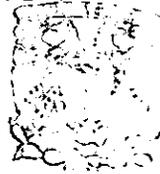


162



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



**EXAMENES PROFESIONALES
FACULTAD DE QUIMICA**

**IMPLEMENTACION DE UNA HOJA DE
CALCULO EN UNA OPERACION DE
UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO**

**TRABAJO ESCRITO VIA CURSOS
DE EDUCACION CONTINUA
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A :
SERGIO VAZQUEZ RIVERA**



MEXICO, D. F.

281498

2000



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: DRA. SARA ELVIA MEZA GALINDO.

VOCAL: I.Q. JOSÉ LUIS SÁNCHEZ LÓPEZ.

SECRETARIO: I.Q. RAMIRO DOMÍNGUEZ DANACHE.

1er. SUPLENTE: I.Q. MAYO MARTÍNEZ KHAN.

2do. SUPLENTE: LIC. MARIO MUÑOZ BAGNIS.

TESIS DESARROLLADA EN:

FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM:

- LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA
- FUNDACIÓN ROBERTO MEDELLÍN, S.C.

ASESOR:

I.Q. JOSÉ LUIS SÁNCHEZ LÓPEZ



Handwritten signature of José Luis Sánchez López, written in black ink over a horizontal line.

SUSTENTANTE:

SERGIO VÁZQUEZ RIVERA



Handwritten signature of Sergio Vázquez Rivera, written in black ink over a horizontal line.

DEDICADA A:

A mis padres
Isabel y Gervacio

A mis hermanos
Lourdes, Rubén, Gervacio
Javier, Constantino y Lidia

A mi esposa
Legna

A mis hijos
Legna Denisse y
Sergio Rodrigo

AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas que me han ayudado. Aquí sólo menciono a algunas de ellas, pero quisiera expresar mi agradecimiento a todos con quienes he trabajado.

A la Dra. Sara Elvia Meza Galindo

Al I.Q. José Luis Sánchez López

Al I.Q. Ramiro Domínguez Danache

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES HISTÓRICOS	2
TORRES DE ENFRIAMIENTO DE AGUA	3
CONCEPTOS Y ECUACIONES BÁSICAS	4
EL AGUA	4
PROPIEDADES DEL AGUA	4
EL AIRE	5
MEZCLA DE AIRE SATURADO	5
MEZCLA DE AIRE NO SATURADO	8
BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA	10
BALANCE TOTAL DE MATERIA	11
BALANCE TOTAL DE ENERGÍA	11
LÍNEA DE OPERACIÓN DEL AIRE	11
EVALUACIÓN EXPERIMENTAL	13
OBJETIVOS	13
PROCESO DE LA EXPERIMENTACIÓN	13
DIAGNÓSTICO DE LA TORRE	14
EQUIPO DE ENFRIAMIENTO DE AGUA	14
FILOSOFÍA DE OPERACIÓN	16
CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS Y TANQUE	19
TÉCNICA OPERACIONAL	20
SELECCIÓN Y DISEÑO DEL EXPERIMENTO	22
RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN	23
DESARROLLO DE LA HOJA DE CÁLCULO	25
HOJA ELECTRÓNICA DE CÁLCULO	25
GRÁFICOS	26
BASE DE DATOS	26
CARACTERÍSTICAS DE LA APLICACIÓN	26
IMPLEMENTACIÓN DE LA HOJA DE CÁLCULO	26
APLICACIÓN DE LA HOJA DE CÁLCULO	28
CONCLUSIONES	29
BIBLIOGRAFÍA	31
GLOSARIO	32
ANEXOS	33

INTRODUCCIÓN

El plan de estudios, de la carrera de Ingeniería Química de esta Facultad, siempre ha incluido en sus cursos teóricos y prácticos, temas relacionados o directos con los sistemas de enfriamiento aire-agua y por consiguiente el de torres de enfriamiento.

En el Laboratorio de Ingeniería Química existe una torre de enfriamiento de agua de tiro forzado y flujos a contracorriente, este equipo es marca Hilton y de procedencia inglesa. El equipo se utiliza en la docencia para la observación directa de los fenómenos de transferencia de masa y calor y para aprender la operación del mismo, lo que ayudará a los futuros ingenieros químicos cuando tengan la oportunidad de estudiarlos en otras áreas.

El problema principal de la torre, es que el equipo no estaba preparado para operar en las condiciones del Distrito Federal sino, al nivel del mar y todo el trabajo de cálculo y graficación se ejecuta manualmente.

La presente tesis tiene como objetos de estudios, realizar una serie de experimentos para determinar las condiciones de operación actuales de la torre y utilizar las nuevas técnicas de cómputo, para implementar una hoja de cálculo electrónica, que automatizara la ejecución de los cálculos y la obtención de las gráficas.

1... ANTECEDENTES HISTÓRICOS

El inicio de los procesos de enfriamiento de agua se cuentan entre los más antiguos que haya desarrollado el hombre. Sin embargo, su desarrollo teórico comienza en la década de los 20's, como se describe a continuación.

En 1922, Robinson y Lewis desarrollaron las ecuaciones básicas para la cuantificación de los coeficientes de transferencia de masa y de calor.

En 1923, Walker, Mollier y McAdams consideraron el enfriamiento como una operación independiente.

En 1925, Merkel, basado en los trabajos de Lewis y Mollier, desarrolló su teoría. Su análisis se basó en considerar a la diferencia de entalpías como la fuerza impulsora del enfriamiento.

En 1941, Nottage desarrolla un tratamiento muy elaborado del trabajo original de Merkel.

En 1944, Lichtenstein simplifica el trabajo de Nottage, las principales simplificaciones que realizó fueron: que el flujo de agua es constante a través de la torre. Este error es despreciable en algunas aplicaciones de enfriamiento, excepto cuando el rango, de enfriamiento, es grande. Que la mezcla de salida estaba saturada a la temperatura de bulbo húmedo y que las gotas de agua estaban rodeadas por una película de aire saturada a la temperatura del agua.

En 1946, Simpson y Sherwood hacen una revisión crítica al método de Merkel, de excelente claridad y fuerza deductiva.

En 1949, Mickley reconoce el merito de la teoría de Merkel diciendo que era la aproximación más conveniente para determinar el tamaño de los equipos, en los sistemas de contacto directo. El mismo Mickley realizó un importante avance en el desarrollo de la teoría, al combinar los coeficientes individuales de transferencia con el coeficiente de transferencia total, basado en las diferencias de entalpías.

2... TORRES DE ENFRIAMIENTO DE AGUA

Las torres de enfriamiento son básicamente, cambiadores de calor por contacto directo. El contacto íntimo entre los dos fluidos en este caso, agua-aire, permite lograr coeficientes de transferencia mayores que en los equipos convencionales. Este tipo de transferencia es esencial para la industria de proceso en general, lo que se destaca por el hecho de que en algunos casos los cambiadores de calor llegan a requerir más de la tercera parte de la inversión total en equipo.

Las torres industriales manejan grandes volúmenes de agua, desde 200,000 hasta 900,000 litros por minuto de agua. Las plantas industriales destinan generalmente el agua a tres importantes actividades: 60 por ciento para enfriamiento; 30 por ciento para generación de vapor y procesos; y el 10 por ciento restante en otros servicios generales.

Las torres de enfriamiento se utilizan para disminuir la temperatura del agua proveniente, ya sea de una unidad generadora de potencia o de una serie de procesos. El agua fría se recicla como medio refrigerante.

Las torres se construyen de madera tratada, asbesto, cemento o metal. En su interior se colocan empaques de madera, PVC, aluminio o aleaciones.

El agua se introduce por el domo de la torre. El aire es forzado a entrar por medio de un ventilador instalado en la base del equipo. Las torres también incluyen eliminadores de niebla para atrapar las gotas de agua que fluyen con la corriente de aire.

Las torres se clasifican en diferentes tipos. Si la clasificación atiende a la dirección de los flujos, las torres pueden ser de flujos cruzados o de flujos a contracorriente. Si por el contrario, la clasificación se basa en la forma en que se alimenta la corriente de aire y en la ubicación de los ventiladores, las torres pueden ser de tiro natural o de tiro mecánico: inducido o forzado.

3... CONCEPTO Y ECUACIONES BÁSICAS

EL AGUA

El agua siempre ha atraído la atención de los hombres; su abundancia (mar, ríos, lluvia); sus cualidades únicas (estados sólido, líquido y vapor). Sin embargo, para que el agua cumpla su función vital, es necesario mantener complejos y delicados equilibrios físico-químicos y biológicos. El ser humano dispone de una cantidad limitada de este imprescindible elemento, poco más de 14 mil kilómetros cúbicos, de un total de 435 mil kilómetros cúbicos. Esta pequeña cantidad constituye los flujos estables posibles de ser aprovechados. La enorme dependencia, de esta fracción minúscula de agua, no ha impedido el desperdicio, mal uso y la falta de previsión para cuidar, proteger y utilizar este recurso. Las torres de enfriamiento manejadas dentro del rango de su operación normal ahorran agua.

Las propiedades del agua y de la mezcla aire-vapor, aquí propuestas, son las utilizadas en la implementación de la hoja electrónica de cálculo, objeto de esta tesis.

PROPIEDADES DEL AGUA

Las propiedades del agua siguientes pueden calcularse en función de la temperatura.

La densidad del agua, Kg/m³

$$\rho_L = 1000.074 + 3.011945 \cdot 10^{-2}(T) - 6.444777 \cdot 10^{-3}(T^2) + 2.072901 \cdot 10^{-5}(T^3) \dots\dots\dots(1)$$

El calor latente de vaporización, Kcal/Kg

$$\lambda_o = -0.5831344292(T^2) + 597.8640454624 \dots\dots\dots(2)$$

La capacidad térmica específica del agua, Kcal/Kg °K

$$C_{pL} = 0.9977727 + 7.208246 \cdot 10^{-7}(T) + 2.948238 \cdot 10^{-8}(T^2) + 1.796168 \cdot 10^{-9}(T^3) \dots(3)$$

La capacidad térmica específica del vapor, Kcal/Kg °K

$$C_{pV} = 7.701 + 4.595 \cdot 10^{-4}(T) + 2.521 \cdot 10^{-6}(T^2) - 0.859 \cdot 10^{-9}(T^3) \dots\dots\dots(4)$$

EL AIRE

La composición del aire seco al nivel del mar es de 78 % en volumen de nitrógeno, 20.95 % de oxígeno, 0.96 % de argón y dióxido de carbono y 0.09 otros gases como son: neón, helio, metano, kriptón, óxido nitroso, hidrógeno, xenón, ozono, amoniaco, monóxido de carbono, yodo, dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre.

El vapor acuoso es el componente regular del aire húmedo. La base normal, para realizar los cálculos de ingeniería química, es considerar el aire como seco, a partir de esto el aire admitirá cantidades variables de vapor, hasta llegar a la máxima proporción de vapor asociado, denominada el grado de saturación del aire, la que dependerá de la temperatura del aire. La cantidad de vapor contenida en el aire, en distintos momentos y en diferentes circunstancias (la humedad absoluta), rara vez alcanza los límites extremos del grado de saturación o del grado de sequedad total.

La determinación de las propiedades psicrométricas del aire y la comprensión de la operación de humidificación necesitan del conocimiento y la aplicación de la condición de equilibrio.

En las operaciones de humidificación el número de fases son dos, fase líquida y fase gaseosa. El número de componentes son dos, el agua y el aire¹. Si se especifican la presión y la temperatura, entonces la otra propiedad intensiva del aire queda determinada automáticamente.

MEZCLA DE AIRE SATURADO

Teóricamente, si en una torre ideal, durante un tiempo infinito, el aire seco estuviera en contacto con suficiente agua, el aire se saturaría.

En esta condición final, la presión de vapor del agua es igual a la presión parcial del vapor acuoso, a la temperatura del sistema. De acuerdo con lo anterior y suponiendo que el aire se comporta como una mezcla de gases ideales, la composición molar del vapor en el aire saturado y_s , es:

$$y_s = P^{\circ}_{H_2O} / P_T \dots \dots \dots (5)$$

¹ Aunque el aire es una mezcla de varios gases, es decir varios componentes, para fines prácticos se le considera como un solo componente.

En donde:

P_T = presión total

$P^{\circ}_{H_2O}$ = presión de vapor del agua.

Las funciones siguientes son otras formas de expresar la concentración.

HUMEDAD MOLAR DE SATURACIÓN

Es la máxima humedad del aire en moles de vapor entre moles de aires seco. Se define como sigue:

$$Y_m = y_s / (1 - y_s) \dots\dots\dots(6)$$

Sustituyendo la ecuación (5) en la ecuación (6), tenemos:

$$Y_m = P^{\circ}_{H_2O} / (P_T - P^{\circ}_{H_2O}) \dots\dots\dots(7)$$

HUMEDAD ABSOLUTA DE SATURACIÓN

La humedad absoluta de saturación es la humedad de saturación referida a unidades de masa (masa de vapor de agua / masa de aire seco), se define como:

$$Y_s = Y_m (PM_{H_2O} / PM_{AIRE}) \dots\dots\dots(8)$$

En donde:

PM_{H_2O} = peso molecular² del agua

PM_{AIRE} = peso molecular del aire

Sustituyendo la ecuación (7) en la ecuación (8), da:

$$Y_s = [P^{\circ}_{H_2O} / (P_T - P^{\circ}_{H_2O})] (PM_{H_2O} / PM_{AIRE}) \dots\dots\dots(9)$$

TEMPERATURA DE BULBO SECO

Es la temperatura obtenida en el termómetro de bulbo seco.

TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO

La temperatura de bulbo húmedo es la temperatura límite de enfriamiento alcanzada por una pequeña cantidad de agua en contacto con una cantidad mayor de aire.

² Peso molecular o masa molar.

Las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo se miden con un aparato llamado psicrómetro. En el caso de la mezcla aire-vapor la ecuación siguiente es útil para determinar la presión parcial del vapor en el aire húmedo.

$$(P^{\circ}_{H_2O} - P_{H_2O}) = 0.5 (T_{BS} - T_{BH}) \dots\dots\dots(10)$$

En donde:

$P^{\circ}_{H_2O}$ = presión de vapor del agua

P_{H_2O} = presión parcial del vapor del agua, en el aire húmedo

T_{BS} = temperatura de bulbo seco

T_{BH} = temperatura de bulbo húmedo

TEMPERATURA DE ROCÍO

Es la lectura obtenida cuando el aire se satura es decir, el punto en el que la presión de vapor del agua es igual a la presión parcial del vapor en el aire. Una vez alcanzada esta temperatura, si el aire continua enfriándose a presión constante, empezará a condensar su vapor asociado.

ENTALPÍA ESPECÍFICA DEL AIRE SATURADO

La entalpía específica de saturación es la máxima entalpía del aire saturado y esta compuesta por el calor sensible del aire seco, el calor latente del agua a la temperatura T_o y el calor sensible del vapor.

No se conocen los valores absolutos de la entalpía de una sustancia. Sin embargo, fijando arbitrariamente en cero la entalpía de una sustancia cuando se encuentra en un estado de referencia, pueden calcularse los valores relativos de la entalpía en otras condiciones. Para el agua, es costumbre utilizar la entalpía de referencia a 0 °C. Para el aire seco la entalpía de referencia se selecciona a 0 °C y una atmósfera. Sobre las bases anteriores tenemos:

$$H_S = C_{PAIRE} (T_{BS} - T_o) + Y_S \lambda_0 + C_{PH_2O} Y_S (T_{BS} - T_o) \dots\dots\dots(11)$$

Agrupando términos:

$$H_S = (C_{PAIRE} + C_{PH_2O} Y_S) (T_{BS}) + \lambda_0 Y_S \dots\dots\dots(12)$$

En donde:

C_{PAIRE} = la capacidad térmica específica del aire

C_{PH_2O} = la capacidad térmica específica del vapor de agua

T_o = temperatura de referencia (0°C)

λ_o = el calor latente de vaporización del vapor a T_o

Otros términos utilizados para calcular o describir las propiedades psicrométricas del aire saturado son el volumen húmedo saturado y el calor húmedo saturado.

VOLUMEN HÚMEDO SATURADO

Se define como el máximo volumen específico ocupado por el aire saturado. Se compone del volumen del aire seco más el volumen del vapor asociado, a la temperatura y presión del aire.

$$V_{HS} = (1/ PM_{AIRE} + Y_S / PM_{H_2O}) RT_{BS} / P_T \dots\dots\dots(13)$$

En donde:

$$V_{HS} = m^3 \text{ de mezcla} / Kg_{\text{aire seco}}$$

$$R = \text{constante universal de los gases en } m^3 \text{ atm} / kg \text{ mol } ^\circ K$$

CALOR HÚMEDO SATURADO

Es la máxima capacidad térmica específica del aire, esta compuesto por la capacidad térmica específica del aire seco más la capacidad térmica específica del vapor asociado, por lo que:

$$C_{HS} = C_{PAIRE} + C_{PH_2O} Y_S \dots\dots\dots(14)$$

En donde:

$$C_{HS} = Kcal / Kg_{\text{aire seco}} \text{ } ^\circ C$$

MEZCLA DE AIRE NO SATURADO

Cuando la presión parcial de vapor es menor que la presión de vapor del agua, a la misma temperatura, entonces el aire no esta saturado y teóricamente puede seguir aceptando más vapor. A la humedad de un aire no saturado, referida a unidades de masa, se le conoce como humedad absoluta.

HUMEDAD ABSOLUTA

La humedad absoluta es la humedad referida a unidades de masa (masa de vapor de agua/masa de aire seco), se define como:

$$Y = [P_{H_2O} / (P_T - P_{H_2O})] (PM_{H_2O} / PM_{AIRE}) \dots\dots\dots(15)$$

ENTALPÍA ESPECÍFICA DEL AIRE NO SATURADO

La entalpía específica del aire no saturado esta compuesta por el calor sensible del aire seco, el calor latente del agua a la temperatura T_o y el calor sensible del vapor.

Eligiendo los dos estados de referencias utilizados en el desarrollo de la ecuación (12) y agrupando términos, tenemos:

$$H = (C_{PAIRE} + C_{PH_2O} Y) (T_{BS}) + \lambda_o Y \dots\dots\dots(16)$$

VOLUMEN HÚMEDO

Se define como el volumen ocupado por el aire seco más el volumen del vapor incorporado, a la temperatura y presión del aire. V_H en m^3 de mezcla/kg aire seco.

$$V_H = (1/ PM_{AIRE} + Y/ PM_{H_2O}) RT_{BS} / P_T \dots\dots\dots(17)$$

CALOR HÚMEDO

Esta compuesto por la capacidad térmica específica del aire seco más la capacidad térmica específica del vapor asociado. C_H en Kcal/Kg aire seco °C.

$$C_H = C_{PAIRE} + C_{PH_2O} Y \dots\dots\dots(18)$$

Otra forma de expresar la concentración del aire es la humedad relativa.

HUMEDAD RELATIVA POR CIENTO

La humedad relativa por ciento se define como:

$$Y_{R\%} = (y_{H_2O} / y_S)(100) = (P_{H_2O} / P^{\circ}_{H_2O}) (100) \dots\dots\dots(19)$$

4... BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA

Los cambios cuantitativos de calor y vapor cedidos por el agua al aire, son evaluados con los balances de materia y energía. El esquema que damos en la figura 1, resume una torre de enfriamiento de agua.

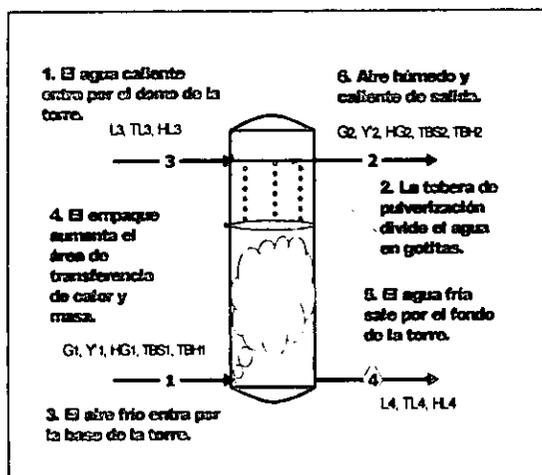


Figura 1. TORRE DE ENFRIAMIENTO DE AGUA

En donde:

L_3 y L_4 = Flujos de agua de entrada y salida, Kg/h.

TL_3 y TL_4 = Temperaturas del agua de entrada y salida, °C.

G_1 y G_2 = Gastos de aire de entrada y salida, Kg/h.

G_S = Gasto de aire seco, Kg/h.

Y_1 = Humedad absoluta del aire de entrada Kg agua / Kg aire seco.

Y_2 = Humedad absoluta del aire de salida, Kg agua / Kg aire seco.

HG_1 y HG_2 = Entalpías del aire de entrada y salida, Kcal / Kg

HL_3 y HL_4 = Entalpías del agua de entrada y salida, Kcal / Kg

TBS_1 y TBS_2 = Temperaturas de bulbo seco de entrada y salida del aire, °C.

TBH_1 y TBH_2 = Temperaturas de bulbo húmedo de entrada y salida del aire, °C.

BALANCE TOTAL DE MATERIA

Utilizando la figura 1 y suponiendo un estado estacionario, el balance total de materia es:

$L_3 + G_1 = L_4 + G_2$, agrupando términos, nos queda:

$$L_3 - L_4 = G_2 - G_1$$

Suponiendo que $G_1 = G_2 = G_S$, el total de vapor difundido del agua al aire es:

$L_3 + G_S Y_1 = L_4 + G_S Y_2$, agrupando términos, tenemos:

$$L_3 - L_4 = G_S(Y_2 - Y_1) \dots\dots\dots(20)$$

Consideraciones económicas de diseño generalmente especifican que la cantidad de vapor cedido al aire se encuentre entre 0.85% a 1.25% del agua circulando, por cada 10 grados de enfriamiento y que las pérdidas de agua por arrastre se encuentren dentro del rango de 0.1% a 0.3%. La ecuación 20, supone que la cantidad de vapor cedido al aire y la cantidad de agua arrastrada cumplen la especificación anterior es decir, que la torre está funcionando dentro del rango de su operación normal y por lo tanto no hay pérdidas adicionales de agua, que alteren el resultado previsto.

BALANCE DE TOTAL DE ENERGÍA

El balance de energía se realiza entre los límites mostrados en la figura 1, la cantidad total de calor cedida al aire, es:

$L_3HL_3 + G_SHG_1 = L_4HL_4 + G_SHG_2$, agrupando términos.

$$L_3HL_3 - L_4HL_4 = G_SHG_2 - G_SHG_1 = G_S(HG_2 - HG_1) \dots\dots\dots(21)$$

LÍNEA DE OPERACIÓN DEL AIRE.

En condiciones normales de operación, la cantidad de agua evaporada es pequeña entonces, L puede suponerse constante o en su lugar, podemos utilizar el valor promedio definido como $L_m = (L_3 + L_4)/2$.

Basado en lo anterior, el calor cedido por el agua se expresa como sigue:

$$L_m(HL_3 - HL_4) = L_m CP_L (TL_3 - TL_4)$$

El calor asimilado por el aire es:

$$G_S \Delta HG = G_S(HG_2 - HG_1)$$

Si igualamos las dos ecuaciones anteriores, el calor ganado por el aire es igual al calor cedido por el agua:

$$G_S(HG_2 - HG_1) = L_m C_{pL}(TL_4 - TL_3)$$

Otra forma de expresar la ecuación anterior, es:

$$L_m C_{pL} / G_S = (HG_2 - HG_1) / (TL_4 - TL_3) \dots\dots\dots(22)$$

La ecuación anterior se conoce como la línea de operación del aire y relaciona el cambio de entalpia del aire, con la temperatura del agua.

5... EVALUACIÓN EXPERIMENTAL

OBJETIVOS

La evaluación experimental realizada en el equipo, se enfocó a encontrar la operación normal del equipo. El objetivo principal nos permitió alcanzar otros objetivos particulares, como fueron: producir agua fría a la capacidad de diseño de la torre; diagnosticar y corregir las desviaciones de la operación normal; diseñar prácticas ajustadas a esa operación; simplificar la ecuación de transferencia de masa y calor; combinar práctica de laboratorio y computadora para obtener resultados más rápidos y precisos; ilustrar y guiar de forma interesante el trabajo realizado por los alumnos y ahorrar agua.

La torre se construyó para enfriar cierta cantidad de agua caliente. Esa producción puede realizarse al 100 % de la capacidad o a un porcentaje menor, dependiendo de las necesidades. Para que la torre produzca, a esas capacidades, es necesario que cumpla con algunas especificaciones definidas y fijas. A este conjunto de especificaciones —que sirven para operar adecuadamente el equipo— le llamamos operación normal del equipo. Dentro de las especificaciones mencionadas se encuentran los rangos válidos de las variables de operación y la técnica operacional.

PROCESO DE LA EXPERIMENTACIÓN

Las etapas seguidas durante la experimentación son: el diagnóstico de la torre de enfriamiento; la descripción del sistema de enfriamiento; la descripción de la filosofía de operación; la verificación del registro, de los instrumentos básicos; el diseño del experimento; la propuesta y la implantación de la técnica operacional y la operación del equipo.

DIAGNÓSTICO DE LA TORRE

La evaluación de la situación presentada por el equipo, nos proporcionó lo siguiente información:

Los datos proporcionados por el proveedor, indicaban un funcionamiento al nivel del mar (presión total = 760 mmHg). La operación actual del equipo se realiza a una presión total de 586 mmHg. El cambio en la presión nos obligó a realizar nuevos experimentos, para encontrar el valor de los nuevos datos.

El flujo de agua mínimo de operación, es una variable muy importante para el adecuado funcionamiento de la torre. Este flujo es el responsable de una simplificación práctica ($a=a_H=a_M$) de la ecuación general de diseño ($G_S dH_G = h_C a_H (T_r - T_G) dZ + \lambda_0 K_Y a_M (Y_r - Y) dZ$). La ecuación simplificada ($G_S dH_G = K_Y a (H_r - H_G) dZ$ o $L_m C_{pL} dT_L = K_Y a (T_L - T_i) dZ$), es la que posibilita el cálculo de las variables de diseño de la torre. Por lo tanto, la clave para el avance de la experimentación dependía de localizar dicho flujo. En las ecuaciones anteriores a_H y a_M son las áreas de transferencia de calor y materia, K_Y =coeficiente global de transferencia de materia, Z =altura empacada de la torre.

El flujo del agua de salida, es necesario para poder elaborar los balances de materia y energía. Basado en lo anterior, había que encontrar una forma para calcular ese flujo.

El registro exacto de las temperaturas, es fundamental para obtener datos y resultados confiables. Apoyados en lo anterior, se tenía que hacer una calibración de los termómetros bimetalicos instalados en el equipo.

EQUIPO DE ENFRIAMIENTO DE AGUA

La descripción de la torre de enfriamiento de agua es la siguiente:

Equipo:	Torre de enfriamiento de agua
Marca:	Hilton
Importada de:	Inglaterra
Clave:	TA-1

Función: Enfriamiento de agua
Proceso: Intermitente
Tiro: Forzado
El equipo trabaja a: Contracorriente
Material: Laminas de hierro recubiertas de esmalte y fibra de vidrio
Dimensión: Largo 30 cm. Ancho 30 cm. Altura 2.35 m

Empaque:

Función: Proporciona el área de transferencia de calor y masa
Tipo: De película
Forma: Mallas metálicas
Cantidad: 57
Agrupación: De tres en tres
Altura: 1.27 m
Área: 0.09 m²
Material: Aluminio esponjado y anodizado, (deployé)
Retención: 4 litros de agua (sin circulación de aire)

Equipo: Ventilador

Marca: Watkins & Watson
Clave: BA-1
Función: Alimenta el aire atmosférico a la torre
Tipo: Centrifugo, de una etapa.
Capacidad: 365 m³/h, a 18 °C
RPM: 3400
No. De aspas: 24
Velocidad máxima: 1.5 m/s
Material: Lámina de 1/8" de espesor

Equipo: Tanque de alimentación

Clave: FA-01
Función: Depósito del agua de alimentación

Capacidad: 5.18 litros

material: acero inoxidable

Equipo: Tanque recolector

Clave: FB-01

Función: Depósito del agua de salida

Material: Acero inoxidable

Capacidad: 4 kilogramos \approx 4 litros

Equipo: Calentador eléctrico

Clave: CC-1

Función: Calienta el agua que entra

Cantidad: Cuatro

Potencia: 2.5 KJ/s (2.5 Kw), cada uno

Medidores de flujo

Medidor: Manómetro diferencial

Clave: FI-01

Función: Mide el flujo del aire alimentado

Caudal: 0 - 470 m³/h (a 28 °C y $\rho = 1.15 \text{ Kg/m}^3$)

Medidor: Rotámetro

Clave: FI-02

Función: Mide el flujo del agua alimentada

Marca: GEC-Marconi Process Control Ltd-England

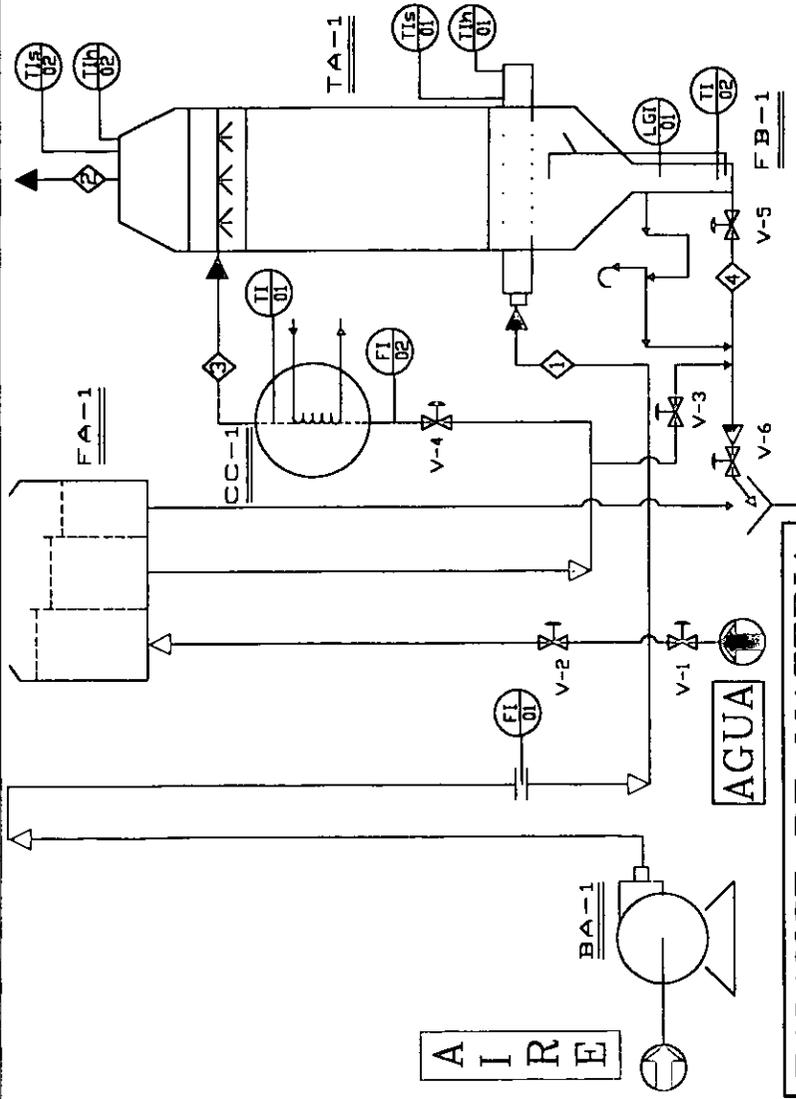
Caudal: 0.60 - 5.18 L/min

FILOSOFÍA DE OPERACIÓN

El agua caliente de entrada

El flujo de agua atraviesa las válvulas V_1 y V_2 y alimenta al tanque FA-1. El tanque FA-1 consta de tres depósitos. El primer depósito acumula el agua de entrada; el segundo, provee el agua para la torre y el tercero mantiene un nivel constante de agua entre los depósitos y permite el flujo controlado de agua. Del

CLAVE	DESCRIPCION
TA-1	TORRE DE ENFRIAMIENTO
BA-1	VENTILADOR CENTRIFUGO
FA-1	TANQUE DE ALIMENTACION
CC-1	CALENTADOR ELECTRICO
FB-1	TANQUE RECOLECTOR



BALANCE DE MATERIA				
DESCRIPCION	1	2	3	4
TEMPERATURA DE DILU. SEC. °C	28.0	39.0		
TEMPERATURA DE DILU. H2O. °C	25.5	36.5		
TEMPERATURA DEL AGUA. °C			42.0	30.0
HUMEDAD, kg/kg de seco	0.0251	0.0500		
AIRE, kg/h	146.20	146.20		
AGUA, kg/h			308.17	304.33
T O T A L	146.20	146.20	308.17	304.33

UNIVERSIDAD DE QUIMICA
LABORATORIO DE INGENIERIA QUIMICA
DIAGRAMA DE FLUJOS DE PROCESO
TORRE DE ENFRIAMIENTO DE AGUA
Elaborado por: SERGIO VAZQUEZ RIVERA
REVISOR: M. PÉREZ DEL ROSAL | DIB. NO. DPP-1

segundo depósito, el agua cae por gravedad. Una parte del agua se descarga al drenaje para retirar las burbujas de aire. Cuando el agua ya no tiene burbujas, se cierra la válvula V₃. El flujo de agua pasa por la válvula V₄ y llega al rotámetro FI-02, aquí es donde se mide el flujo del agua, en litros por minuto. Después del rotámetro, el agua atraviesa el calentador eléctrico CC-1, las resistencias del calentador calientan el agua. El termómetro bimetálico TI-01 ubicado en la salida del calentador registra la temperatura del líquido. El agua caliente llega a la barra pulverizadora que se encarga de distribuirla en forma de gotitas.

El aire de entrada

El aire atmosférico aspirado por el ventilador BA-1, entra por la base de la torre. Un manómetro diferencial FI-01 localizado en la tubería registra la cantidad del flujo del aire en metros cúbicos por hora. Los termómetros TIs-01 y TIh-01, localizados en la base de la torre, registran las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo del aire, respectivamente.

El aire y el agua dentro de la torre

El agua cae por gravedad del domo hacia la base, mientras que el aire sube desde la base hacia la parte superior. Los puntos fundamentales de contacto entre el agua que cae y el aire que sube, son los empaques.

Salida del agua fría

El agua fría sale de la torre y se acumula en el tanque FB-01. La salida del agua se controla abriendo o cerrando la válvula V₅. El agua fría se descarga al drenaje cuando se abren las válvulas V₅ y V₆.

Salida del aire

El aire caliente y saturado sale por el domo de la torre. En el domo de la torre se ubican unas mallas, la función de esas mallas es disminuir el arrastre de agua en forma

de gotitas. Las temperaturas del aire de salida se obtienen en los termómetros Tis-02 y Tih-02, respectivamente.

CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS Y TANQUE

En la obtención de datos a menudo se presentan algunos errores, particularmente como resultado de lecturas incorrectas, uso inapropiado del dispositivo de medida o errores en los mismos dispositivos. La selección de este trabajo se originó en la necesidad de obtener medidas confiables de los instrumentos.

Termómetros bimetalicos

Los termómetros bimetalicos son utilizados para registrar las temperaturas del agua que entra y sale de la torre. Las temperaturas obtenidas en los termómetros bimetalicos se cotejaron con las temperaturas obtenidas en termómetros de mercurio.

El procedimiento utilizado para obtener las temperaturas fue el siguiente: se colocó agua destilada en un vaso de precipitado y se calentó en una parrilla eléctrica, luego se colocaron el par de termómetros y se agitó hasta obtener temperaturas constantes, finalmente se registraron las temperaturas.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes: la temperatura del agua que entra es igual a la temperatura leída en el termómetro bimetalico más cuatro grados centígrados. La temperatura del agua que sale es igual a la temperatura leída en el termómetro bimetalico menos un grado centígrado.

Tanque recolector del agua de salida.

El tanque colector del agua que sale, es un equipo experimental esencial para realizar la práctica de balance de materia y energía.

Calibración.

El procedimiento consistió en lo siguiente: el tanque colector se llenó con agua, arriba del punto de calibración. Una parte de agua se retiró para tomarle la temperatura. El nivel del agua se ajustó en el punto de calibración y se recogió en una cubeta para medirle su volumen con probetas. Con la temperatura del agua y una función se

determinó la densidad, la cual resultó ser de aproximadamente 1 Kg/dm^3 . La masa del agua se calculó con la fórmula de la densidad.

Los resultados obtenidos confirmaron la calibración del tanque en 4 kilogramos de agua, en el punto de calibración.

TÉCNICA OPERACIONAL

Este trabajo se originó con la finalidad de disminuir el error experimental, causado por una operación heterogénea de la torre. La técnica de operación propuesta es la siguiente:

Arranque

- a) Coloque los interruptores, del calentador y motor del ventilador, en la posición de apagado (off). Si no están así, colóquelos en dicha posición.
- b) Abra las válvulas V_3 , V_5 y V_6 .
- c) Cierre la válvula V_7 . La válvula controla el flujo del aire, hacia el cañón psicrométrico.
- d) Ajuste las mechas de los termómetros de bulbo húmedo y psicrómetro. Coloque los termómetros de bulbo húmedo dentro de sus depósitos. La mecha debe ubicarse en el centro de la ventana del depósito.
- e) Llene el depósito del termómetro de bulbo húmedo con agua destilada y colóquelo en la entrada de la torre.
- f) Coloque un termómetro de bulbo seco en la entrada de la torre.
- g) Llene el depósito de otro termómetro de bulbo húmedo, con agua destilada y colóquelo en la salida de la torre.
- h) Coloque otro termómetro de bulbo seco en la salida de la torre.
- i) Abra la válvula V_1 .
- j) Abra la válvula V_2 para que se llene el tanque de alimentación. Si no hay agua, abra la válvula de la red general.

La descarga de agua hacia el drenaje le indicará que el tanque está lleno. Fije una descarga moderada de agua hacia el drenaje para mantener la presión constante en el suministro.

- k) Mantenga abiertas las válvulas V_3 , V_5 y V_6 hasta eliminar las burbujas de aire atrapadas en las tuberías de agua de la torre.
- l) Cierre la válvula V_3 .
- m) Abra la válvula V_4 y con la misma, controle el flujo, hasta obtener el caudal recomendado.
- n) Abra o cierre la válvula V_5 para colocar el nivel de agua cerca de la marca de los 4 kilogramos. El nivel produce un sello, que evita el escape de aire y cubre el elemento sensible del termómetro bimetálico de salida.
- ñ) Coloque los 4 fusibles del calentador eléctrico.
- o) Coloque en la posición de encendido (ON), los interruptores del calentador y del motor del ventilador.
- p) Cierre la purga del ventilador, para evitar la recirculación de aire saturado.
- q) Arranque el ventilador.
El ajuste de la cantidad del flujo de aire se logra abriendo o cerrando la persiana del ventilador.
- r) Encienda los interruptores necesarios del calentador del agua.

Operación

- a) Ajuste durante aproximadamente 10 minutos los controles de los flujos de alimentación, antes de empezar a registrar los datos.
- b) Observe periódicamente los flujos alimentados, si detecta modificaciones en las condiciones iniciales ajuste los controles.
- c) Llene un registro, cada 10 minutos, con los datos experimentales obtenidos.
- d) Cuando el registro de las condiciones de operación indiquen estabilidad, inicie el llenado de la hoja electrónica de cálculo.
Desarrolle el procedimiento siguiente para calcular el agua de salida.
- e) Abra la válvula del drenaje V_5 , hasta que el tanque FB-1 se vacíe.

- f) Cierre rápida y completamente la válvula V_5 . Observe la elevación del nivel en el tubo correspondiente. Arranque el cronómetro, cuando el nivel del agua coincida con la marca inferior de calibración.
- g) Detenga el cronómetro cuando el nivel del agua coincida con la marca superior de calibración. Registre el tiempo.
- h) Abra la válvula V_5 y permita que el tanque se vacíe nuevamente.
- i) Repita las instrucciones "e" a "h", y obtenga cuatro lecturas.
- j) Los cuatro tiempos obtenidos ingréselos en la hoja electrónica para obtener el promedio.

Paro

- a) Apague los interruptores de los calentadores de agua.
- b) Quite todos los termómetros.
- c) Cierre la válvula V_4 , del flujo de agua a la torre
- d) Cierre la válvula V_2 , del flujo de agua al tanque de alimentación.
- e) Cierre la válvula V_1 .
- f) Abra la válvula V_3 .
- g) Retire todos los fusibles.
- h) Deje funcionar el ventilador durante unos 10 minutos más, para secar el empaque.
- i) Pare el ventilador
- j) Ponga en la posición de apagado (OFF), los interruptores del calentador y motor del ventilador.

SELECCIÓN Y DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Las preguntas que nos llevaron a un diseño de experimento fueron las siguientes: ¿cuántas operaciones de la torre eran necesarias realizar para que los resultados fueran válidos?, ¿cuántas y cuáles variables eran necesarias controlar durante la operación? y ¿qué valor o rango de valores de las variables, eran los más adecuados para realizar las operaciones?.

El diseño factorial satisfizo nuestras necesidades, fijó un total de 8 experimentos, el control de tres variables independientes y el establecimiento de valores mínimos y máximos para las variables seleccionadas.

La investigación de las variables nos condujo a seleccionar tres variables independientes, Esa selección se basó en la importancia de las variables y en la facilidad para medirlas o controlarlas. Los valores mínimo y máximo de las variables seleccionadas se determinaron prácticamente, basados en los límites que fijan los instrumentos y la operación del equipo. Las variables seleccionadas son: El flujo de agua, el flujo de aire y la temperatura del agua caliente.

RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

Los resultados obtenidos mediante la experimentación fueron:

La obtención de una variable importante para la operación de las torres, el flujo de agua mínimo de operación. El valor de este flujo resultó ser de 4.74 L/min aproximadamente igual a 282.9 Kg_{H₂O}/h.

La determinación de la presión total del sistema. La presión total del sistema es la suma de la presión atmosférica (para el D.F.) más 15 mmHg, obteniéndose por lo tanto, una presión total igual a 601 mmHg.

La corrección del flujo de aire de entrada por presión y temperatura. La corrección se realizó utilizando la siguiente función.

Flujo de aire corregido = $(760/601) \times (TBS_E/301.15) \times (\text{Flujo de aire medido})$.

En donde: $(760/601)$ es la corrección por presión en mmHg, $(TBS_E/301.15)$ es la corrección por temperatura en °K y el flujo de aire medido en m³/h.

La implementación de un procedimiento para medir el flujo de agua de salida, que consistió en la utilización del punto de calibración del tanque, medir cuatro veces, el tiempo que tarda el flujo de agua en salir, calcular el promedio de estos tiempos, con la cantidad de agua calibrada, el tiempo promedio y la densidad del agua de salida, se calculó el flujo de agua que sale de la torre.

La obtención de los rangos prácticos de las principales variables de la operación de la torre. Estos rangos se presentan en la tabla siguiente.

VARIABLE	RANGO	
	Mínimo	Máximo
Flujo de aire de entrada	130 m ³ /h	354 m ³ /h
Flujo de agua de entrada	4.74 L/min	5.18 L/min
Temperatura del agua de entrada	24 °C	44 °C
Temperatura del agua de salida	18 °C	30 °C
Tiempo promedio del agua en salir	47.32 s	53.76 s

TABLA 1. RANGOS DE OPERACIÓN

6... DESARROLLO DE LA HOJA DE CÁLCULO

Una aplicación integrada como Excel, es un programa de cómputo con funciones de hoja de cálculo, base de datos y gráficos. La aplicación está integrada en el sentido que todas sus partes colaboran en forma coordinada.

Millones de personas en todo el mundo y en todas las ocupaciones usan una aplicación integrada. Igual que otras herramientas de uso general, las aplicaciones integradas están limitadas solamente por las necesidades e imaginaciones de quienes trabajan con ella. La descripción de las funciones de un programa integrado son:

HOJA ELECTRÓNICA DE CÁLCULO

Con las hojas de cálculo podemos realizar, operaciones y cálculos matemáticos, basados en datos almacenados en celdas y relacionados por medio de fórmulas. También podemos probar suposiciones y analizar resultados.

Las hojas de cálculo son estructuras matriciales empleadas para cálculos científicos y financieros. Las columnas y filas se cruzan para formar un diseño de rectángulos o celdas, cada una de las celdas contiene o genera un valor. Muchos de los valores en una hoja de cálculo dependen de otros valores anotados en otra parte de la hoja o en otra hoja.

En una hoja de cálculo de papel, los valores son números. Si se modifica algún valor, es preciso modificar manualmente todos los demás valores relacionados con él. Las hojas de cálculo electrónicas además de facilitar el mantenimiento de la hoja, también automatizan las operaciones que serían bastante laboriosas si se efectuaran manualmente. Los números introducidos en las diferentes secciones de la hoja de trabajo están conectados dinámicamente entre sí mediante fórmulas: cuando modificamos un valor, cambian automáticamente todos los demás valores que dependen de él. Esta interconexión confiere a la hoja de cálculo electrónica más flexibilidad que la hoja de papel, pues facilita enormemente la "simulación" con cifras para ver de qué manera las modificaciones en un área afectan las demás áreas.

GRÁFICOS

Las gráficas de un programa integrado son representaciones visuales de la información contenida en las hojas de cálculo o bases de datos. Estas nos permiten ilustrar conceptos y visualizar resultados. Las imágenes gráficas mejoran la claridad de los resultados. En muchos casos, las gráficas pueden revelar patrones en los números e ilustrar tendencias y proyecciones generales, que podrían con facilidad pasar inadvertidas en páginas y más páginas de datos numéricos. Por esta razón, es común utilizar gráficas en presentaciones e informes. De manera similar, los ingenieros utilizan gráficas para mostrar las relaciones entre dos o más conjuntos de datos o los cambios en un conjunto de valores con el tiempo. Las gráficas están conectadas dinámicamente con los datos de la hoja de trabajo en que se basan; si se modifica alguno de esos datos, el programa principal redibujará de inmediato la gráfica para reflejar el cambio. Es posible ver la gráfica en la pantalla conforme se crea y modificarla o ampliarla si es necesario. Cuando la gráfica tenga el aspecto deseado, se podrá presentarla en pantalla, imprimirla en papel o incluirla en un documento.

BASE DE DATOS

Con las funciones básicas de bases de datos podemos almacenar, organizar y manejar información.

CARACTERÍSTICAS DE LA APLICACIÓN

Estas características generales son:

Hasta 255 hojas en un libro. 65,536 filas por 256 columnas. Hasta 32 mil caracteres en una celda. Ancho de columna de 0 a 255 caracteres. Longitud máxima de una fórmula de 1024 caracteres. Manejo de 15 dígitos decimales. Manejo de fechas hasta el 31 de diciembre del 9999.

IMPLEMENTACIÓN DE LA HOJA DE CÁLCULO

La hoja de cálculo **operación** se diseñó y elaboró dividiendo la hoja en áreas y utilizando las funciones presentadas en el capítulo Conceptos y Ecuaciones Básicas. El

área de datos experimentales consiste de un rango de celdas para ingresar los datos de operación de la torre y para el cálculo del tiempo promedio que tarda el agua en salir. Los nombres de los datos requeridos en esta parte de la hoja son: la posición del flotador del rotámetro, el caudal del agua de entrada, la temperatura del agua de entrada, la temperatura del agua de salida, el caudal del aire de entrada, las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo del aire de entrada y de salida y los tiempos que tarda el agua en salir.

Con los datos de entrada el programa calcula y construye, de forma muy rápida, los resultados de las otras tres áreas.

El área de resultados intermedios, calcula las presiones de vapor y parciales de la mezcla aire-vapor y también las densidades y los calores específicos del agua de entrada y salida.

El área de resultados experimentales calcula los valores siguientes: las humedades absolutas de entrada y salida del aire, las entalpías de entrada y salida del aire, los caudales del agua de entrada y de salida, el caudal del aire de entrada corregido, el volumen húmedo de la mezcla aire-vapor de entrada, el caudal de aire seco de entrada, las cantidades de agua evaporada teórica, experimental y de diseño, la cantidad de agua arrastrada, las cantidades de calor cedido por el agua y absorbido por el aire, la diferencia de calores, la pendiente de la línea de operación, la velocidad del aire de entrada, el rango y el acercamiento y la humedad relativa del aire de entrada.

El área de gráficas calcula las líneas de equilibrio y obtiene datos para las líneas de operación; con los resultados obtenidos elabora las gráficas de las líneas de equilibrio y las líneas de operación.

El área de optimización de la línea de operación, calcula los valores óptimos de las variables involucrados en esa línea, con la finalidad de realizar un cambio en la operación de la torre.

El programa de hoja de cálculo utilizado permite los comentarios en las celdas, lo que facilitan la identificación las variables utilizadas y la comprensión de la hoja, además, permite introducir nuevas opciones sin afectar la estructura básica del mismo y es susceptible de generalizarse realizando las modificaciones necesarias.

APLICACIÓN DE LA HOJA DE CÁLCULO

La aplicación consta de dos partes, la primera tiene que ver con la preparación de la torre para operarla y la segunda con la utilización de la computadora que procesará la información ingresada.

Junto a la torre de enfriamiento funcionando, se adecua una pequeña toma de corriente, una extensión y un regulador. Anticipadamente, a la computadora se le instala la aplicación de hoja de cálculo y se le copia el archivo denominado **enfriamiento.xls**, en cualquier directorio. Se ubica la computadora en el lugar designado, se ejecuta el programa de hoja de cálculo y se abre el archivo **enfriamiento.xls**. El programa presenta de inicio la hoja **operación**, en este momento la computadora esta lista para que los usuarios empiecen a introducir los datos en las celdas. Los datos iniciales para las celdas son los obtenidos en el momento en que la operación produzca lecturas estables. Los datos en la hoja producen de forma rapidísima los primeros resultados de la operación. La obtención de resultados inmediatos se aprovecha para analizarlos y para modificar de forma inmediata, las condiciones iniciales de la operación del equipo.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

CONCLUSIONES

Una de las razones de peso para justificar el uso de las nuevas herramientas de cómputo es que todas las tareas relacionadas con el manejo de la información las realizan de manera muy rápida y precisa.

La resolución manual de cualquier problema es muy importante para el proceso de enseñanza-aprendizaje y para adquirir experiencia. Sin embargo, para la mayoría de los problemas de ingeniería, después de que sabemos resolver un problema manualmente, nada justifica seguir trabajando de esa forma.

En el caso, de la operación de la torre que aquí nos ocupa se realiza un trabajo que dura aproximadamente 3 horas, distribuidas de la siguiente manera aproximadamente, media hora para explicaciones y dos horas y media para la operación del equipo. El alumno durante la operación del equipo, está muy ocupado en el registro de los datos obtenidos y precisamente en el manejo del equipo. Después de la práctica y con los datos obtenidos, el alumno plantea y resuelve el problema de calcular las propiedades psicrométricas del aire y los balances de materia y energía. El alumno en la próxima clase, entrega un informe con los resultados obtenidos y una discusión acerca de ellos. Con el uso de la hoja electrónica aquí propuesta, el alumno obtiene en el momento de ingresar el último dato casi instantáneamente, todos los resultados requeridos, tanto en forma numérica como en forma gráfica. Estos resultados le proporcionan al alumno valiosa información acerca de la forma correcta o incorrecta en que esta operando la torre y si el caso lo requiere, puede realizar un cambio para corregir la operación del equipo. Por otro lado, la información suministrada por la hoja electrónica, le será útil al alumno como una guía o referencia, cuando tenga que comparar sus resultados.

El trabajo realizado también incluyó una evaluación experimental de la torre. Esta valoración ofreció datos y resultados confiables. Con los datos así obtenidos y resolviendo el problema manualmente, se propuso la utilización de una hoja electrónica de cálculo para disminuir el tiempo en las tareas ejecutadas. Además, el estudio

inmediato de los resultados y gráficas, facilitaría un cambio en las condiciones de operación, si el comportamiento de la torre no fuera el adecuado.

La población beneficiada con el uso de la hoja electrónica propuesta, es de doscientos alumnos por semestre.

BIBLIOGRAFÍA

Gregorio Huerta Molina. Excel Básico para Office 97. Dirección General de Servicios de Cómputo Académico. 1998.

Miguel F. Cárdenas y Espinosa. Excel Avanzado para Office 97. Dirección General de Servicios de Cómputo Académico. 1998.

Joyce Cox, Polly Urban y Christina Dudley. Curso Rápido de Microsoft Excel 97. Grupo Editorial Norma, S.A. 1998.

Robert E. Treybal. Operaciones de Tránsito de Masa. Segunda Edición. McGraw-Hill. 1981.

Robert H. Perry. Cecil Chilton. Manual del Ingeniero Químico. Volúmenes I y III. Segunda Edición en Español. McGraw-Hill. 1984.

David M. Himmelblau. Principios y Cálculos Básicos de la Ingeniería Química. C.E.C.S.A. 1981.

Antonio Valiente. Problemas de Balances de Energía. Alhambra Mexicana, S.A. 1982.

Warren L. McCabe. Julian C. Smith. Operaciones Básicas de Ingeniería Química. Reverté, S.A. 1981.

GLOSARIO

ρ_L = densidad del agua

λ_o = calor latente de vaporización

C_{pL} = capacidad térmica específica del agua

C_{pV} = capacidad térmica específica del vapor

y_s = composición molar del vapor en el aire saturado

Y_m = humedad molar de saturación

Y_s = humedad absoluta de saturación

H_s = entalpía específica del aire saturado

V_{HS} = volumen húmedo saturado

C_{HS} = calor húmedo saturado

Y = humedad absoluta

H = entalpía específica del aire no saturado

V_H = volumen húmedo

C_H = calor húmedo

$Y_{R\%}$ = humedad relativa por ciento

L_3 y L_4 = Flujos de agua de entrada y salida

TL_3 y TL_4 = Temperaturas del agua de entrada y salida

G_1 y G_2 = Gastos de aire de entrada y salida

G_s = Gasto de aire seco

Y_1 = Humedad absoluta del aire de entrada

Y_2 = Humedad absoluta del aire de salida

HG_1 y HG_2 = Entalpías del aire de entrada y salida

HL_3 y HL_4 = Entalpías del agua de entrada y salida

TBS_1 y TBS_2 = Temperaturas de bulbo seco de entrada y salida del aire

TBH_1 y TBH_2 = Temperaturas de bulbo húmedo de entrada y salida del aire

ANEXOS

ANEXO I

TORRE DE ENFRIAMIENTO DE AGUA, HILTON.
ENFRIAMIENTO DE AGUA

Elaboró: Sergio Vázquez Rivera
 Para obtener el título de: Ingeniero Químico
 Fecha: Febrero del 2000

ÁREA DE ENTRADA DE DATOS EXPERIMENTALES

I. LLENE LA TABLA SIGUIENTE ÚNICAMENTE CON LOS DATOS ESTABLES Y FINALES DE LA OPERACIÓN.

No. Exp.	PF	L _E	TL _E	TL _S	G _E	TBS _E	TBH _E	TBS _S	TBH _S	t _{pL}
	cm ³	L/min	°C	°C	m ³ /h	°C	°C	°C	°C	s
1	26	4.74	25.0	23.0	130.0	27.0	20.5	25.0	24.0	51.24
2	28	5.18	24.0	23.0	130.0	27.0	24.5	24.3	23.0	47.36
3	26	4.74	25.0	19.0	354.0	24.0	19.0	23.0	22.0	51.89
4	28	5.18	24.0	19.0	354.0	24.0	18.5	22.0	21.9	47.95
5	26	4.74	37.0	27.0	130.0	29.0	26.3	36.0	34.0	81.85
6	28	5.18	42.0	30.0	130.0	28.0	25.5	39.0	36.5	47.32
7	26	4.74	44.0	20.0	354.0	20.0	18.5	32.0	32.0	53.14
8	28	5.18	42.0	21.0	352.5	21.0	18.0	32.0	32.0	48.03

II. EN LA TABLA SIGUIENTE INGRESE 4 TIEMPOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE LA HOJA CALCULA EL TIEMPO PROMEDIO QUE TARDA EL AGUA EN SALIR.

No.	1	2	3	4	5	6	7	8
	segundos							
1	50.81	47.47	50.73	47.14	51.41	48.04	52.60	48.30
2	51.20	47.30	51.79	48.09	51.66	47.42	53.42	47.30
3	51.54	47.30	51.95	48.39	52.24	46.97	52.95	48.13
4	51.40	47.35	53.07	48.17	52.07	46.84	53.57	48.40
Promedio:	51.24	47.30	51.89	47.95	51.65	47.32	53.14	48.03

OPERACIÓN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE AGUA.

ANEXO II

ÁREA DE CALCULOS INTERMEDIOS

LAS SIGUIENTES TABLAS DE RELLENAN AUTOMÁTICAMENTE.

LA TABLA SIGUIENTE UTILIZA LAS FUNCIONES DE LA PRESIÓN DE VAPOR Y PARCIAL PARA OBTENER LOS RESULTADOS.

No. Exp.	PV _{TBSE} mmHg	PV _{TBHE} mmHg	PV _{TBSS} mmHg	PV _{TBHS} mmHg	PPV _E mmHg	PPV _S mmHg	PPG _E mmHg	PPG _S mmHg
1	26.83	18.15	23.84	22.46	14.90	21.96	586.10	579.04
2	26.83	23.14	22.86	21.14	21.89	20.49	579.11	580.51
3	22.46	16.54	21.14	19.90	14.04	19.40	586.96	581.60
4	22.46	16.03	19.90	19.78	13.28	19.73	587.72	581.27
5	30.15	25.67	44.72	40.04	24.30	39.04	576.70	561.96
6	28.45	24.56	52.62	45.96	23.31	44.71	577.69	556.29
7	17.60	16.03	35.79	35.79	15.28	35.79	585.72	565.21
8	18.72	15.53	35.79	35.79	14.03	35.79	586.97	565.21

LA TABLA SIGUIENTE CALCULA LA DENSIDAD Y LA CAPACIDAD TÉRMICA ESPECÍFICA DEL AGUA

No. Exp.	DL _E	DL _S	CPL _E	CPL _S
	Kg/m ³	Kg/m ³	Kcal/Kg°C	Kcal/Kg°C
1	997.12	997.61	0.997837	0.997827
2	997.37	997.61	0.997832	0.997827
3	997.12	998.46	0.997837	0.997809
4	997.37	998.46	0.997832	0.997809
5	993.42	996.60	0.997931	0.997849
6	991.51	995.74	0.997988	0.997869
7	990.69	998.26	0.998015	0.997813
8	991.51	998.06	0.997988	0.997818

OPERACIÓN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE AGUA.

AREA DE SALIDA DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

LA TABLA SIGUIENTE ES LA PRINCIPAL EN EL LA SE OBTIENEN LOS PRINCIPALES RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA OPERACION DE LA TORRE. COMO SON LAS PROPIEDADES PSICROMÉTRICAS PERTINENTES Y LOS BALANCES DE MATERIA Y ENERGIA.

Nos. Exp.	V_a kg/m ³	V_b kg/m ³	H_{G_1} Kcal/m ³	H_{G_2} Kcal/m ³	L_1 kg/m ³	L_2 kg/m ³	G_{G_1} m ³ /kg	G_{G_2} m ³ /kg	V_{G_1} m ³ /kg	V_{G_2} m ³ /kg	Q_{G_1} Kcal/m ³	Q_{G_2} Kcal/m ³	W_{G_1} kg/m ³	W_{G_2} kg/m ³	$E_{(exp)}$ Kcal/m ³	$E_{(teo)}$ Kcal/m ³	$E_{(d.s)}$ Kcal/m ³	Q_c Kcal/m ³	Q_h Kcal/m ³	D_p Kcal/m ³	$ICP_{(d)}$ m ³	V_o m ³	R	A	H _r %	%
1	0.0158	0.0236	18.12	20.35	283.598278	281.04	103.85	1.1068	148.33	1.15	1.02	1.39	0.13	0.56	1.02	2.55	1.02	674.44	678.22	-3.78	1.91	0.506	2.0	2.5	52.33	
2	0.0235	0.0220	20.81	19.19	329.99159	304.09	103.85	1.1179	146.56	-2.23	5.91	0.56	0.13	0.56	5.91	6.05	3.03	444.89	237.62	682.90	2.12	0.506	1.0	-1.5	81.36	
3	0.0149	0.0207	14.81	18.12	283.598278	277.54	441.71	1.0620	204.51	2.37	6.05	3.88	0.13	0.56	6.05	6.05	2.79	1912.78	1342.72	470.04	0.70	1.383	8.0	0.0	62.31	
4	0.0141	0.0211	14.31	18.10	309.99158	300.33	441.71	1.0605	205.03	2.96	9.08	3.88	0.13	0.56	9.08	9.08	3.03	1729.83	1535.35	194.56	0.77	1.383	10.0	0.0	80.45	
5	0.0251	0.0432	22.98	35.15	282.532218	277.75	164.94	1.1301	145.95	2.46	3.78	2.30	0.20	0.70	3.78	3.78	5.91	2949.03	1719.63	1189.39	1.84	0.503	13.0	0.0	81.40	
6	0.0251	0.0500	22.03	40.10	303.088887	304.33	164.38	1.1284	145.20	3.54	3.78	2.30	0.20	0.70	3.78	3.78	5.91	3809.88	2842.26	1164.42	2.10	0.503	13.0	0.0	81.40	
7	0.0162	0.0384	14.84	31.77	281.758478	271.01	435.78	1.0789	203.86	8.35	10.75	12.17	1.40	0.60	10.75	10.75	12.17	6944.50	6919.41	46.10	0.70	1.342	14.0	1.2	84.82	
8	0.0149	0.0384	14.06	31.77	303.088887	299.80	435.40	1.0309	227.80	9.87	8.37	11.63	1.50	0.60	8.37	8.37	11.63	6555.05	7152.88	487.81	0.77	1.344	21.0	3.0	74.88	

ANEXO IV

ÁREA DE GRÁFICAS

LA SIGUIENTE TABLA CALCULA LA LÍNEA DE EQUILIBRIO Y ES LA FUENTE DE DATOS PARA LA ELABORACIÓN DE LAS GRÁFICAS DE LAS LÍNEAS DE OPERACIÓN Y EQUILIBRIO.

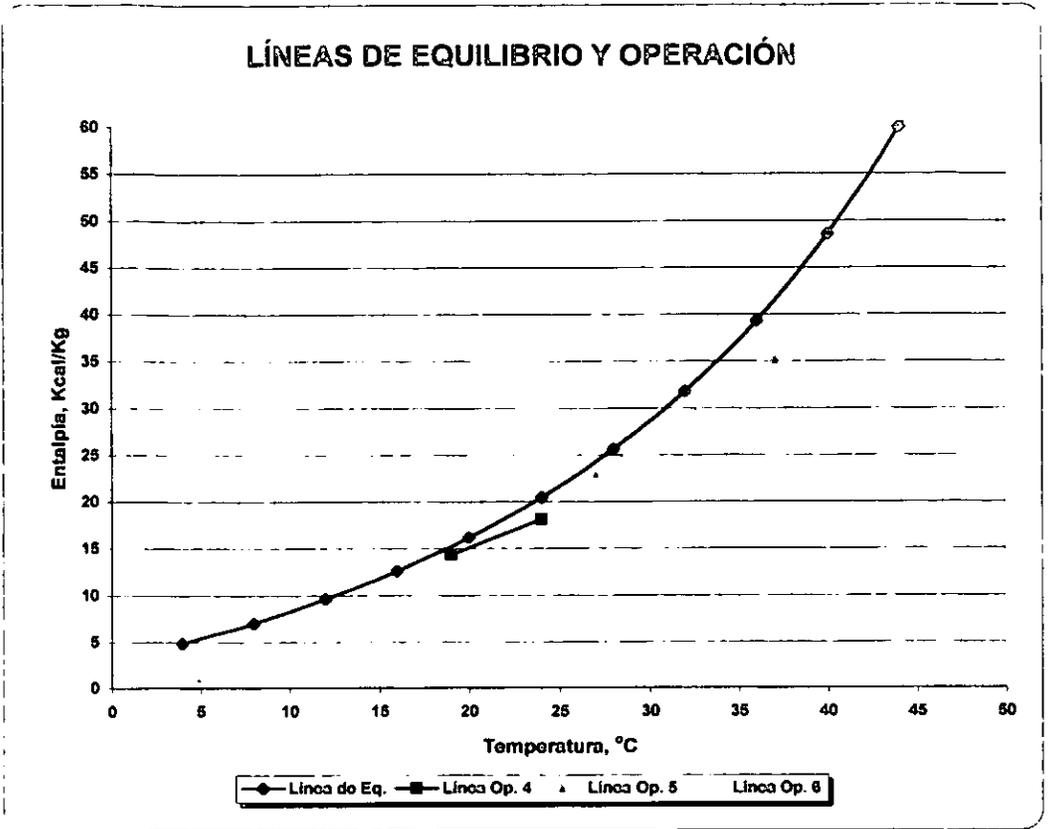
LÍNEA DE EQUILIBRIO.

T_s (°C)	P_v (mmHg)	Y_s Kg _{H₂O} /Kg _{GS}	H_s Kcal/h
4	6.13	0.0064	4.80
8	8.08	0.0085	7.01
12	10.56	0.0111	9.58
16	13.69	0.0145	12.60
20	17.60	0.0188	16.17
24	22.46	0.0241	20.44
28	28.45	0.0309	25.57
32	35.79	0.0394	31.77
36	44.72	0.0500	39.32
40	55.51	0.0633	48.56
44	68.49	0.0800	59.94
48	84.01	0.1011	74.09
52	102.45	0.1278	91.85
LINEAS DE OPERACIÓN			
23			16.12
25			20.35
23			20.81
24			19.19
19			14.81
25			18.12
19			14.31
24			18.10
27			22.96
37			35.15
30			22.03
42			40.10
20			14.64
44			31.77
21			14.06
42			31.77

OPERACIÓN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE AGUA.

ANEXO V

ESTA ES LA GRÁFICA DE LAS SIGUIENTES TRES OPERACIONES.



OPERACIÓN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE AGUA.

ANEXO VI

AREA DE OPTIMIZACION DE LA LINEA DE OPERACION

LA TABLA SIGUIENTE CALCULA LOS DATOS PARA PODER GRAFICAR LA LINEA DE OPERACION OPTIMA EL CALCULO SE BASA EN LOS DATOS DE SATURACION Y LA PENDIENTE DE LA LINEA DE OPERACION.

GASTO MÍNIMO (G_{min}) Y GASTO ÓPTIMO DE OPERACIÓN (G_{OP})

No. Exp.	PV_{TLE} mmHg	Y_B Kg _{H₂O} /Kg _{DB}	HG_B Kcal/h	$(LCP_1/G)_{max}$	G_{min} Kg/h	G_{OPT} Kg/h	G_{OPT} m ³ /h	$HG_{G(OPT)}$ Kcal/h
1	23.84	0.0257	21.63	2.7527	103.02	154.53	139.90	19.78
2	22.46	0.0241	20.44	-0.3669	-844.92	-1267.39	-1133.68	20.56
3	23.84	0.0257	21.63	1.1357	249.71	374.56	343.02	19.34
4	22.46	0.0241	20.44	1.2243	253.19	379.79	348.25	18.38
5	47.23	0.0530	41.45	1.8458	153.07	229.61	203.18	35.24
6	61.71	0.0712	53.95	2.6546	116.09	174.13	154.86	43.22
7	68.49	0.0800	59.94	1.8840	149.55	224.33	207.80	44.72
8	61.71	0.0712	53.95	1.8954	162.59	243.88	225.62	40.54

OPERACION DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE AGUA