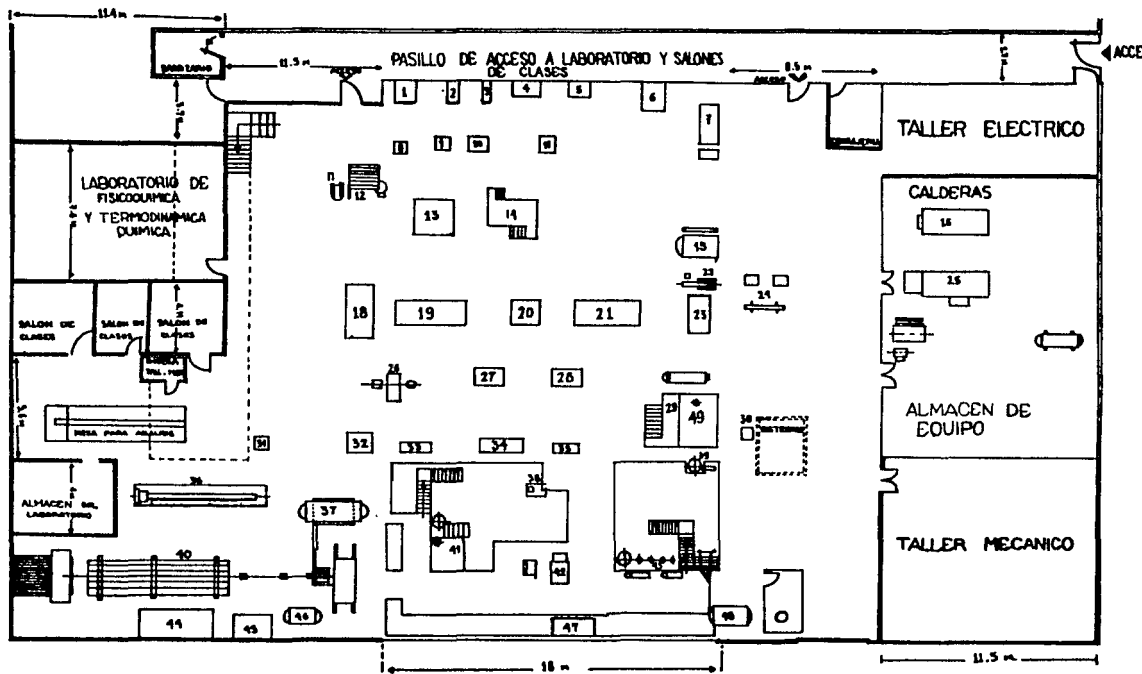
En la actualidad, el laboratorio de ingeniería química es utilizado para impartir las prácticas de la carrera de ingeniería química, operaciones unitarias, farmacéuticas y alimenticias.

Otra de las actividades que se realizan en dicho laboratorio, se refiere al desarrollo de tesis experimentales, lo que ha producido mejoras en los equipos e instalaciones; También el laboratorio proporciona servicios a la facultad, a la industria y a las universidades del interior del país.

El laboratorio se divide en las siguientes áreas de acuerdo a su funcionamiento:

- 1.- Área de proceso. En ésta área se encuentran los equipos e instalaciones utilizados para la realización de las prácticas.
- 2.- Área de mantenimiento. La constituyen el taller mecánico y su almacén, cuya finalidad es proporcionar mantenimiento preventivo y correctivo tanto a equipos como a instalaciones. Dentro de ésta área se encuentra también el taller eléctrico.
- 3.- Área de servicio auxiliar. En ésta, se incluyen los salones de clases, oficinas, cubículos, almacenes de material y sustancia.

A continuación se presenta el plano general de localización de equipo e instalaciones en el laboratorio de ingeniería química.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
 FACULTAD DE QUÍMICA
 LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA

Localización del equipo

Número	Equipo
1.-	Vibrador
2.-	Descascarilladora
3.-	Descascarilladora
4.-	cambiador de calor de flujo cruzado (equipo móvil)
5.-	Prensa hidráulica
6.-	Extractor centrífugo
7.-	Secador de espuma
8.-	Molino de martillo.
9.-	Molino abrasivo
10.-	Molino abrasivo
11.-	Pulverizador de minerales
12.-	cambiador de calor de horquilla
13.-	Molino de bolas
14.-	Secador rotatorio
15.-	Secador de carbón en vacío
16.-	Caldera
17	Tinques para tratamiento de agua
18.-	Equipo para ilución no newtonianos
19.-	Equipo para acondicionamiento de aire

Número	Equipo
20.-	Torre de enfriamiento
21.-	Secador de charolas
22.-	Bomba de vacío
23.-	Tanque enchequetado hermita
24.-	Cambiador de calor alejado
25.-	Caldera (fuera de servicio)
26.-	Filtro prensa
27.-	torre empacada para inundación
28.-	TORRE EMPACADA PARA EMPALMADO Y HUMIDIFICACION DE AIRE
29.-	Cambiador de calor de correa y tubos (fuera de servicio)
30.-	bomba de la cisterna
31.-	Equipo para descarga de tanques
32.-	Minifiltro prensa
33.-	Torre de paredes móviles
34.-	Equipo para destilación de arrastre con vapor
35.-	Torre empacada de cobre para destilación
36.-	Tonel de viento
37.-	Tanque de agua
38.-	Columna de platos de vidrio
39.-	Columna empacada de vidrio
40.-	Equipo para flujo de fluidos
41.-	Columna de platos

Número	Equipo
42	Filtro rotatorio al vacío
43.-	Evaporador a doble efecto
44.-	Equipo de lecho fluidizado
45.-	Equipo para factor de fricción
46.-	Compresor
47.-	Tablero de control
48.-	Tanque de agua destilada
49.-	Evaporador de cilindria a simple efecto.

2.- Descripción del equipo utilizado

Para llevar a cabo la fase experimental de ésta tesis, se utilizó la torre empacada con anillos raschig de cerámica instalada en el laboratorio de ingeniería química, que se emplea para realizar la práctica de enfriamiento y humidificación de aire en la asignatura de laboratorio de transferencia de masa.

Las características importantes del equipo, se presentarán mediante las hojas de especificación correspondientes.

La distribución del equipo utilizado y de los instrumentos empleados en el desarrollo de ésta tesis, se mostrarán mediante el diagrama de equipo utilizado.

II

Hoja de especificaciones del intercambiador de calor

Clave : EA-OI

Servicio : Calentador de aire

Dimensiones: 0.60 m de largo por 0.15 m de diámetro

Superficie por unidad : 598 cm²

Características de la unidad

	Cuerpo	tubos
Fluido circulando	vapor de agua	aire
Flujo total de entrada	0.2357 Kg/hr	18 Kg/hr
Vapor	0.2357 Kg/hr	----
No condensables	-----	18 Kg/hr
Flujo condensado	0.2137 Kg/hr	-----
Viscosidad fluido	0.25 cp.	-----
Peso molecular vapores	18	29
Calor del fluido	133.050 Kcal/Kg	-----
Calor vapores	649.20 Kcal/Kg	-----
Temperatura entrada	133.13 °C	18 °C
Temperatura de salida	133.13 °C	95 °C
Presión de operación	1.8 - 2.0 Kg/cm ²	1.8 - 2.0 Kg/cm ²
Número de puros	I	
Velocidad	0.1357 m/s	157.9 m/s
Calor intercambiado :	110 Kcal/hr	
T. _o L. :	27.1 °C	

Hoja de especificaciones de la torre

Clave: TA-OI

Servicio : Humidificación y enfriamiento de aire

Dimensiones : 1.2 m de alto por 0.104 m de diámetro

Altura empacada : 1 m

Empaque : Anillos raschig

Condiciones de operación y mecánicas

Presión de operación : 1.0 - 2.0 Kg/cm²

Temperatura de operación : 95 - 100 °C

Presión de diseño : x

Temperatura de diseño : 130 °C

Densidad del contenido : 1700.6 Kg/m³

Se mantiene por reportes propios; No

Material de recubrimiento; Yeso

Tapa : Acero

Aislamiento; Fibra de vidrio

BOQUILLAS

Servicio	Número	Dimensión (diámetro)
Alimentación de aire	1	1.9 cm.
Alimentación de aire	1	1.25 cm
Salida de vapor	1	2.66 cm.
Salida de agua	1	1.9 cm.
Tomas de temperatura	1	2.0 cm.
Tomas de presión	2	1.0 cm.

Hoja de especificaciones de las partes internas de la torre

Clave : TA-01

Empaque :

- a) Dimensión : 1.10 cm de largo por 1.25 cm. de diámetro
- b) Tipo : Anillos raschig de cerámica.
- c) Espesor : 0.6 cm.
- d) Altura de la sección empacada : 100 cm.
- e) Método de empaque: Flotación dentro de la torre llena de agua
- f) Arreglo del empaque : Al azar

Tipo de distribuidor : rejadera

Como removerlo : Por la parte superior

Tipo de redistribuidor: Sin redistribuidor

Como removerlo : No tiene

Tipo de soporte de empaque: Rejilla de barras

Como removerlo: Por la parte superior

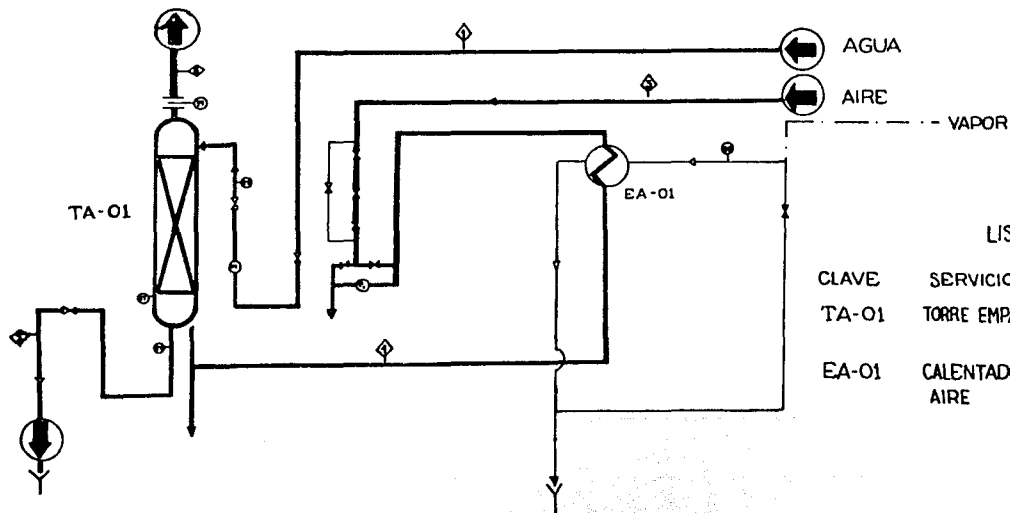
Materiales de construcción

Empaque : Cerámica

Distribuidor: Acero

Soporte del empaque: Acero

CORRIENTE	①	②	③	④	⑤
CONDICIONES					
FLUJO DE AGUA (kg/hr)	3.7	2.8	-	-	-
FLUJO DE AIRE (kg/hr)	-	-	13.37	13.37	13.37
VAPOR DE AGUA (kg/hr)	-	-	0.1431	0.1431	0.1431
PRESION (kg/cm ²)	2.1	2.1	1.0	2.0	1.0
TEMPERATURA (°C)	19.5	24.5	19	47.5	19.5



LISTA DE EQUIPO

CLAVE	SERVICIO	CARACTERISTICAS
TA-01	TORRE EMPACADA	ALTURA EMPACADA 1 METRO.
EA-01	CALENTADOR DE AIRE	CALOR INTERCAM. 110 Km /hr.

3.- Descripción de la operación de humidificación y enfriamiento de aire.

Esta operación de transferencia de masa y calor se lleva a cabo entre aire caliente y agua a temperatura ambiente.

El aire, que es abastecido por la compresora que distribuye aire a éste y a otros equipos, fluye primeramente a través del regulador de presión instalado en la tubería del aire con la finalidad de tener un flujo constante. Posteriormente el aire fluye por el by-pass, con el cual alineamos el flujo de aire, ya sea hacia el medidor mecánico o para evitarlo. A continuación, el aire fluye dentro del cambiador de calor, donde se calienta mediante vapor de agua proveniente de la caldera del laboratorio. El aire caliente y con baja humedad, es alimentado a la torre por el fondo de la misma, en donde circula a contracorriente con agua a temperatura ambiente, que es alimentada por la parte superior de la torre.

Con la finalidad de tener una superficie de contacto elevada, la torre está rellena con anillos ruschig de cerámica.

En el seno del empaque se lleva a cabo la transferencia de masa y calor entre las dos fases, en donde el aire caliente y con baja humedad que es alimentado a la torre, cede calor sensible al agua que entra a temperatura ambiente y ésta a su vez, cede calor latente y vapor de agua al aire, el cual se enfría y humidifica, llevándose a cabo de esta forma, la transferencia simultánea de masa y calor.

Después, de haber fluído entre el empaque de la torre, - el aire abandona la torre por la parte superior, húmedo y - frío, mientras que el agua sale por el fondo de la torre con una temperatura mayor a la que entró.

4.- Procedimiento de arranque del equipo.

El procedimiento de arranque de equipo, se realizó de acuerdo con la siguiente secuencia.

- 1.- Se coloca en el fondo de la torre, el termómetro que se utiliza para medir la temperatura de entrada del aire.
- 2.- Se pone en operación la compresora que abastece el aire al equipo, teniendo cuidado de que la válvula que regula la alimentación de aire al equipo esté cerrado.
- 3.- Una vez que la compresora tenga una presión entre 5.5 y 6.0 Kg/cm², se abre completamente la llave que regula el flujo de aire al equipo.
- 4.- Se fija un gasto de aire mediante el regulador de presión, el cual fué instalado en el equipo con la finalidad de evitar variaciones en el flujo de aire alimentado a la torre.
- 5.- Mediante el by-pass instalado en el equipo, se alinea la alimentación de aire para que circule por el medidor mecánico, si se manejan flujos bajos de aire o se alinea de tal manera que evite el paso por dicho medidor cuando se manejan gastos superiores a 80 lt/min.
- 6.- Se alimenta vapor de agua al cambiador de calor para calentar el aire que será alimentado a la torre, teniendo cui-

dado que la presión del vapor no sobrepase de 1.8 Kg/cm^2 .

7.- Se abre la válvula que controla la alimentación de agua a la torre y la válvula de salida de agua de la torre, regulando el flujo de agua con la válvula que está instalada en la línea de alimentación de agua a la torre, inmediatamente después del rotámetro.

8.- Se deja funcionando el equipo en éstas condiciones aproximadamente 20 minutos con la finalidad de que se establezcan las condiciones de operación.

9.- Una vez estabilizadas las condiciones de operación de la torre, se procede a tomar los datos necesarios para realizar los cálculos posteriores.

Tales datos son los siguientes:

- a) Gasto de agua
- b) Gasto de aire
- c) Temperatura de entrada de agua a la torre
- d) Temperatura de salida del agua de la torre
- e) Temperatura de entrada del aire a la torre
- f) Temperatura de salida del aire de la torre
- g) Humedad del aire a la entrada de la torre
- h) Humedad del aire a la salida de la torre

5.- Determinación de las variables de operación

A continuación se describe la forma en que fueron determinadas las variables de operación del presente trabajo, con la finalidad de que al realizar algunas corridas experimentales posteriores, se siga la misma metodología para po -

der esperar resultados acordes con los resultados reportados en esta investigación.

Los instrumentos utilizados en estas determinaciones, son los comunmente empleados en el laboratorio de ingeniería química.

Es importante aclarar que para la determinación de cada una de las variables de operación, se repetía la medición en tres ocasiones a las mismas condiciones de operación, utilizando el valor promedio entre las tres mediciones para los cálculos posteriores.

Gasto de agua .-

Para determinar el gasto de agua alimentado a la torre humidificadora, se tiene instalado un rotámetro en la línea de alimentación de agua al equipo. Dicho rotámetro tiene una escala de 0 - 100% graduada en porcentaje de flujo. La lectura del porcentaje de flujo se realiza mediante la observación visual de la posición de la parte más ancha del flotador con respecto a la escala del rotámetro.

Para obtener datos de gasto de agua en lt./min., se construyó una gráfica en la cual se relaciona el % de flujo con el gasto de agua en lt./min. (gráfica # 3.1).

Los datos de la gráfica anteriormente mencionada, se obtuvieron de la siguiente manera:

El flotador del rotámetro se fijaba en una posición determinada de la escala del % de flujo y posteriormente, mediante una probeta y un cronometro, se medía el flujo de agua por unidad de tiempo en la línea de salida de agua de la torre. De esta forma, la operación se repitió varias veces -

hasta obtener datos suficientes para la construcción de dicha gráfica.

Gasto de aire .-

El gasto de aire alimentado a la torre, se determinó utilizando datos de caída de presión a través del medidor de orificio instalado en la línea de salida de aire de la torre. Esta caída de presión se mide directamente mediante un manómetro diferencial instalado en el equipo, el cual utiliza nafta como líquido manométrico y cuyas ramas están conectadas a las tomas de presión del medidor de orificio. Con estos datos de caída de presión a través del orificio y siguiendo la secuencia de cálculo como se muestra en el ejemplo numérico, se calcula el gasto de aire alimentado a la torre.

Temperatura del agua a la entrada y a la salida de la torre.-

Para conocer la temperatura del agua a la entrada de la torre, el equipo tiene instalado, en la línea de alimentación de agua, un termómetro de carátula, cuya escala abarca de 0 - 150 °C.

En la línea de salida del agua de la torre, se encuentra instalado otro termómetro de carátula idéntico al anterior, - con los cuales se obtienen las lecturas de las temperaturas - del agua en forma directa.

Temperatura del aire a la entrada y a la salida de la torre.-

Para medir la temperatura del aire a la entrada de la torre, se inserta un termómetro mediante un tapón de hule, en el orificio que está colocado en la parte inferior

de la torre para éste efecto. El aire caliente que es alimentado por el fondo de la torre, se pone en contacto con el bulbo del termómetro, indicándonos de ésta manera, la temperatura del aire a la entrada de la columna.

Para determinar la temperatura del aire a la salida de la torre, se colocó el bulbo de un termómetro en la tubería de salida del aire de la torre, procurando hacer la medición lo más correcto posible.

Humedad del aire a la entrada y a la salida de la torre.-

La determinación de la humedad del aire a la entrada de la torre, se efectuó mediante la medición de la temperatura de bulbo húmedo y la temperatura de bulbo seco del aire, antes de pasar por el cambiador de calor.

En la salida de aire que tiene el equipo para éste efecto, se colocó un psicrometro lo más cercanamente posible para que al salir el aire por dicho conducto, se pusiera en contacto con los bulbos de los termómetros del psicrometro y de ésta manera se obtuvieron los valores de las temperaturas de bulbo húmedo y bulbo seco.

Con éstos datos de temperatura de bulbo húmedo y bulbo seco y utilizando la carta psicrométrica construida a 585 mm de mercurio de presión, se determinó gráficamente la humedad del aire.

En la línea de salida del aire de la torre se efectuó la misma operación para determinar la humedad del aire a la salida

GRÁFICA DE CALIBRACION DEL ROTÁMETRO

% FUMIG vs. L (L/MIN)

10 * FUMIG

20

30

40

50

60

70

$$L (L/MIN) = 8.809516 L (\%) - 0.108399$$

$$L (L/MIN) = 0.809516 F (FUMIG) - 0.108399$$

GRÁFICA 51

4 8 12 16 20 24 28 32 36 40 44 48 52 56 60 L (L/MIN) 100

b.- Operaciones anormales de la torre

Debido a las limitaciones propias del equipo con que cuenta el laboratorio de ingeniería química para desarrollar la práctica de enfriamiento y humidificación de aire, el equipo empieza a operar anormalmente cuando se observan las siguientes situaciones:

- a) Cuando la relación entre el flujo de agua y el flujo de aire (L/G) tiene un valor superior a 0.6
- b) Cuando la temperatura del aire a la entrada de la torre es menor que 80 °C.

Al decir operaciones anormales, se refiere a las condiciones de operación en las cuales no es posible lograr el objetivo de determinar los coeficientes de transferencia de masa y calor por medio del método gráfico de Mickley, aún cuando la torre cumple con la tarea de enfriar y humidificar el aire.

Tablas de datos y resultados obtenidos experimentalmente

Tabla de datos de las corridas seleccionadas

# corrida	L	G	L/G	T ₁	T ₂	t ₁	t ₂
1	1.425	17.31	0.065	18.5	26.5	105	28
2	1.510	14.18	0.1065	18.0	28.0	100	23
3	2.10	16.41	0.128	18.5	26.5	84	23.5
4	2.7	15.37	0.176	19.5	29.5	97.5	25.5
5	3.3	10.87	0.304	18.0	27.0	91.5	23.5
6	5.1	12.21	0.418	18.0	28.0	95.0	23.3
7	10.5	18.01	0.583	18.5	29.0	103.0	24.0
8	8.11	13.52	0.600	18.0	29.0	97.0	25.0
9	13.8	17.76	0.777	19.5	30.0	100.0	25.0
10	10.5	12.21	0.859	19.5	27.5	90.0	23
11	16.8	18.01	0.933	18.5	27.5	94.0	22.7

L = Flujo de agua (Kg/hr)

G = Flujo de aire (Kg/hr)

T₁ = Temperatura del agua a la entrada de la torre (°C)T₂ = Temperatura del agua a la salida de la torre (°C)t₁ = Temperatura del aire a la entrada de la torre (°C)t₂ = Temperatura del aire a la salida de la torre (°C)

Tabla de datos experimentales

# de corrida	Y_1	H_1	Y_2	H_2	t_2'	H_2'	$H_2 - H_2'$
1	0.007	29.71	0.0205	29.19	67.94	19.23	9.96
2	0.0065	28.18	0.018	27.65	67.93	16.46	11.18
3	0.0065	24.29	0.0182	23.26	49.91	16.71	6.55
4	0.0125	31.42	0.019	29.66	73.63	17.68	11.97
5	0.005	25.15	0.017	22.42	49.49	15.82	6.59
6	0.0075	27.6	0.0205	23.42	44.82	18.05	5.37
7	0.007	29.23	0.0195	23.1	46.01	23.1	5.48
8	0.011	30.34	0.017	23.74	54.7	16.35	7.30
9	0.0105	30.75	0.022	22.59	37.79	18.78	3.81
10	0.0055	27.05	0.015	20.17	45.42	14.71	5.45
11	0.0075	27.36	0.02	18.96	28.15	17.60	1.36

Y_1 = Humedad del aire a la entrada de la torre (Kg. v.a./kg. a.s.)

H_1 = Entalpia del aire a la entrada de la torre (Kcal./Kg.)

Y_2 = Humedad del aire a la salida de la torre (Kg. v.a./Kg. a.s.)

H_2 = Entalpia del aire a la salida de la torre (Kcal/Kg)

t_2' = Temperatura del aire a la salida de la torre si no hubieran pérdidas de calor (°C)

H_2' = Entalpia del aire a la salida de la torre, considerando las pérdidas de calor (Kcal/Kg)

$H_2 - H_2'$ = pérdidas de calor en la torre (Kcal/Kg)

Tabla de resultados obtenidos

# de corrida	C_{H1}	C_{H2}	\bar{C}_H	G_S	L_S	-hlu/kya
1	0.2432	0.2494	0.2463	2037.70	132.43	0.2058
2	0.2430	0.2487	0.2460	1669.0	177.82	4.30
3	0.2430	0.2484	0.2457	1931.75	247.20	2.36
4	0.2457	0.2487	0.2472	1809.28	317.84	2.9
5	0.2423	0.2478	0.2451	1279.39	386.47	1.03
6	0.2434	0.2494	0.2459	1437.34	600.36	7.80
7	0.2432	0.2489	0.2461	2119.94	1236.04	12.66
8	0.2430	0.2484	0.2457	1561.65	954.99	9.0
9	0.2448	0.2496	0.2472	2090.67	1624.51	
10	0.2425	0.2469	0.2447	1437.34	1236.04	
11	0.2434	0.2492	0.2463	2119.94	1977.66	

C_{H1} = Calor húmedo de la mezcla a la entrada de la torre (Kcal/Kg)

C_{H2} = Calor húmedo de la mezcla a la salida de la torre (Kcal/Kg)

\bar{C}_H = Calor húmedo promedio de la mezcla (Kcal/Kg)

G_S = Flujo másico superficial de aire (Kg/hr m²)

L_S = Flujo másico superficial de agua (Kg/hr m²)

-hlu/kya = pendiente de la línea de unión (ΔH/°C)

Tabla de valores de los coeficientes obtenidos en las corridas realizadas.

# corrida	N_G	H_G	kya	hLa	hGa
1	0.4296	2.3278	875.40	180.156	215.61
2	0.5358	1.8662	894.30	3845.50	220.0
3	0.7336	1.3632	1417.05	3344.25	348.17
4	0.3356	3.2754	607.26	1761.06	150.12
5	0.9243	1.0819	1182.58	17780.15	289.85
6	0.9954	1.0046	1430.65	11159.12	351.80
7	1.1786	0.8484	2498.71	31633.66	614.92
8	1.154	0.866	1837.88	16540.29	451.55
9	----	----	----	----	----
10	----	----	----	----	----
11	----	----	----	----	----

N_G = Número de unidades de transferencia

H_G = Altura de las unidades de transferencia (m)

kya = Coeficiente volumétrico de transferencia de masa (Kg/hr m³ Y)

hLa = Coeficiente volumétrico de transferencia de calor del agua (Kcal/hr m³ °C)

hGa = Coeficiente vol. de transferencia de calor del aire (Kcal/hr m³ °C)

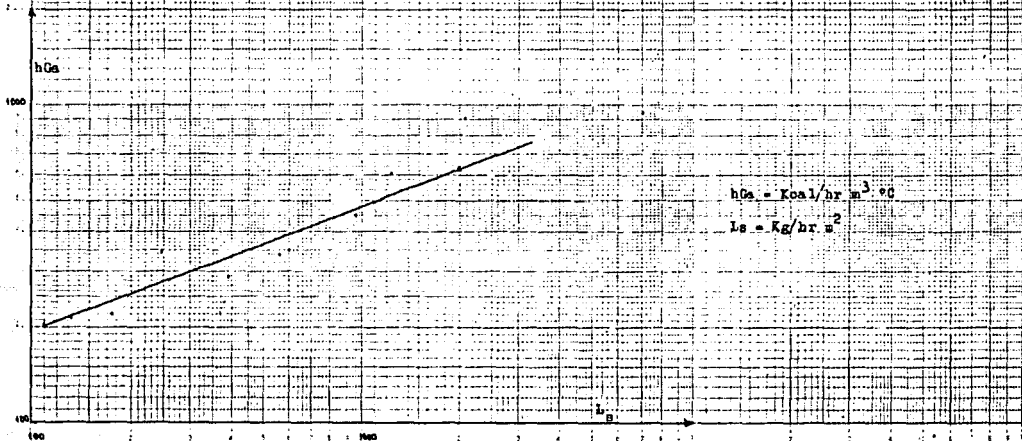
GRAFICA LCG - 100

h_{Ca} V.S. L_s

SISTEMA AIRE - AGUA

$P = 585$ mm Hg

Anillos raschig de cerámica 12.5 mm



GRAFICA LOG (hLa / Qs) V.S. LOG La

SISTEMA AIRE - AGUA

P = 585 mm Hg

ABILLOS NASCIBO DE ORHARICA 12,5 mm

LOG (hLa / Qs)

1.5

1.0

0.5

0

-0.5

-1.0

-1.5

$hLa = KLa / hL a^2 \cdot C$
 $Qs = Kg / hL a^2$
 $hL = Kg / hLa$

LOG La

2.0

2.2

2.4

2.6

2.8

3.0

3.2

CHARTON DE LCC (kya/0.2) VS LCC Le

SLUTERIA AIRE- AGIA

V = 585 mm/s

LCC (kya/0.2)

0.2

0.1

0

-0.1

-0.2

-0.3

-0.4

-0.5

-0.6

2.0

2.2

2.4

2.6

2.8

3.0

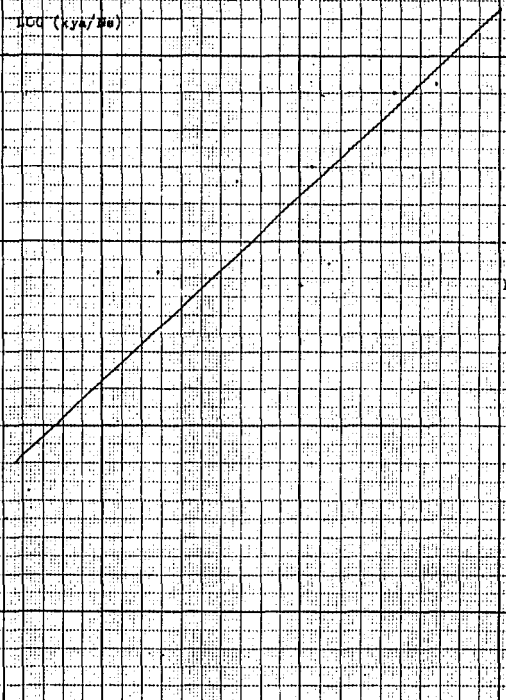
3.2

LCC Le

$$kya = kg / km^2 \cdot h$$

$$G = w \cdot kg / km^2 \cdot h$$

$$Lc = kg / km^2 \cdot h$$



GRAFICA ES LOG (hGn/Gp) v.s. LOG Lp

SISTEMA ALRE - AJA

F = 585 mm Hg

ANILLOS DESCRIO DE QUIMICA 12.5 mm

LOG (hGn/Gp)

-0.5

-0.6

-0.7

-0.8

-0.9

-1.0

-1.1

$Gp = \text{Kg/m}^2/\text{hr}$

$Gn = \text{Kg/m}^2/\text{hr}$

$Lp = \text{Kg/hr}$

LOG Lp

2.0

2.2

2.4

2.6

2.8

3.0

3.2

•

Correlaciones matemáticas obtenidas con los datos experimentales.

Es evidente que en muchos casos no basta trazar una curva de un conjunto de datos. Lo ideal sería encontrar una curva específica que describiera, al menos aproximadamente, el comportamiento de las variables.

Con este propósito emplearemos el método de mínimos cuadrados para obtener las ecuaciones que representen el valor de los coeficientes anteriormente citados, en función de las variables manejadas.

Entre las justificaciones más importantes que hacen que este método sea el más apropiado destacan la bondad de la aproximación (o sea, para ver que tan buena es la aproximación) debido a la forma de medir los errores entre los valores observados y los valores estimados, utilizando el criterio de que la curva de mejor ajuste es aquella para la cual la suma de los errores al cuadrado es mínima.

A continuación se presentan las ecuaciones utilizadas por este método para determinar los parámetros de la mejor línea que se ajuste a los datos obtenidos.

La ecuación tiene la forma:

$$Y = m X + b$$

Donde:

m = pendiente de la línea

b = ordenada al origen

Cálculo de "m" y de "b"

$$m = \frac{(1/n) \sum X_1 Y_1 - \bar{X} \bar{Y}}{(1/n) \sum X_1^2 - \bar{X}^2}$$

en donde \bar{X} y \bar{Y} son las medias de los valores X_1 y Y_1 respectivamente.

Esta línea de regresión ajusta los datos obtenidos.

Las correlaciones encontradas para los datos obtenidos experimentalmente son las siguientes

$$\begin{aligned} \text{Recta } \log k_{yn} \text{ vs. } \log L_B \\ Y = 0.3924 X + 2.1145 \\ k_{yn} = 130.1667 L_B^{0.3924} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Recta } \log hL_u \text{ vs. } \log L_B \\ Y = 2.2516 X - 2.0626 \\ hL_u = 0.008585 L_B^{2.2516} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Recta } \log hG_u \text{ vs. } \log L_B \\ Y = 0.3316 X + 1.5072 \\ hG_u = 32.1514 L_B^{0.3316} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Recta } \log (k_{yn}/G_u) \text{ vs. } \log L_B \\ Y = 0.4048 X - 1.1631 \\ k_{yn}/G_u = 0.0686 L_B^{0.4048} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Recta } \log (hL_u/G_u) \text{ vs. } \log L_B \\ Y = 1.7949 X - 3.3809 \\ hL_u/G_u = 1.0449 \times 10^{-4} L_B^{1.7949} \end{aligned}$$

Recta $\log(hG_a/G_b)$ vs. $\log L_a$

$$Y = 0.4046 X - 1.772$$

$$\underline{hG_a = 0.0169 L_a^{0.4046}}$$

En donde:

$$k_{ya} = \text{Kg/hr m}^3 \text{ Y}$$

$$hL_a = \text{Kcal/hr m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$hG_a = \text{Kcal/hr m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$L_a = \text{Kg/hr m}^2$$

$$G_b = \text{Kg/hr m}^2$$

Límites de confianza y pruebas de significancia de las ecuaciones obtenidas .

Además de la estimación de las relaciones lineales entre las variables manejadas en éste trabajo, se procederá a hacer ciertas inferencias acerca de la pendiente e intersección o la calidad general de la línea de regresión estimada.

A continuación se muestra el método utilizado para dicho efecto.

A.- Intervalo de confianza para el coeficiente de regresión (pendiente de la línea)

I.- Se calculan los siguientes parámetros:

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n}$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2}{n}$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)}{n}$$

$$s^2 = \frac{S_{yy} - m S_{xy}}{n-2}$$

- 2.- Se escoge un nivel de confianza (95%, 99% o alguno semejante).
- 3.- Con la ayuda de la tabla de distribución t de student con n-2 grados de libertad, se evalúa el parámetro $t_{\alpha/2}$
- 4.- Con los elementos anteriores, se calcula el intervalo de confianza de la pendiente de la línea (β)

$$m - \frac{t_{\alpha/2} s}{\sqrt{S_{xx}}} \leq \beta \leq m + \frac{t_{\alpha/2} s}{\sqrt{S_{xx}}}$$

B.- Evolución de la hipótesis de que el valor de β no difiere significativamente con respecto a un valor determinado.

- 1.- Se postula la hipótesis central β_0
- 2.- Se postula una hipótesis alternativa β_1
- 3.- Se escoge un nivel de significancia (5%, 1% o alguno semejante)
- 4.- Mediante la tabla t de student, con los datos correspondientes, se obtiene la región crítica
- 5.- Se calcula $t = \frac{m - \beta_0}{s/\sqrt{S_{xx}}}$

Si t cae dentro de la región crítica, se acepta la hipótesis.

Si t cae fuera de la región crítica, se rechaza la hipótesis.

Siguiendo la misma metodología anterior, utilizando las fórmulas correspondientes, se calcula el intervalo de confianza y la prueba de hipótesis para la ordenada al origen (α)

$$b - \frac{t_{\alpha/2} S \sqrt{\frac{\sum X_i^2}{n}}}{\sqrt{ns_{xx}}} \leq \alpha \leq b + \frac{t_{\alpha/2} S \sqrt{\frac{\sum X_i^2}{n}}}{\sqrt{ns_{xx}}}$$

$$t = \frac{b - \alpha_0}{S \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n X_i^2}{n} / ns_{xx}}}$$

A continuación se presentan los intervalos de confianza de los parámetros α y β de las líneas rectas obtenidas, con un nivel de confianza de 95% y un nivel de significancia de 5%.

$$\begin{aligned} \text{LoL } k_{yA} &= \alpha + \beta \log L_{11} \\ -1.014 &\leq \beta \leq 1.7934 \\ -1.599 &\leq \alpha \leq 5.02 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \log h_{1A} &= \alpha + \beta \log L_{1B} \\ 0.7259 &\leq \beta \leq 3.781t \\ -0.1044 &\leq \alpha \leq 1.9718 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \log h_{0B} &= \alpha + \beta \log L_B \\ 0.04815 &\leq \beta \leq 0.7352 \\ 0.60 &\leq \alpha \leq 2.4138 \end{aligned}$$

$$\log (k_{\text{YL}}/G_{\text{B}}) = \alpha + \beta \log L_{\text{B}}$$

$$0.1443 \leq \beta \leq 0.6647$$

$$-1.849 \leq \alpha \leq -0.4772$$

$$\log (hL_{\text{H}}/G_{\text{B}}) = \alpha + \beta \log L_{\text{B}}$$

$$0.9023 \leq \beta \leq 2.0374$$

$$-6.3304 \leq \alpha \leq -1.6353$$

$$\log (hG_{\text{B}}/G_{\text{B}}) = \alpha + \beta \log L_{\text{B}}$$

$$0.1135 \leq \beta \leq 0.6957$$

$$-2.540 \leq \alpha \leq -1.004$$

CAPITULO IV

**" INFORMACION BIBLIOGRAFICA UTILIZADA PARA COMPARAR LOS RESULTA/
DOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE"**

Información bibliográfica obtenida para correlacionar los resultados obtenidos experimentalmente

Las investigaciones realizadas por W.H. Mc. Adams y colaboradores, se refiere a transferencia de masa y calor entre aire y agua en una torre empacada.

El trabajo fue realizado con la finalidad de demostrar - las ecuaciones básicas simultáneas de transferencia de calor y masa entre el aire y el agua en una torre empacada con anillos raschig de carbón de una pulgada, empleando alturas de empaque de 6, 9 y 12 pulgadas (15.24, 22.86 y 30.48 cm).

Los gastos del gas tuvieron un rango de 350 - 1000 lb/hr pie² (1707.9 - 4879.8 KL/hr m²). La velocidad del líquido varió en un rango de 500 - 2600 lb/hr pie² (2459.9 - 12687.5 KL/hr m²) y la temperatura del agua varió en un rango de 95 a 135 °F (35 - 57 °C).

Sus corridas adiabáticas de enfriamiento de agua dieron resultados de coeficientes de transferencia de calor para la fase líquida iguales a:

$$hL_a = 0.82 G_a^{0.7} L_a^{0.5}$$

Esta ecuación se basó en la suposición de que la relación de Lewis es válida, o sea:

$$hG_a/k_y a = C_H$$

La torre que utilizaron tenía una altura de 36 pulgadas (91.4 cm) y un diámetro de 4 pulgadas (10.4 cm). tenía ade-

más un calentador de resistencia, un fueyo que produce un gasto volumétrico hasta de 1000 lb/hr pie².

Al graficar hG_a vs. L_s , se pudo notar que los coeficientes varían con la velocidad del agua a una potencia la cual es también una función de la velocidad del gas, a un exponente con un rango desde 0 para $G_s = 350$ lb/hr pie² (1077.9 kg/hr m²) hasta 0.15 para $G_s = 1000$ lb/hr pie² (4879.8 kg/hr m²) por lo tanto se le atribuye al gasto volumétrico una pendiente de 0.07.

En la gráfica logarítmica de $hG_a/L^{0.07}$ vs. G_s , se dio una pendiente de 0.7 la cual es una de las magnitudes esperadas de las correlaciones conocidas para coeficientes de transferencia de calor y su ecuación representativa es la siguiente:

$$hG_a = 2.1 G_s^{0.7} L_s^{0.07}$$

$$hG_a = \text{BTU } \text{OF } \text{pie}^3$$

Valores de las correlaciones anteriores en el sistema MKS.

$$hL_a = 1.111 G_s^{0.7} L_s^{0.5}$$

$$hG_a = 1.44 G_s^{0.7} L_s^{0.07}$$

Donde:

$$hL_a = \text{Kcal/hr m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$hG_a = \text{Kcal/hr m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

En el trabajo realizado por Yoshida y Tanaka, que fué de operaciones de contacto aire - agua en una columna empacada, - se encontraron varias correlaciones, utilizando ellos diferentes tipos de anillos raschig de cerámica con diferentes dimensiones como: I/2, I y II/2 pulgadas (12.7, 25.4 y 38.1 mm)

La función de éste equipo fué expresada en los términos de los coeficientes totales de transferencia de calor y masa - en la altura total de la unidad de transferencia.

Los coeficientes de transferencia de calor gas-película y masa fueron proporcionales al gasto del gas y al gasto del líquido elevado a la potencia 0.2, mientras que el coeficiente de transferencia de calor del líquido película fué proporcional a la potencia 0.3 del gasto del líquido.

Estos investigadores utilizaron una columna que tenía - un diámetro de 10 pulgadas (25.4 cm) empacada con anillos raschig de cerámica con una altura empacada de 12.5 pulgadas (31.7 cm)

El gasto volumétrico G_s utilizado por ellos fué de 137 a 586 lb/hr pie² (660.53 - 2859.57 Kg/hr m²), y el gasto volumétrico L_s varió de 201 a 4160 lb/hr pie² (980.84 a 20299.96 Kg/hr m²).

Al graficar sus datos de hG_a vs. G_s encontraron que el gasto volumétrico les afectaba con una pendiente aproximada a la unidad.

Representando en una gráfica de coordenadas logarítmicas hG_a/G_s vs. L_s se dieron cuenta de que la pendiente tenía un valor de 0.2 Por lo tanto, hG_a a un valor dado de G aumenta - con el 0.2 de potencia de L_s .

Al graficar $hG_s/L_s^{0.2}$ vs. G_s en coordenadas logarítmicas, obtuvieron una línea representada por la ecuación:

$$hG_s = 0.117 G_s L_s^{0.2}$$

El valor de k_{ya} fué proporcional a G_s y a la potencia - 0.2 de L_s y su ecuación es:

$$k_{ya} = 0.45 G_s L_s^{0.2}$$

En las ecuaciones anteriores se tienen las siguientes unidades.

$$hG_s = \text{BTU/hr } ^\circ\text{F pie}^3$$

$$G_s = \text{lb/hr pie}^2$$

$$k_{ya} = \text{lb/hr } \Delta Y \text{ pie}^3$$

$$L_s = \text{lb/hr pie}^2$$

ΔY = gradiente de humedad

Los valores calculados de hL_a se graficaron contra L_s dandouna pendiente de 0.8 (coordenadas logarítmicas), dando así una ecuación:

$$hL_a = 8 L_s^{0.8}$$

en donde $hL_a = \text{BTU/hr } ^\circ\text{F pie}^3$

Las correlaciones anteriores se corrigen para unidades del sistema MKS dando:

$$hG_s = 0.159 G_s L_s^{0.2}$$

$$hL_a = 5.75 L_s^{0.8}$$

$$k_{ya} = 0.61 G_s L_s^{0.2}$$

donde:

$$hG_s = \text{Kcal/hr m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$hL_a = \text{Kcal/hr m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$k_{ya} = \text{kg/hr m}^3 \Delta Y$$

CAPITULO V

**" COMPARACION DE DATOS OBTENIDOS DE CORRELACIONES EXPERIMENTALES
Y DE CORRELACIONES BIBLIOGRAFICAS"**

Comparación de datos obtenidos de correlaciones experimentales y de correlaciones bibliográficas.

Con los datos obtenidos tanto en las correlaciones experimentales como en las correlaciones bibliográficas (Mc Adams y - Yeshida-Tanaka), se comparan las siguientes tablas y gráficas.

L'	L _B	G'	G _B	kya (experimental)	kya (Yoshida-T.)
0.0188	133	328.45	2119	969.37	3437.41
0.029	208	321.48	2074	1142.50	3679.18
0.040	283	314.50	2029	1270.25	3827.98
0.051	358	307.53	1984	1369.51	3923.27
0.061	433	300.55	1939	1448.51	3982.95
0.072	508	293.58	1894	1511.99	4016.82
0.082	583	286.60	1849	1562.93	4030.88
0.093	658	279.13	1804	1603.57	4029.13
0.104	733	272.65	1759	1635.29	4014.36
0.114	808	265.67	1714	1659.27	3988.62
0.125	883	258.70	1669	1676.40	3953.47
0.136	958	251.72	1624	1687.40	3910.11
0.146	1033	244.75	1579	1692.83	3859.89
0.157	1108	237.78	1534	1693.18	3802.45
0.167	1183	230.80	1489	1688.00	3739.57

L' = Flujo de agua (lt/min)

L_B = Flujo de agua (Kg/hr m²)

G' = Flujo de aire (lt/min)

G_B = Flujo de aire (Kg/hr m²)

kya = Kg/hr m³ΔH

L'	L _B	G'	36	hLa (exp.)	hLa (Mc. A.)	hLa (Y.-T.)
			G _B			
0.0188	133	328.45	2119	784.54	2728.57	287.57
0.029	208	321.48	2074	1949.61	3361.33	401.26
0.040	283	314.50	2029	3622.81	3861.04	526.13
0.051	358	307.53	1984	5781.39	4274.99	635.00
0.061	433	300.55	1939	8396.15	4626.60	739.36
0.072	508	293.58	1894	11442.91	4929.60	840.15
0.082	583	286.60	1849	14683.40	5192.83	937.99
0.093	658	279.13	1804	18685.72	5422.41	1033.35
0.104	733	272.65	1759	1635.29	5622.79	1126.55
0.114	808	265.67	1714	27233.91	5797.32	1287.86
0.125	883	258.70	1669	31906.30	5948.58	1307.48
0.136	958	251.72	1624	36793.86	6078.95	1395.59
0.146	1033	244.75	1579	41857.89	6189.16	1482.34
0.157	1108	237.78	1534	47059.13	6281.48	1567.83
0.167	1183	230.80	1489	52359.74	6356.72	1652.17

$$L' = \text{lt/min}$$

$$L_B = \text{Kg/hr m}^2$$

$$G' = \text{lt/min}$$

$$G_B = \text{Kg/hr m}^2$$

$$hLa = \text{Kg/hr m}^3 \Delta H$$

L'	L_B	G'	G_B	hG_a (exp.)	hG_a (W.C.A.)	hG_a (Y.-T.)
0.0188	133	328.45	2119	238.59	431.84	895.98
0.029	208	321.48	2074	281.14	438.93	958.99
0.040	283	314.50	2029	312.52	441.66	997.78
0.051	358	307.53	1984	336.89	441.99	1022.62
0.061	433	300.55	1939	356.29	440.70	1038.18
0.072	508	293.58	1894	371.88	438.47	1047.00
0.082	583	286.60	1849	384.39	435.33	1050.67
0.093	658	279.13	1804	394.34	431.52	1050.61
0.104	733	272.65	1759	402.12	427.17	1046.36
0.114	808	265.67	1714	407.29	422.37	1039.65
0.125	883	258.70	1669	412.18	417.15	1058.27
0.136	958	251.72	1624	414.87	411.59	1019.19
0.146	1033	244.75	1579	416.19	405.71	1006.00
0.157	1108	237.78	1534	416.27	399.54	991.13
0.167	1183	230.80	1489	415.18	393.09	974.74

 $L' = \text{lb/min}$
 $L_r = \text{Kg/hr m}^2$
 $G' = \text{lt/min}$
 $G_B = \text{Kg/hr m}^2$
 $hG_a = \text{Kcal/hr } ^\circ\text{C}$

0.1 0.01

0.2

0.5

1

2

(2)

(1)

(0.01/0.001) 0.01

CONFECCION DE LOS MATERIALES REQUISITOS PARA LA FABRICACION DE LOS PRODUCTOS DE LA INDUSTRIA QUIMICA (1)
(2) CONFECCION DE LOS MATERIALES REQUISITOS PARA LA FABRICACION DE LOS PRODUCTOS DE LA INDUSTRIA QUIMICA (2)

COMPARACION DE LOS DATOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE (1)
CON LOS COTENIDOS MEDIANTE LA CORRELACION DE Mc. ADAMS (2)

$L/C \text{ hL}_a$

4.0

2.0

23

25

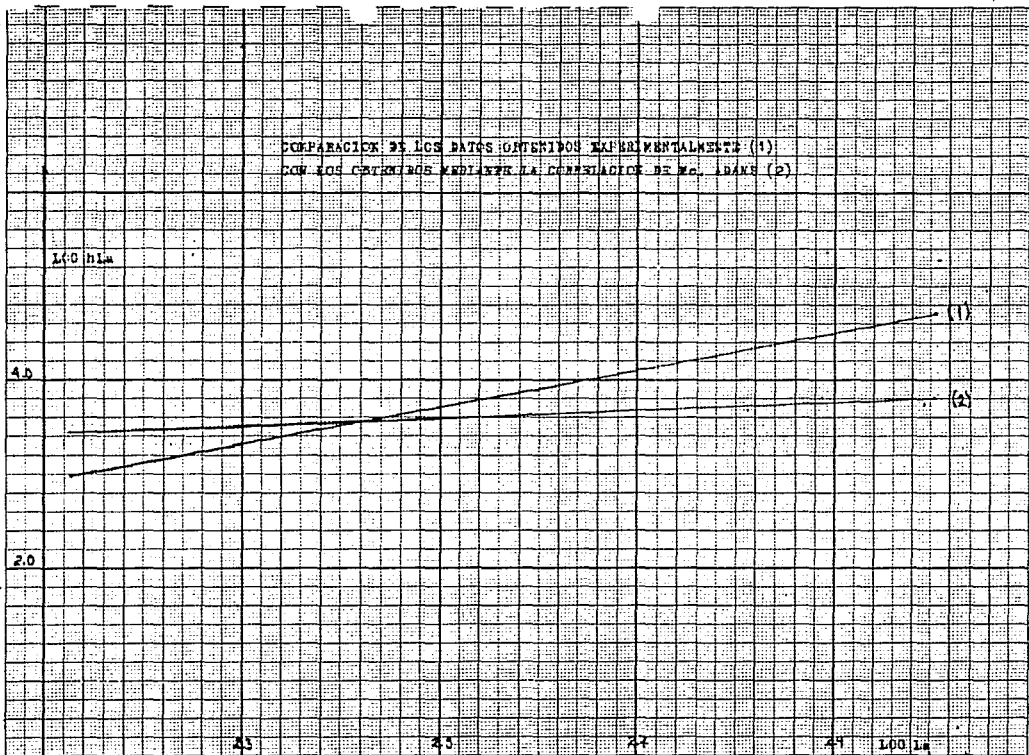
27

29

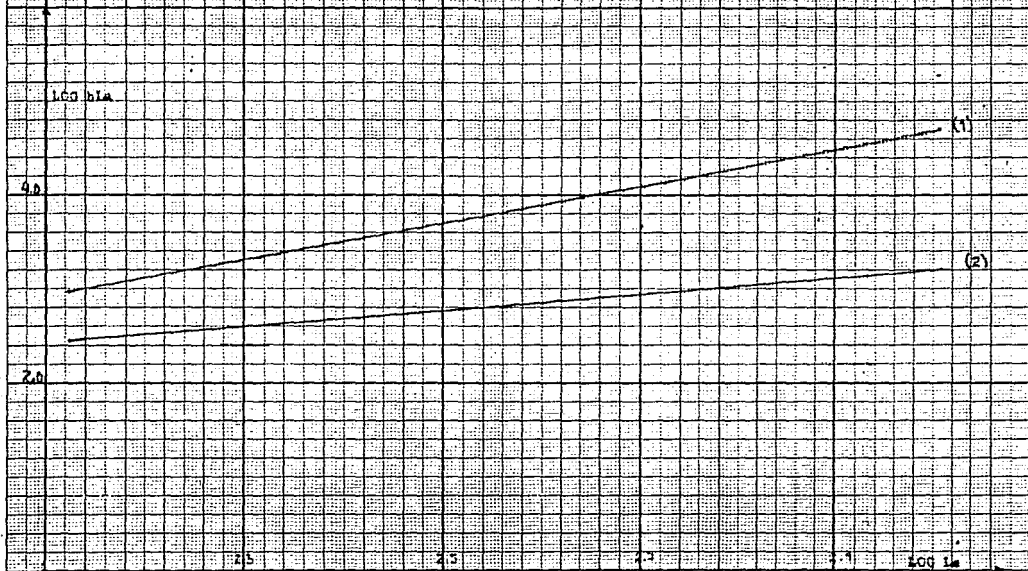
100 L_a

(1)

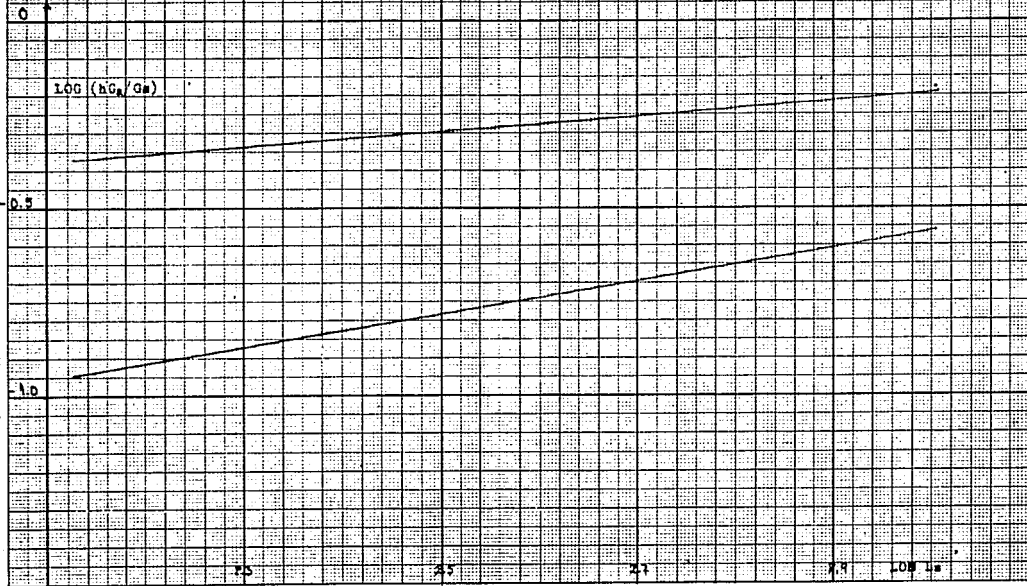
(2)



COMPARACION DE LOS DATOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE (1)
CON LOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA CORRELACION DE YOSHIDA - TANAKA (2)



COMPARACION DE LOS DATOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE (P) con
LOS OBTENIDOS MEDIANTE LA CORRELACION DE YOSHIDA - TANAKA (V)



Tomando como referencia los resultados reportados por los investigadores Mc. Adams y Yoshida-Tanaka, se procede a hacer un análisis y comparación de los datos y resultados obtenidos en el presente trabajo.

Autor	Correlación
Yoshida-Tanaka	$k_{yh} = 1.45 G_H L_H^{0.2}$
J.C. Aguilar	$k_{yh} = 0.56363 G_H L_H^{0.4048}$
Mc. Adams	$hLa = 1.11 G_B L_B^{0.5}$
Yoshida-Tanaka	$hLa = 5.77 L_B^{0.8}$
J.C. Aguilar	$hLa = 1.364 \times 10^{-4} G_B L_B^{1.7949}$
Mc Adams	$hGh = 1.44 G_H L_H^{0.07}$
Yoshida-Tanaka	$hGh = 0.159 G_H L_B^{0.2}$
J.C. Aguilar	$hGh = 0.0109 C_H L_H^{0.4046}$

$$k_{yh} = \text{Kg/hr m}^2 \Delta T$$

$$hLa = \text{Kcal/hr m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$hGh = \text{Kcal/hr m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$G_B = \text{Kcal/hr m}^2$$

$$L_B = \text{Kcal/hr m}^2$$

Los rangos de los gastos de aire y agua utilizados para determinar las correlaciones fueron los siguientes:

Correlación	kg/hr m ²	
Mc. Adams	1707.9	G _B 4379.8
	2439.9	L _B 12687.5
Yoshida-Tanaka	668.53	G _B 2859.57
	980.14	L _B 20299.96
J.C. Aguilar	1279.39	G _B 2037.7
	132.43	G _B 1236.04

Como puede observarse, existen diferencias en las ecuaciones antes mostradas y en los datos obtenidos a partir de las mismas ecuaciones (Tablas 344) y éstas diferencias se debieron a las razones siguientes:

I.- Dimensiones del equipo y altura del empaque.

Como se observa en el cuadro siguiente, existe una diferencia significativa con respecto a éstos parámetros.

Equipo	Diametro interno de la torre	altura del empaque (mm)
Mc. Adams	10.16 cm.	15.24, 22.86 y 30.48
Yoshida-Tanaka	25.4 cm	31.70
J.C. Aguilar	10.4 cm	100.00

2.- Tipo y dimensión del empuje

Equipo	Tipo de empuje	Dimensiones
Mc. Adams	Anillos ruschig de carbón	25.4 mm
Yoshida-Tanaka	Anillos ruschig de cerámica	12.7, 24.4 y 38.1 mm
J.C. Aguilar	Anillos ruschig de cerámica	12.57 mm

Es importante aclarar que las comparaciones que se realizaron entre las diferentes correlaciones, se llevaron a cabo en rangos de operación comunes de los tres experimentos.

RESULTADOS , CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

De acuerdo a las observaciones realizadas en el desarrollo de esta investigación, se reportarán en este capítulo, los resultados que se consideren mas relevantes para poder contar con los elementos suficientes que permitan emitir conclusiones y sugerencias adecuadas, que sirvan para el mejor desempeño de las prácticas realizadas en la torre humidificadora y enfriadora de aire.

Al llevarse a cabo el chequeo del funcionamiento de los instrumentos y del equipo en general, se encontraron las deficiencias que se muestran a continuación.

a) El termómetro que indicaba la temperatura del aire caliente a la entrada de la torre, no funcionaba correctamente, lo cual conducía a lecturas erróneas y a cálculos subsecuentes que se alejaban de la realidad.

Fué necesario reemplazar éste termómetro por otro que estuviera en buenas condiciones.

b) El medidor de flujo de gas instalado en la línea de alimentación de aire a la torre, tiene la limitante de manejar un flujo de aire muy reducido, debido a las características mecánicas de su funcionamiento. Este hecho no permitía obtener una relación de L_n/G_B adecuada para llevar a cabo con éxito la práctica correspondiente, por lo que fué necesario tomar medidas para ampliar el rango de flujo de aire manejado por el equipo.

Se instaló un by-pass en la línea de alimentación de

ntra a la torre para evitar el flujo del aire através del medidor mecánico cuando se necesita manejar un flujo de aire mayor a 80 LPM.

c) El rotámetro que tiene la función de medir el flujo de agua a la entrada de la torre, maneja flujos muy elevados, razón por la cual no se podía obtener una relación de L_{II}/G_B satisfactoria, aun cuando la alimentación de aire estuviese a su máxima capacidad.

Se cambió el flotador del rotámetro para obtener un flujo acorde a las necesidades de la práctica.

Aun con las modificaciones que se hicieron al equipo y que se mencionaron anteriormente, éste tiene limitaciones importantes que en seguida se mencionarán.

En primer término, no se cuenta con un elemento de suministro de aire adecuado en cuanto a capacidad, que permita experimentar en rangos de aire más amplios. Debido a ésta limitación, la torre debe operarse cuando el flujo de aire tenga un valor mínimo de 0.055 LPM, lo cual, algunas veces no es posible, debido a que el compresor que alimenta el aire a la torre humidificadora, también tiene que suministrar aire a otros equipos del laboratorio.

También tiene deficiencias en lo referente a la unidad de calentamiento utilizada para elevar la temperatura del aire que se alimenta a la torre.

Se tiene un cambiador de calor de serpiente que opera a una presión máxima de 2 Kg/cm², con lo cual no se puede calentar el aire a una temperatura mayor a 105 °C.

Otra de las limitaciones que tiene el equipo, es que

no se puede controlar la temperatura del agua a la entrada de la torre, la cual es alimentada por la línea general del laboratorio.

Por todo lo anteriormente expuesto y en base a los resultados experimentales obtenidos al determinar los coeficientes volumétricos de transferencia de masa y calor de la torre en estudio, se puede concluir que las condiciones óptimas de operación de la torre humidificadora instalada en el laboratorio de ingeniería química con las cuales se puede llevar a cabo con éxito la práctica de enfriamiento y humidificación de aire, se pueden alcanzar, respetando los rangos de flujo de aire y agua que se resumirán a continuación.

Rango de operación para el flujo de agua (L)

$$0.01875 \leq L \leq 0.175$$

Rango de operación para el flujo de aire (G)

$$319.03 \leq G \leq 327.55$$

L = litros de agua / min

G = litros de aire / min

Las ecuaciones matemáticas que describen el comportamiento de los coeficientes volumétricos de transferencia de masa y calor en función del gasto másico de aire y agua, son las siguientes:

$$k_{ya} = 0.0686 G^{0.5} L^{0.5}$$

$$hLa = 1.0449 \times 10^{-4} G_B L_B^{1.7149}$$

$$hGb = 0.0169 G_B L_B^{0.4046}$$

Donde:

$$ky_H = K_E / \text{hr m}^3 \Delta Y$$

$$hLa = K_{La} / \text{hr m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$hGb = K_{Gb} / \text{hr m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$L_H = K_L / \text{hr m}^2$$

$$G_B = K_G / \text{hr m}^2$$

La relación L_B/G_B permitida por el equipo, no debe excederse de 0.6 debido a que superando este valor, la torre empieza a operar anormalmente

Para el desarrollo de este trabajo, se utilizaron temperaturas del agua a la entrada de la torre en un rango que va de 18 a 19.5 $^\circ\text{C}$.

La humedad del aire a la entrada de la torre, utilizada en este trabajo experimental, fue variada en un rango de 0.0065 a 0.0125 Kg v.a./Kg a.a.

En mi opinión, deben implementarse algunas mejoras en el equipo para que la práctica correspondiente se lleve a cabo lo mejor posible y cumpla íntegramente con sus objetivos, para lo cual doy algunas sugerencias.

En lo que respecta al flujo de aire, es necesario contar con un elemento que suministre aire a la torre en un intervalo más amplio, debido a que con el actual suministro, se requiere utilizar flujos de agua muy bajos, lo cual no es

recomendable.

El elemento requerido debe manejar flujos de aire -
entre 190 y 600 lt/min

También debe implementarse un nuevo elemento de calen-
tamiento de aire, por que el que tiene es deficiente (el -
aire alcanza una temperatura máxima de 105°C).

Se podría utilizar un banco de resistencias que calen-
tura el aire en un rango de 80 a 200 °C.

B I B L I O G R A F I A

- 1.- Treybal Robert E. " Operaciones de transferencia de masa ", Mc Gray Hill 2^a edición. pag. 247-303
- 2.- Sawistowsky H. y Smith W. " Métodos de cálculo de los procesos de transferencia de materia" Editorial Alhambra 1^a edición. pag. 371-425
- 3.- Foust Alan S. , Menzel Leonard A. , Climen Curtis W., Maus Louis, Anderson L. Bryce. " Principios de operaciones unitarias" Editorial Continental, 2^a edición pag. 371-405
- 4.- Mc Cabe Warren L. y Smith Julian G. " Operaciones básicas de ingeniería química" editorial Reverte. vol. II pag. 705-732.
- 5.- Ludwig Ernest E. " Applied process design for chemical & petrochemical plants" Editorial Gulf Publishing Company, Houston Tex. vol II pag. 129-180
- 6.- Ocon García Joaquín y Tojo Barreiro Gabriel " Problemas de ingeniería química" Editorial Aguilar 3^a edición pag. 236-261
- 7.- Hernández Lerma Onésimo " Elementos de probabilidad y estadística" Fondo de Cultura Económica 1^a edición pag. 62-73 y 317-336

- 8.- Perry John H. "Chemical Engineers Handbook" Mc. Graw Hill. 6^a edición pag. 5-12.
- 9.- Mc Adams William H., Pohlman Jack B., St. John Robert C. "Transfer of Heat and mass between air and water in a packed tower" Chemical Engineering Progress. American Institute of Chemical Engineers. vol. 43, #4. pag. 241 (1943)
- 10.- Yoshida Foultake y Tomasa Tokuo "Air-water contact - operations in a packed tower" Engineering and process development. vol. 43, #4 pag. 241 (1943)

" A P E N D I C E "

Ecuaciones utilizadas para calcular la entalpia del aire saturado con vapor de agua.

$$H = (C_{p, \text{aire}} + C_{p, \text{v.a.}} \times Y) T + Y$$

H = entalpia de la mezcla (Kcal/Kg)

$$C_{p, \text{aire}} = 0.24 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C}$$

$$C_{p, \text{v.a.}} = 0.46 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C}$$

T = temperatura de la mezcla aire-vapor de agua ($^\circ\text{C}$)

calor latente de evaporación del agua a la temperatura de referencia.

$$597.2 \text{ Kcal/Kg}$$

Y = humedad del aire saturado a la temperatura dada (Kg v.a./Kg a.s)

$$Y = \frac{P_A}{P_t - P_A} \frac{M_A}{M_B}$$

P_t = presión atmosférica = 585 mm Hg

P_A = presión parcial del vapor de agua

M_A = masa molecular del vapor de agua (18 Kg/Kg mol)

M_B = masa molecular del aire (29 Kg/Kg mol)

Puesto que la mezcla está saturada, la presión parcial del agua es igual a la presión de vapor en el equilibrio.

Para calcular la presión de vapor del agua, se utilizó la siguiente ecuación:

$$\ln P \text{ (mm Hg)} = A - B/C+T$$

$$A = 18.3036$$

$$B = 3816.44$$

$$C = -46.13$$

$$T = ^\circ\text{K}$$

Datos de T vs. H de aire saturado con vapor de agua.

T	H
10	8.240
12	9.618
14	11.081
16	12.680
18	14.416
20	16.313
22	18.384
24	20.654
26	23.125
28	25.880
30	28.900
32	32.160
34	35.890
36	39.890

$P = 585 \text{ mm Hg}$

$T = ^\circ\text{C}$

$H = \text{Kcal/Kg}$

CURVA DE EQUILIBRIO H vs. T DEL SISTEMA

AIRE / AGUA

P = 585 mm Hg

30 H = Kg/H₂O

25

20

15

10

5

6

8

12

15

20

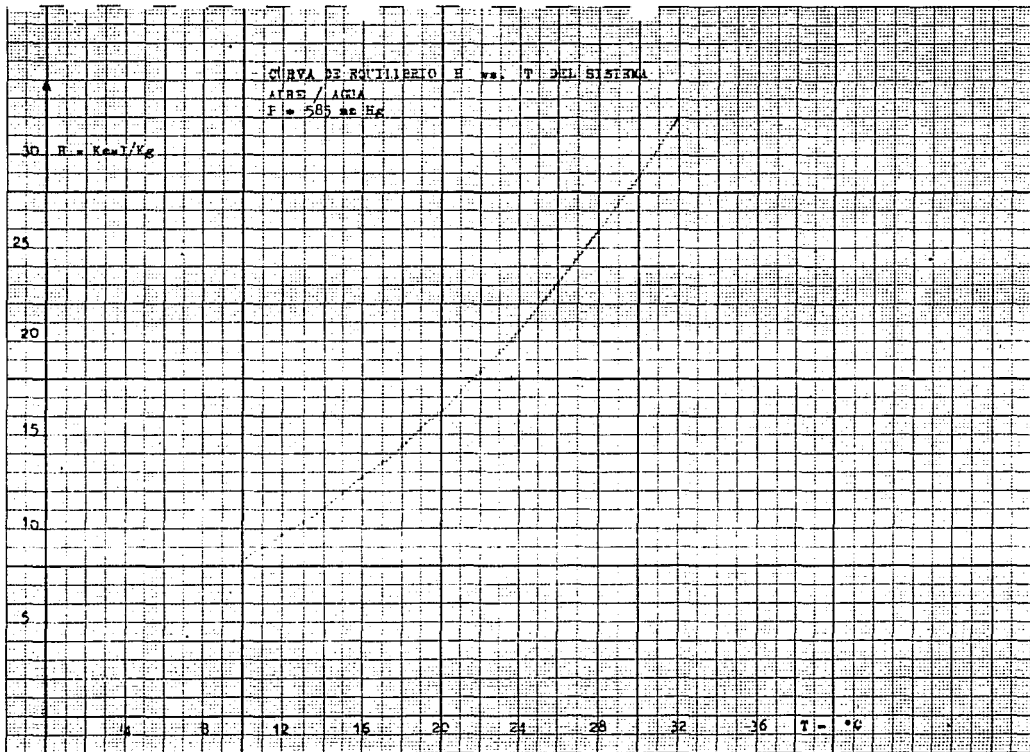
24

28

32

36

T = °C



Algoritmo de cálculo para determinar k_{ya} , hL_a , y hG_a en el equipo utilizado.

Para el cálculo de los coeficientes de transferencia de masa y de calor, se siguió el algoritmo que a continuación se presenta, conociendo de antemano las variables de operación mencionadas en la técnica experimental.

I.- Cálculo del flujo másico del aire a través de la torre conociendo el valor de la caída de presión generada por el medidor de orificio correspondiente, se procede a calcular el flujo másico del aire mediante la siguiente ecuación:

$$G = C A_o \sqrt{\frac{2g_c \rho \Delta P}{1 - (D_o/D_1)^4}}$$

Donde:

$$G = \text{kg/seg}$$

$$\Delta P = \text{kg/m}^2$$

$$g_c = 9.81 \text{ kgm/kg seg}^2$$

$$\rho = \text{densidad del aire kg/m}^3$$

$$D_o = \text{diametro del orificio (m)}$$

$$D_1 = \text{diametro del tubo (m)}$$

$$A_o = \text{area del orificio (m}^2\text{)}$$

$$C = \text{coeficiente de orificio del medidor}$$

$$A_o = \frac{3.1416 (D_o)^2}{4}$$

I-1 Cálculo del coeficiente de orificio del medidor.-

I.1.1.- Se supone un valor para C

I.1.2.- Se calcula el flujo de aire con el C supuesto

$$G = C A_o \sqrt{\frac{2 \rho C_p \Delta P}{1 - (D_o/D_I)^4}}$$

$$Q = G \times P$$

$$Q = m^3/kg$$

I.1.3.- Con el gasto de aire obtenido, se calcula la velocidad en el orificio.

$$V_o = Q / A_o$$

I.1.4.- Se calcula el número de Reynolds en el orificio.

$$Re_o = \frac{V_o D_o \rho}{\mu}$$

Donde:

V_o = Velocidad del aire en el orificio (m/s)

D_o = Diámetro del orificio (m)

μ = Viscosidad del aire (kg/m s)

ρ = Densidad del aire (kg/m³)

I.1.5.- Se calcula la relación de diámetros, r

$$r = D_o/D_I$$

I.1.6.- Con los valores de r y de Re_o , se chequea si el valor supuesto para C es el mismo al valor leído en la gráfica correspondiente. Si el valor leído y el valor su -

puesto no es el mismo, se repite la operación desde el primer -
 pase, hasta que el valor supuesto sea el mismo a el valor leído
 en la gráfica

I.1.7.- Corrección por posición de tema de presión.-

Para corregir el coeficiente debido a la posición de la -
 tema de presión, se divide la distancia de la tema de presión a -
 el orificio entre el diámetro de la tubería y el resultado se mul-
 tiplica por 100.

En la gráfica 5.16 del Perry, con los datos de relación de
 diámetros y la relación arriba mencionada, se lee el coeficiente
 corregido.

I.1.8.- Con el valor del coeficiente corregido, se calcu-
 la el flujo másico del aire

I.2.- Debido a que la lectura del ΔP se realiza en la -
 parte superior de la torre, el aire sale humidificado, por lo -
 tanto para conocer el flujo neto de aire, tenemos que restar la
 cantidad de agua que lleva el aire:

$$G_n = G (1 - Y_2)$$

Donde:

G_n = Flujo másico neto de aire (kg/m²s)

G = Flujo másico de la mezcla aire-agua de salida (kg/m²s)

Y_2 = Humedad del aire a la salida de la torre (kg aire/kg v.a)

2.- Cálculo de las entalpías del aire a la entrada y a la salida de la torre

2.1.- Entalpía del aire a la entrada de la torre.-

Esta en-

talpía se calcula mediante la ecuación que a continuación se presenta:

$$H_I = C_{HI} (t_I - t_0) + \lambda_0 Y_I$$

y

$$C_{HI} = C_{p \text{ aire}} + C_{p \text{ acu}} \cdot Y_I$$

Donde:

H_I = Entalpía del aire a la entrada de la torre (Kcal/Kg)

C_{HI} = Calor específico del humo húmedo (Kcal/Kg°C)

t_I = Temperatura de entrada del aire (°C)

$t_0 = 0^\circ \text{C}$ (temperatura de referencia)

λ_0 = Calor latente de evaporación a la temperatura de referencia

= 597.2 Kcal/Kg

Y_I = Humedad del aire a la entrada de la torre (Kg v.a./Kg a.s.)

Las humedades se obtienen de la carta de humedad construida a 585 mm Hg, utilizando los datos de bulbo húmedo y temperatura de bulbo seco, determinados experimentalmente.

2.2.- Entalpía del aire a la salida de la torre.-

Debido a

que existen pérdidas de calor en la torre, el cálculo de la entalpía del aire a la salida de la torre se realizó por medio del

calor absorbido por el agua:

$$H_2 = H_1 - \Delta H$$

$$\frac{L C_L}{G} = \frac{\Delta H}{\Delta T}$$

$$\Delta H = \frac{L C_L \Delta T}{G}$$

Donde:

ΔH = Entalpia transferida del aire a el agua (Kcal/Kg)

C_L = Capacidad calorífica del agua líquida (Kcal/Kg^oC)

ΔT = Incremento de temperatura del agua (°C)

L = Flujo másico del agua (Kg/hr)

G = Flujo másico del aire (Kg/hr)

3.- Cálculo de la temperatura de salida del aire

$$t_2 = \frac{H_2 - \lambda_0 Y_2}{C_{H_2}}$$

t_2 = Temperatura de salida del aire (°C)

H_2 = Entalpia de salida del aire (Kcal/Kg)

Y_2 = Humedad del aire a la salida de la torre (Kg/Kg u.s.)

C_{H_2} = Calor húmedo de la mezcla aire-agua a la salida de la torre (Kcal /Kg^oC)

$\lambda_0 = 597.2 \text{ Kcal/Kg}$.

4.- Cálculo de las pérdidas de calor.-

Se realiza el balance de calor con los datos obtenidos experimentalmente en la torre y se comparan con el balance de calor basado en el calor absorbido por el agua, pedamos obtener el calor perdido.

$$H_2^* = C_{H_2} (t_2 - t_0) + \lambda_0 Y_2$$

H_2^* = Entalpia del aire a la salida de la torre (Kcal/Kg)

C_{H_2} = Calor húmedo a la salida de la torre (Kcal/kg °C)

t_2 = Temperatura del aire a la salida de la torre (°C)

Y_2 = Humedad del aire a la salida de la torre (Kg v.a./Kg a.s)

Calor perdido:

$$Q_p = H_2 - H_2^*$$

5.- Determinación del valor de la pendiente de la línea de unión:

Teniendo los datos de entalpia del aire, H_1 y H_2 y temperaturas del agua, T_1 y T_2 , se determina la línea de operación graficando los puntos (H_1 , T_2) y (H_2 , T_1) en la gráfica de entalpia del aire - temperatura del agua.

Posteriormente se construye el wickley para obtener la pendiente que coincida con los datos de las temperaturas del aire a la entrada y salida de éste (t_1 y t_2)

Dicha pendiente ($-hLa/ky_a$) se determina haciendo diferentes tanteos para los valores de $-hLa/ky_a$ y construyendo el wickley hasta que se llegue a una pendiente tal que al construir la -

curva de entalpia del aire - vs. temperatura del aire, cruce -
por el punto (H_2 , t_1).

6.- Cálculo del número de unidades de transferencia.-

El número de unidades de transferencia (N_G), se calcula con la ecuación que se menciona a continuación, con cualquiera de los métodos que existen para tal efecto.

$$N_G = \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{H_1 - H}$$

7.- Cálculo de la altura de las unidades de transferencia.-

Para obtener la altura de las unidades de transferencia (H_G) se empleó la relación siguiente:

$$Z = N_G H_G$$

$$H_G = Z/N_G$$

donde:

Z = altura de la torre empacada (m)

8.- Cálculo del coeficiente volumétrico de transferencia de masa. ($k_y a$)

Para la determinación de este coeficiente, se utilizarán las relaciones:

$$H_G = G_y/k_y a$$

$$k_y a = G_y/H_G$$

Dando:

$$G_g = G/A_t$$

$$A_t = 3.1416 (D_t)^2 / 4$$

$$k_{ya} = \text{Kg/hr m}^3 \Delta H$$

$$G_g = \text{Flujo m\u00e1sico superficial del aire (Kg/hr m}^2)$$

$$G = \text{Flujo m\u00e1sico del aire (Kg/hr)}$$

$$A_t = \text{Area de la torre (m}^2)$$

$$D_t = \text{Di\u00e1metro de la torre (m)}$$

9.- C\u00e1lculo del coeficiente volum\u00e9trico de transferencia de calor (hLa).

Para la determinaci\u00f3n de este coeficiente, se utilizar\u00e1n las variables anteriormente calculadas:

$$-hLa/k_{ya} = \frac{m_i - m}{T_i - T}$$

$$hLa = m \cdot k_{ya}$$

m = pendiente de la l\u00ednea de uni\u00f3n

$$hLa = \text{Kcal/hr m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

10.- C\u00e1lculo del coeficiente volum\u00e9trico de transferencia de calor del aire (m\u00e1a)

Para \u00e9ste efecto, se utilizar\u00e1n las siguientes igualdades:

$$m\u00e1a/k_{ya} = \bar{C}_H$$

$$m\u00e1a = \bar{C}_H k_{ya}$$

$$\bar{C}_H = \frac{C_{H1} + C_{H2}}{2}$$

$$hG_a = \text{Kcal/hr m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\bar{C}_H = \text{Calor húmedo medio del aire-vapor de agua (Kcal/Kg } ^\circ\text{C)}$$

$$C_{H1} = \text{Calor húmedo del aire-vapor de agua a la entrada de la torre (Kcal/Kg } ^\circ\text{C)}$$

$$C_{H2} = \text{Calor húmedo del aire-vapor de agua a la salida de la torre (Kcal/Kg } ^\circ\text{C)}$$

Ilustración del cálculo numérico

Para ilustrar la secuencia de los cálculos, se utilizarán los datos recopilados en la corrida # 4 (Tablas 3.4.1 y 3.4.2)

I.- Cálculo del flujo másico del aire (G)

I.I.- Cálculo del coeficiente de orificio del medidor.-

Para -

esta corrida se obtuvo un coeficiente de presión en el orificio de 75 mm de nafta.

$$\Delta P = 75 \text{ mm nafta}$$

$$\rho_{\text{nafta}} = 0.7695 \text{ g/ml}$$

$$\Delta P = 75 \text{ mm nafta} \times 0.7695 \text{ g/ml} = 57.7125 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$\Delta P = 57.7125 \text{ KG/m}^2$$

$$D_o = 1.59 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$D_I = 2.66 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$(D_o/D_I)^4 = 0.12766$$

$$\rho_{\text{aire } 25.5 \text{ } ^\circ\text{C}} = 0.9118 \text{ KG/m}^3$$

$$2\delta_c = 19.62 \text{ KG m/ KG seg}^2$$

$$A_0 = \frac{1.1410 \times (1.59 \times 10^{-2})^2}{4} = 1.98550 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

I.I.1 Suponemos un coeficiente $C = 0.62$

I.I.2 Calculamos el flujo de aire con el C supuesto.

$$G = 0.62 \times 1.98550 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \times \sqrt{\frac{19.62 \text{ Kg} \cdot \text{m} \cdot 0.9118 \text{ Kg} \cdot 57.7125 \text{ Kg}}{\text{Kg} \cdot \text{seg}^2 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{m}^2}}$$

$$I = 0.12766$$

$$G = 4.2693 \times 10^{-3} \text{ Kg/seg}$$

$$Q = G \times V_p = 4.2693 \times 10^{-3} \text{ Kg/seg} \times (1/0.9118 \text{ Kg/seg})$$

$$Q = 4.6822768 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

I.I.3 Velocidad en el orificio:

$$V_0 = \frac{4.6822768 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{1.98550 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 23.5816 \text{ m/seg}$$

I.I.4 Número de Reynolds en el orificio

$$Re_0 = \frac{23.5816 \text{ m/seg} \times 1.59 \times 10^{-2} \text{ m} \times 0.9118 \text{ Kg/m}^3}{1.8 \times 10^{-5} \text{ Kg/m seg}}$$

$$Re_0 = 18993.171$$

I.I.5 Relación de diámetros (D_0/D_1)

$$D_0/D_1 = \frac{1.59 \times 10^{-2} \text{ m}}{2.66 \times 10^{-2} \text{ m}} = 0.5979$$

I.I.6 Con el Re_0 y con D_0/D_1 se checa el valor del coeficiente en la gráfica correspondiente y observamos que $C = 0.62$ es el valor correcto

I.1.7 Corrección por posición se toma de presión

$$r = \frac{2.66 \times 10^{-2} \text{ m}}{2.66 \times 10^{-2} \text{ m}} \times 100 = 100\%$$

y con los datos anteriores: $C = 0.637$

I.1.8 Cálculo del flujo másico del aire con el coeficiente corregido:

$$G = 0.637 \times 1.98950 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \times \sqrt{19.62 \text{ KG m/KG seg}^2 \times 0.9118 \text{ KG} \times 57.71 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}}$$

$$I = 0.12766$$

$$G = 4.3512 \times 10^{-3} \text{ KG/seg}$$

$$G = 15.6645 \text{ KG/hr}$$

I.1.9 Flujo másico neto de aire (G_N)

$$G_N = G \times (1 - Y_2)$$

$$Y_2 = 0.019 \text{ KG agua/KG aire seco}$$

$$G_N = 15.6645 \text{ KG/hr} \times (1 - 0.019)$$

$$G_N = 15.37 \text{ KG/hr}$$

2.- Cálculo de las entalpías del aire;

$$\text{temperatura de bulbo seco de entrada} = 19^\circ \text{C}$$

$$\text{temperatura de bulbo húmedo de entrada} = 11.5^\circ \text{C}$$

$$\text{temperatura de entrada del aire} = 97.5^\circ \text{C}$$

$$\text{temperatura de bulbo seco a la salida} = 25.5^\circ \text{C}$$

$$\text{temperatura de bulbo húmedo a la salida} = 21.8^\circ \text{C}$$

$$H_1 = (0.24 + 0.46 \times 0.0125) 97.5 + 597.5 \times 0.0125$$

$$H_1 = 31.42 \text{ Kcal/KG}$$

2.2 Entalpia del aire a la salida (H_2)

$$\Delta H = \frac{L \times C_p \times \Delta T}{G}$$

G

$$L = 2.7 \text{ Kg/hr}$$

$$C_p = 1 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$G = 15.37 \text{ Kg/hr}$$

$$\Delta H = \frac{2.7 \text{ Kg/hr} \times 1 \text{ Kcal/hr } ^\circ\text{C} \times 10 \text{ } ^\circ\text{C}}{15.37 \text{ Kg/hr}}$$

$$15.37 \text{ Kg/hr}$$

$$\Delta H = 1.7566 \text{ Kcal/Kg}$$

$$H_2 = H_1 - \Delta H = 31.42 - 1.7566 = 29.6633 \text{ Kcal/Kg}$$

3.- Temperatura de salida del aire (t_2)

$$t_2 = \frac{H_2 - \lambda_{a2}}{C_{H_2}}$$

$$t_2 = \frac{29.6633 - 597.2 \times 0.019}{0.24 + 0.46 \times 0.019} = 73.63$$

4.- Pérdidas de calor (Q_p)

$$H_2' = (0.24 + 0.46 \times 0.019) 25.0 + 597.2 \times 0.019$$

$$H_2' = 17.68 \text{ Kcal/Kg}$$

$$Q_p = H_2 - H_2' = 29.6633 - 17.68 = 11.9736 \text{ Kcal/Kg}$$

5.- Puntos en la línea de unión ($-H_2/Kg$)

Graficando los puntos (H_1, T_1) y (H_2, T_1) y reali-

zando el Wickley obtenemos que $-hL_a/k_y a = 2.9$, como se muestra en la gráfica #

6.- Número de unidades de transferencia (N_G)

Para éste efecto se utilizó el método de integración numérica, utilizando los datos de la gráfica # A-1

H	H_1	$I/H-H_1$	$(I/H-H_1)_m$	H	$H \times (I/H-H_1)_m$
31.42	29.3	0.471698	0.3873642	0.22	0.0852201
31.2	27.9	0.303030	0.273466	0.2	0.0546932
31	26.9	0.24390	0.20523	0.2	0.0410570
30.6	24.8	0.166666	0.165297	0.2	0.0330594
30.6	24.5	0.163934	0.156594	0.2	0.031320
30.4	23.7	0.149254	0.140465	0.2	0.0280833
30.2	22.6	0.131568	0.125513	0.2	0.0250622
30	21.6	0.119047	0.113257	0.2	0.0226574
29.8	20.5	0.107520	0.103465	0.14	0.0144851
29.66	19.6	0.099494	-----	--	-----

$$N_G = 0.335640$$

7.- altura de las unidades de transferencia (H_G)

$$H_G = Z/N_G = 1/0.33564 = 2.9794$$

8.- Coeficiente volumétrico de transferencia de masa ($k_y a$)

$$k_y a = G_g/H_G$$

$$G_S = G/A = 15.36/3.1416 \times \frac{63}{4} \times (10.5 \times 10^{-2})^2$$

$$G_S = 1809.28 \text{ Kg/hr m}^2$$

$$k_{ya} = 1809.28 / 2.9794 = 607.2632 \text{ Kg/hr m}^3 \Delta t$$

9.- Coeficiente volumétrico de transferencia de calor (hLa)

$$hLa = m \times k_{ya} = 2.9 \times 607.2632 = 1761.063 \text{ Kcal/hr m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

10.- Coeficiente volumétrico de transferencia de calor del aire (hGa).

$$hGa = \bar{G}_H \times k_{ya}$$

$$G_{H1} = 0.24 + 0.46 \times 0.0125$$

$$G_{H2} = 0.24 + 0.46 \times 0.019$$

$$\bar{G}_H = \frac{0.24575 + 0.2487}{2} = 0.2472$$

$$hGa = 0.2472 \times 607.2632 = 150.1135 \text{ Kcal/m}^3 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

PROBLEMA REALIZADO CON LOS DATOS DE LA CORRIENTE A

$h(x_{0.1}/K_g)$

70

65

60

55

50

45

40

35

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

T ($^{\circ}C$)

$L = 2.7 \text{ Kg/hr}$
 $Q = 15.37 \text{ Kg/hr}$
 $R_1 = 30.42 \text{ kcal/Kg}$
 $R_2 = 29.66 \text{ kcal/Kg}$
 $T_1 = 19.5 \text{ }^{\circ}C$
 $T_2 = 29.5 \text{ }^{\circ}C$

$L/Q = 0.1757$

$-hL_0/k_1A = 2.9$

BR-7.12 A-7