



EL SABER DE MIS HIJOS
HARÁ MI GRANDEZA

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA

Y METALURGIA

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE
UNA TORRE EMPACADA PARA LA
EXPERIMENTACIÓN DE HUMIDIFICACIÓN
DE AIRE Y ENFRIAMIENTO DE AGUA A NIVEL
LABORATORIO**

Tesis

Que para obtener el título de:

INGENIERO QUÍMICO

Presenta

**DAVID AMADO LÓPEZ ORANTES
JUAN CARLOS BARCELÓ ÁLVAREZ**

Hermosillo, Sonora

Abril del 2015

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

UNIVERSIDAD DE SONORA

VOTOS APROBATORIOS

Hermosillo, Sonora, a 27 de Marzo de 2015.

DR. MARTÍN ANTONIO ENCINAS ROMERO
JEFE DEL DEPARTAMENTO
INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA

Por medio de la presente, nos permitimos informarle que los miembros del Jurado designado para revisar la Tesis Profesional “**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE UNA TORRE EMPACADA PARA LA HUMIDIFICACIÓN DE AIRE Y EL ENFRIAMIENTO DE AGUA A NIVEL LABORATORIO**”, presentada por:

DAVID AMADO LÓPEZ ORANTES
JUAN CARLOS BARCELÓ ÁLVAREZ

La han revisado y cada uno de los integrantes da su **VOTO APROBATORIO** ya que cumple con los requisitos parciales para la obtención del Título de:

INGENIERO QUÍMICO

27-03-2015

Fecha



DR. JUAN ANTONIO NORIEGA RODRÍGUEZ

27-03-2015



DR. MANUEL PÉREZ TELLO

27-03-2015



DR. MARTÍN ANTONIO ENCINAS ROMERO

27-03-2015



DR. JESÚS FERNANDO HINOJOSA PALAFOX

DEDICATORIA

*A Dios por darnos la vida, y haber permitido nuestra amistad y compañerismo
para la realización de este trabajo.*

*A nuestros Padres que con su amor nos han cobijado durante nuestra vida
apoyándonos incondicionalmente en cada etapa que hemos vivido. A ellos les
damos gracias y con mucho amor y cariño les dedicamos todo nuestro esfuerzo
en reconocimiento a todo el sacrificio puesto para que nosotros pudiésemos
culminar nuestros estudios universitarios.*

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más amplio agradecimiento a nuestro director de tesis el Dr. Juan Antonio Noriega Rodríguez, por brindarnos su valioso apoyo, tiempo y paciencia en el desarrollo de este proyecto, con el que sin lugar a dudas hemos crecido como profesionistas.

Al profesor M.C. Jaime Varela Salazar por su apoyo y asesoría en la realización de este proyecto.

A nuestras Familias, quienes siempre nos impulsaron para salir adelante y luchar para cumplir cada una de nuestras metas, estamos profundamente agradecidos por su apoyo incondicional.

A nuestros amigos y compañeros de generación quienes estuvieron presentes en las largas horas de estudio.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
NOMENCLATURA.....	xii
RESUMEN.....	xiv
I. Introducción y Objetivos.....	1
I.1 Justificación.....	1
I.2 Objetivos.....	3
I.2.1 Objetivo general.....	3
I.2.2 Objetivos específicos.....	3
II. Antecedentes.....	4
II.1 Operaciones Gas-Líquido.....	4
II.1.1 Conceptos de humidificación.....	5
II.1.2 Diagrama psicrométrico.....	7
II.2 Aplicaciones de la Operación de Humidificación del Aire.....	13
II.2.1 Aplicaciones de las torres de enfriamiento de agua.....	14
II.2.2 Tipos de torres de enfriamiento.....	15
II.3 Componentes de una Torre de Enfriamiento.....	17
II.3.1 Distribuidor del líquido.....	17
II.3.2 Empaques o rellenos.....	18
II.3.3 Eliminador de arrastre.....	19
II.3.4 Ventilador.....	19
II.4 Sistema de Equilibrio Aire-Agua.....	19
II.5 Hidrodinámica en la Torres Empacadas.....	20
II.6 Relaciones Fundamentales para Operaciones adiabáticas de Humidificación.....	22
II.6.1 Transferencia de calor por difusión y convección simultáneas para el relleno de una torre de enfriamiento.....	25
II.7 Eficiencia de Torre de Enfriamiento.....	27
III. Metodología Experimental.....	29
III.1 Diseño Del Equipo Para la Humidificación de Aire y el Enfriamiento de Agua.....	29
III.1.1 Empaque de la torre.....	30
III.1.2 Ventilador.....	31

ÍNDICE DE CONTENIDO (Continuación)	Página
III.1.3 Distribuidor de agua.....	31
III.1.4 Eliminador de rocío.....	32
III.1.5 Calentador	33
III.1.6 Depósito de almacenamiento de agua.....	33
III.1.7 Bomba	34
III.2 Construcción del Equipo	35
III.3 Operación del Equipo	44
III.4 Mantenimiento del Equipo.....	48
IV. Resultados y Discusión.....	51
IV.1 Resultados para el Enfriamiento de Agua.....	51
IV.2 Con Ventanillas Laterales 100% Abiertas.....	54
IV.2.1 Tablas de resultados experimentales.....	57
IV.3 Con Ventanillas Laterales 50% Abiertas.....	59
IV.3.1 Tablas de resultados Experimentales.....	62
IV.4 Con Ventanillas Laterales 25% Abiertas.....	64
IV.4.1 Tablas de resultados experimentales	67
IV.5 Comportamiento del Coeficiente de Transferencia de Masa, Eficiencia y Potencia de Transferencia de Calor Respecto al Flujo de Entrada de Agua.....	69
IV.6 Análisis de Resultados para Enfriamiento de Agua.....	72
IV.7 Resultados Para Humidificación Aire.....	75
IV.7.1 Línea de operación, eficiencia y agua de reposición para la humidificación.....	77
IV.7.2 Análisis de resultados para humidificación de aire.....	82
IV.8 Análisis Económico.....	82
V. Conclusiones y Recomendaciones.....	84
V.1 Conclusiones.....	84
V.2 Recomendación.....	85
Anexos.....	86
A. Tablas de datos experimentales.....	86
B. Tablas de costos construcción y equipamiento de la torre.....	90
C. Práctica para estudiantes de la licenciatura de ingeniería química.....	93
D. Superficie interfacial específica del empaque coolpad.....	99
Bibliografía.....	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Diagrama psicrométrico para la mezcla aire y vapor de agua a la presión atmosférica normal.	9
2	Localización de las diferentes zonas en un diagrama psicrométrico.	10
3	Representación de líneas de bulbo seco y líneas de bulbo húmedo en un diagrama psicrométrico.	11
4	Representación de las isolíneas de humedad relativa.	12
5	Torre de enfriamiento tiro inducido.	16
6	Equilibrio de sistema Aire-Agua.	20
7	Caída de presión del gas típica para el flujo a contracorriente del líquido y el gas en empaques.	21
8	Balance de materia y energía en el interior de una torre de enfriamiento, para una sección transversal determinada.	23
9	Torre de enfriamiento de tiro inducido y contracorriente.	29
10	Empaque Coolpad.	30
11	Extractor ROBEL modelo 008.	31
12	Distribuidor de agua.	32
13	Eliminador de roció Coolpad.	32
14	Grifo eléctrico Lorenzetti.	33
15	Depósito de agua de 20 L.	34
16	Bomba MICROPUMP® modelo 75211-62.	34
17	Unión de ángulos de aluminio con remaches de ¼”.	35
18	Pieza de la parte superior de la torre empacada.	36
19	Unión ángulos para parte central de la torre.	37
20	Pieza de la parte central de la torre empacada.	37
21	Ensamblado de parte inferior de la torre empacada.	38
22	Pieza de la parte inferior de la torre empacada.	39

ÍNDICE DE FIGURAS (Continuación)

Figura		Página
23	Torre empacada para la humidificación de aire y enfriamiento de agua.	40
24	Torre empacada para la humidificación de aire y enfriamiento de agua a nivel laboratorio.	43
25	Diagrama de flujo de la torre empacada construida, con variables a registrar.	46
26	Diagrama de flujo de operación de la torre empacada.	47
27	Línea de equilibrio del sistema aire-agua y línea de operación para las condiciones de ventanillas laterales 100% abiertas y flujo 1.	54
28	Línea de equilibrio del sistema aire-agua y línea de operación para las condiciones de ventanillas laterales 100% abiertas y flujo 2.	55
29	Línea de equilibrio del sistema aire-agua y línea de operación para las condiciones de ventanillas laterales 100% abiertas y flujo 3.	56
30	Línea de equilibrio del sistema aire-agua y línea de operación para las condiciones de ventanillas laterales 50% abiertas y flujo 1.	59
31	Línea de equilibrio del sistema aire-agua y línea de operación para las condiciones de ventanillas laterales 50% abiertas y flujo 2.	60
32	Línea de equilibrio del sistema aire-agua y línea de operación para las condiciones de ventanillas laterales 50% abiertas y flujo 3.	61
33	Línea de equilibrio del sistema aire-agua y línea de operación para las condiciones de ventanillas laterales 25% abiertas y flujo 1.	64
34	Línea de equilibrio del sistema aire-agua y línea de operación para las condiciones de ventanillas laterales 25% abiertas y flujo 2.	65
35	Línea de equilibrio del sistema aire-agua y línea de operación para las condiciones de ventanillas Laterales 25% abiertas y flujo 3.	66
36	Coefficientes de transferencia de masa ($K_y a$) vs flujo de agua, con el flujo de aire calculado	69

ÍNDICE DE FIGURAS (Continuación)

Figura		Página
37	Coefficientes de transferencia de masa ($K_Y a$) vs flujo de agua, con el flujo de aire medido experimentalmente	70
38	Eficiencia de la torre empacada vs flujo de agua	71
39	Potencia de transferencia de calor vs flujo de agua	72
40	Grafica de humedad relativa vs tiempo	76
41	Grafica de humedad relativa vs tiempo	77
42	Grafica de línea de operación de humidificación con ventanillas 100% abiertas	78
43	Grafica de línea de operación de humidificación con ventanillas 50% abiertas	79
44	Grafica de eficiencia vs flujo de agua	80
45	Grafica de reposición de agua vs flujo de agua	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Páginas
I	Niveles de flujo de agua	53
II	Niveles de calentamiento del grifo eléctrico	53
III	Velocidad de aire medido experimentalmente	53
IV	Flujos máxicos de aire calculados.	57
V	Resultados de coeficientes obtenidos operando el equipo con ventanillas laterales 100%	57
VI	Potencia de la torre de enfriamiento	58
VII	Eficiencia de la torre de enfriamiento.	58
VIII	Coeficiente de transferencia de masa y potencia de la torre de enfriamiento con flujo máxico de aire medido	58
IX	Flujos máxicos de aire calculados.	62
X	Resultados de coeficientes obtenidos operando el equipo con ventanillas laterales 50%	62
XI	Potencia de la torre de enfriamiento	63
XII	Eficiencia de la torre de enfriamiento.	63
XIII	Coeficiente de transferencia de masa y potencia de la torre de enfriamiento con flujo máxico de aire medido	63
XIV	Flujos máxicos de aire calculados.	67
XV	Resultados de coeficientes obtenidos operando el equipo con ventanillas laterales 25%	67
XVI	Potencia de la torre de enfriamiento	68
XVII	Eficiencia de la torre de enfriamiento.	68
XVIII	Coeficiente de transferencia de masa y potencia de la torre de enfriamiento con flujo máxico de aire medido	68
XIX	Resultados de torre de enfriamiento de tiro forzado analizada en el artículo "Simulación de una Torre de Enfriamiento Mecánica Comparada con Curvas Experimentales"	74
XX	Comparación de porcentaje de saturación y temperatura de bulbo seco a la entrada y salida del sistema con ventanillas 100% abiertas.	76
XXI	Comparación de porcentaje de saturación y temperatura de bulbo seco a la entrada y salida del sistema con ventanillas 50% abiertas.	77
XXII	Eficiencia de humidificación para ventanillas laterales 100% abiertas.	80

ÍNDICE DE TABLAS (Continuación)

Tabla		Página
XXIII	Eficiencia de humidificación para ventanillas laterales 50% abiertas	80
XXIV	Agua de reposición para cada flujo de agua y aire	81
XXV	Precios de equipos de laboratorio para la operación de humidificación.	83

NOMENCLATURA

a	Superficie interfaseal específica, basada en el volumen de la superficie empacada	(m ² /m ³)
A_t	Área de la sección transversal de la torre de enfriamiento	(m ²)
C_s	Calor húmedo, capacidad calorífica de una mezcla vapor-gas por unidad de masa del contenido de gas seco	(kJ/kg-K)
C_L	Capacidad calorífica del líquido a presión constante	(kJ/kg-K)
g_s	Flujo másico de gas seco	(kg/seg)
G_s	Flujo másico de gas seco por unidad de área	(kg/m ² -seg)
H'	Entalpia de una mezcla vapor-gas por unidad de masa de gas seco	(kJ/kg)
H*	Entalpia de una mezcla vapor-gas por unidad de masa de gas seco en el equilibrio.	(kJ/kg)
H_{as}	Entalpia de aire seco	(kJ/kg)
H_{sat}	Entalpia de saturación	(kJ/kg)
H_R	Humedad relativa	(%)
H_{Tog}	Altura global de una unidad de transferencia de gas	(m)
K_{ya}	Coefficiente volumétrico global de transferencia de masa	(kg/seg-m ³)
I_s	Flujo másico de agua	(kg/seg)
L_s	Flujo másico de agua por unidad de área	(kg/seg-m ²)
M_A	Peso molecular del agua	(kg/kgmol)
M_B	Peso molecular del aire	(kg/kgmol)
N_{Tog}	Número de unidades de transferencia de gas	(Adimensional)
\bar{P}_A	Presión parcial	(kPa)
P_A	Presión vapor	(kPa)
P_t	Presión total	(kPa)
Q	Calor Perdido por el agua	(kW)

T_L	Temperatura del líquido	(°C)
T_G	Temperatura de bulbo seco	(°C)
T_w	Temperatura de bulbo húmedo	(°C)
V_H	Volumen húmedo	(m ³ /kg)
y_A	Fracción mol de vapor	(Adimensional)
y_B	Fracción mol de aire	(Adimensional)
Y'	Humedad absoluta	(kg _A /kg _B)
Y	Humedad molar absoluta	(kgmol _A /kgmol _B)
Y_s	Humedad molar absoluta más saturación	(kgmol _A /kgmol _B)
Y'_s	Humedad molar absoluta de saturación	(kgmol _A /kgmol _B)
Z	Altura de empaque	(m ²)
%S	Saturación porciento	(%)
λ_o	Calor latente de evaporación a la temperatura de referencia	(°C)
η_t	Eficiencia térmica de la torre de enfriamiento	(%)

Subíndices para el componente A (agua):

1 = Indica la posición de salida

2 = Indica la posición de entrada

Subíndices para el componente B (aire):

1 = Indica la posición de entrada

2 = Indica la posición de salida

RESUMEN

El presente trabajo estudia los conceptos teóricos de la operación unitaria de humidificación para el diseño de equipos. Con el fin de conocer a fondo esta operación unitaria, se diseñó y construyó una torre empacada para la humidificación del aire y para el enfriamiento de agua a nivel laboratorio. Para el manejo de este equipo de laboratorio se explica de manera detallada la forma de operación del equipo, de igual manera se menciona cual es el mantenimiento que se le debe dar para el mejor rendimiento de la torre.

Al cumplir con el objetivo de construcción de la torre empacada se procedió a operar el equipo, en ella se realizaron distintos experimentos como lo fue la determinación del coeficiente global de transferencia de masa para la fase gaseosa, operando a distintas condiciones de flujos de agua, flujos de aire y variación de la temperatura del agua de entrada.

Los resultados obtenidos de la experimentación fueron comparados para encontrar las condiciones ideales de la operación del equipo. Este equipo también fue comparado con una torre piloto de características similares. Mientras la torre piloto tiene una eficiencia de 76.65%, la torre empacada construida alcanzo eficiencias de hasta un 95%. Con esto se pudo concluir que el equipo construido para la experimentación de humidificación de aire y enfriamiento de agua tiene un gran funcionamiento y será posible realizar buenas prácticas de ingeniería en la torre empacada

I. Introducción y Objetivos

I.1 Justificación

El ingeniero químico tiene la capacidad de aplicar su conocimiento para la producción de bienes económicos, por medio de procesos donde intervienen cambios físicos, químicos o energéticos, aprovechando los recursos naturales para el beneficio de la sociedad.

Las operaciones unitarias en ingeniería química están relacionadas con el problema de modificar la composición de soluciones y mezclas mediante métodos que no implican necesariamente reacciones químicas, como lo son las operaciones de humidificación (Treybal, 1994).

El campo de las operaciones unitarias estudia los fenómenos de transferencia de masa, calor y cantidad de movimiento. Analizando y comprendiendo estos fenómenos ha sido posible desarrollar la instrumentación, diseño y simulación de dispositivos, capaces de aumentar la producción de bienes y mejorar los procesos ya utilizados, esto ha llevado a un gran desarrollo industrial.

La humidificación cuando se aplica al sistema aire-agua, es una operación unitaria en la cual se da una transferencia simultánea de materia y calor sin la presencia de una fuente de calor externa, tiene lugar cuando el gas se pone en contacto con el líquido puro, en el cual es casi insoluble. Este fenómeno nos conduce a diferentes aplicaciones como la humidificación del gas, la deshumidificación del gas, el enfriamiento del líquido y enfriamiento de un gas caliente, además de permitir la medición del contenido de vapor en el gas (McCabe, 2002).

Para los alumnos de ingeniería química es de gran ayuda que las instalaciones donde estudian cuenten con laboratorios equipados para la experimentación de las diferentes operaciones unitarias vistas en la literatura. Tener una torre empacada para la humidificación de aire y el enfriamiento de agua para llevar a cabo distintos experimentos, es de gran relevancia para los alumnos pues les brinda un panorama práctico sobre el funcionamiento de estos equipos, los cuales son muy comunes encontrarse en las diferentes industrias.

I.2 Objetivos

I.2.1 Objetivo general

Diseñar, construir y establecer la forma de operación de una torre empacada para la humidificación de aire y el enfriamiento de agua.

I.2.2 Objetivos específicos

- Establecer una base para el diseño de un equipo experimental para el laboratorio de ingeniería química.
- Construir un equipo portátil de tamaño mínimo y de fácil operación para estudiantes de licenciatura.
- Establecer experimentos de humidificación de aire y enfriamiento de agua para llevar a cabo en el equipo construido.

II. Antecedentes

II.1 Operaciones Gas-Líquido

El contacto directo de un gas con un líquido puro puede tener distintos fines entre los que se destacan el enfriamiento de un líquido el cual sucede por la transferencia de calor sensible y también por evaporación, la aplicación principal es el enfriamiento de agua por contacto con el aire atmosférico. Otra operación que se puede llevar a cabo es la humidificación de un gas, ésta por lo general se utiliza para controlar el contenido de humedad del aire. De igual manera es posible llevar a cabo la deshumidificación de un gas donde el contacto de una mezcla de vapor-gas con un líquido frío produce la condensación del vapor, todas estas operaciones donde están en contacto directo gas-líquido se llevan a cabo de forma adiabática. De igual forma podemos encontrar operaciones gas-líquido no adiabáticas como lo es el enfriamiento por evaporación donde un líquido o un gas dentro de un tubo se enfría con un flujo de agua en forma de película en la superficie externa del tubo; a su vez, esta última se enfría por contacto directo con el aire. Otra operación gas-líquido no adiabática es la deshumidificación de un gas donde una mezcla gas-vapor se pone en contacto con tubos refrigerantes y el vapor se condensa en los tubos (Treybal, 1994).

Estas operaciones son simples dado que en estos procesos en un principio solo hay presentes dos componentes y dos fases. La fase líquida está constituida por un líquido puro (aunque puede ser una mezcla ajena al gas), la fase gas por un inerte (aire o gas o mezcla de gases insolubles en el líquido, y que por tanto no se transfieren) y el vapor procedente del líquido. Para el sistema aire-agua, en la fase líquida no hay transferencia de materia dado que es un líquido puro y no existe fuerza impulsora para la transferencia de materia, la cual solo tiene lugar en el gas, en uno u otro sentido y perpendicular a la interfase. La transmisión de calor es provocada principalmente por dos motivos uno de ellos es por el gradiente de temperatura que puede existir entre las dos fases, sin implicar cambio de estado (calor sensible). Y el otro se relaciona a la liberación o

captación de calor latente debido al cambio de estado del componente del líquido (Marcilla, 2002).

II.1.1 Conceptos de humidificación

La operación de Humidificación implica transferencia de materia entre una fase líquida pura y un gas permanentemente que es casi insoluble en el líquido. Esta operación es relativamente sencilla dado que el líquido contiene solamente un componente y no hay gradientes de concentración ni resistencia a la transferencia de materia en la fase líquida (McCabe, 2002).

Para entender los principios de la operación de humidificación se definen los siguientes términos:

- ❖ Humedad absoluta (Y'), es la masa de vapor de agua que acompaña a la unidad de masa de aire seco. Se expresa en kilogramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco. Aplicando la ley de los gases ideales podemos formularla como:

$$Y' = Y \frac{M_A}{M_B} = \frac{p_A}{p_t - \bar{p}_A} \frac{M_A}{M_B} [=] \frac{\text{masa A}}{\text{masa B}} \quad (1)$$

- ❖ Humedad molar absoluta (Y), son los moles de vapor de agua que acompaña a la unidad molar de aire seco. Se expresa mediante la siguiente fórmula aplicando la ley de los gases ideales:

$$Y = \frac{y_A}{y_B} = \frac{p_A}{\bar{p}_B} = \frac{p_A}{p_t - \bar{p}_A} [=] \frac{\text{moles A}}{\text{moles B}} \quad (2)$$

- ❖ Humedad molar absoluta más saturación (Y_s), es la humedad molar si se tuviera condiciones de saturación a la temperatura de bulbo seco de la mezcla gas-vapor.

$$Y_s = \frac{p_A}{p_t - \bar{p}_A} \quad (3)$$

- ❖ Humedad absoluta en saturación (Y'_s), es la humedad absoluta de la mezcla si se tuvieran condiciones de saturación a la temperatura de bulbo seco de la mezcla gas-vapor.

$$Y'_S = Y_S \frac{M_A}{M_B} \quad (4)$$

- ❖ Humedad relativa (Hr), es la razón de la presión parcial del vapor de agua en el aire a la correspondiente presión de saturación a la misma temperatura.

$$Hr = \frac{\bar{p}_A}{p_A} \quad (5)$$

- ❖ Saturación por ciento (%S), es definido como el cociente entre la humedad absoluta y la humedad absoluta en saturación multiplicado por cien, donde los valores de saturación se calculan a la temperatura de bulbo seco.

$$\%S = \frac{Y}{Y'_S} (100) \quad (6)$$

- ❖ Volumen húmedo (V_H), el volumen húmedo de una mezcla vapor-gas es el volumen de masa unitaria de gas seco y de su vapor acompañante a la temperatura y presión dominante.

$$V_H = 8315 \left(\frac{1}{M_B} + \frac{Y'}{M_A} \right) \frac{273 + t_G}{p_t} [=] \frac{m^3}{kg}; t_G = ^\circ C; p_t = \frac{N}{m^2} \quad (7)$$

- ❖ Calor húmedo (C_s), es el calor que se requiere para aumentar la temperatura de la masa unitaria del gas y su vapor acompañante $1^\circ C$ a presión constante.

$$C_s = C_B + Y' C_A \quad (8)$$

- ❖ Entalpia de la mezcla (H'), es una masa unitaria de gas seco más la entalpia de su acompañante.

$$H' = Cs (t_G - t_0) + Y' \lambda_0 \quad (9)$$

- ❖ Temperatura de bulbo seco (T_G), es la temperatura de la mezcla vapor-gas determinada de forma ordinaria por inmersión de un termómetro en la mezcla.
- ❖ Temperatura de bulbo húmedo (T_w), es la temperatura de entrada en estado estacionario y no de equilibrio que se alcanza cuando se pone en contacto una pequeña cantidad de agua con una corriente continua de gas en condiciones adiabáticas.
- ❖ Punto de rocío, es la temperatura que alcanza una mezcla vapor-gas, cuando se enfría a presión constante, por debajo de la cual se forma la primera gota de vapor condensado persistiendo las condiciones de saturación.

Estos conceptos son de gran relevancia para el estudio de las operaciones de humidificación.

II.1.2 Diagrama psicrométrico

Mientras que pueden prepararse cartas psicrométricas para cualquier mezcla gas vapor cuando las circunstancias lo exigen, el sistema aire agua aparece con tanta frecuencia que se cuenta con cartas muy completas para esta mezcla (Treybal, 1994).

Una carta psicrométrica, es una gráfica de las propiedades del aire, tales como temperatura, humedad relativa, volumen, presión, etc. Las cartas psicrométricas se utilizan para determinar, cómo varían estas propiedades al cambiar la humedad en el aire. Existen diversos tipos de cartas psicrométricas, cada una con sus propias ventajas. Algunas se hacen para el rango de bajas temperaturas, algunas para el rango de media temperatura y otras para el rango de alta

temperatura. A algunas de las cartas psicrométricas se les amplía su longitud y se recorta su altura; mientras que otras son más altas que anchas y otras tienen forma de triángulo. Todas tienen básicamente la misma función; y la carta a usar, deberá seleccionarse para el rango de temperaturas y el tipo de aplicación (ASHRAE, 2009)

La Figura 1 representa el diagrama psicrométrico para la mezcla aire y vapor de agua a la presión atmosférica normal. En este diagrama se representa la temperatura en °C como abscisa y la humedad absoluta dada en kilogramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco en las ordenadas, calculada la humedad relativa del 100% o curva de saturación, en donde se obtiene la humedad del aire saturado en función de su temperatura.

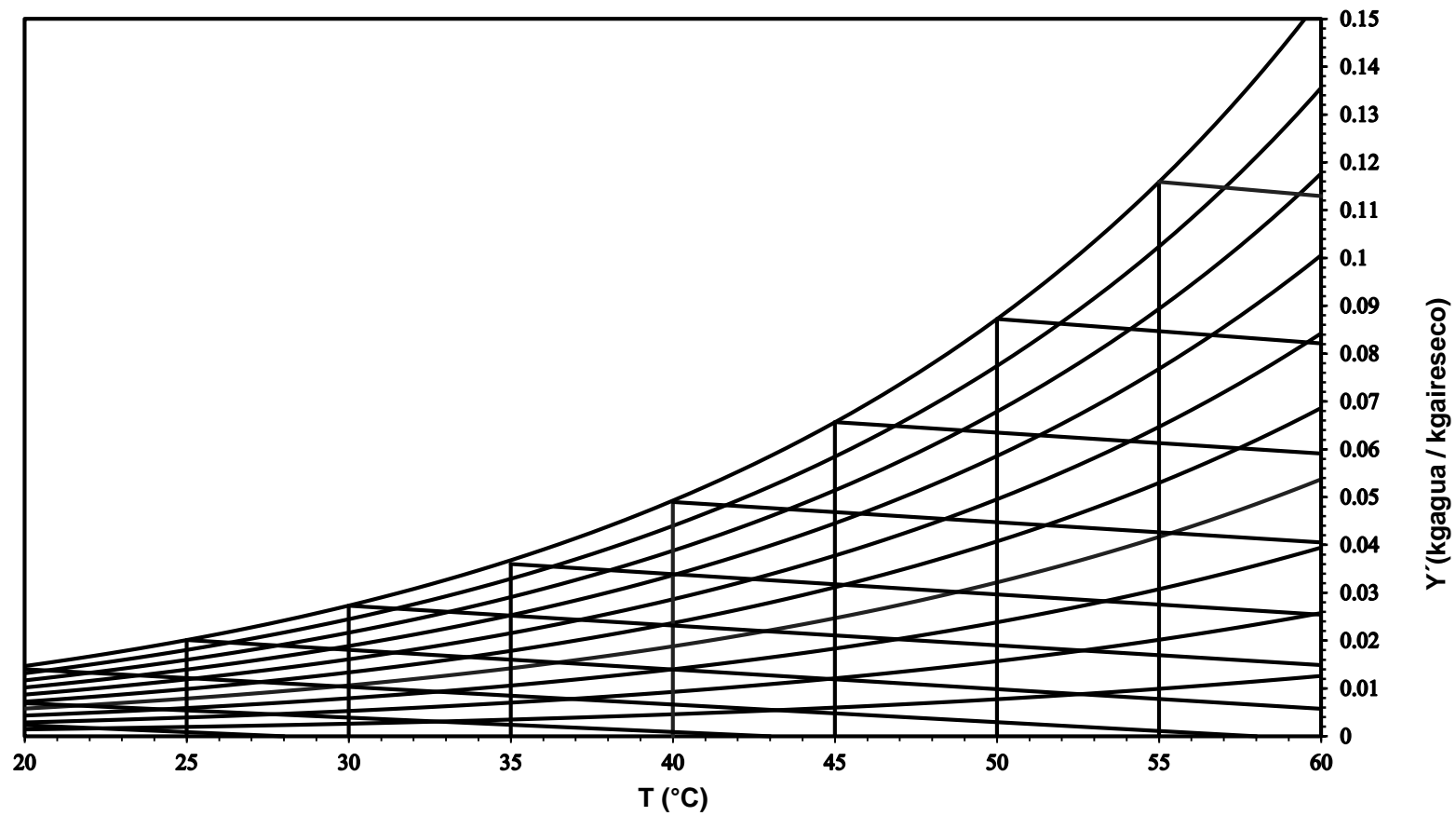


Figura 1. Diagrama psicrométrico para la mezcla aire y vapor de agua a la presión atmosférica normal.

Los puntos localizados a la izquierda de la curva de saturación representan mezclas de aire saturado con agua en estado líquido, lo que provoca bruma y son condiciones muy inestables. Cualquier punto localizado a la derecha de la curva de saturación, representa una mezcla bien definida de aire y vapor de agua. La Figura 2 representa las diferentes zonas dentro del diagrama psicrométrico. (Pilatosky Figueroa, 2002).

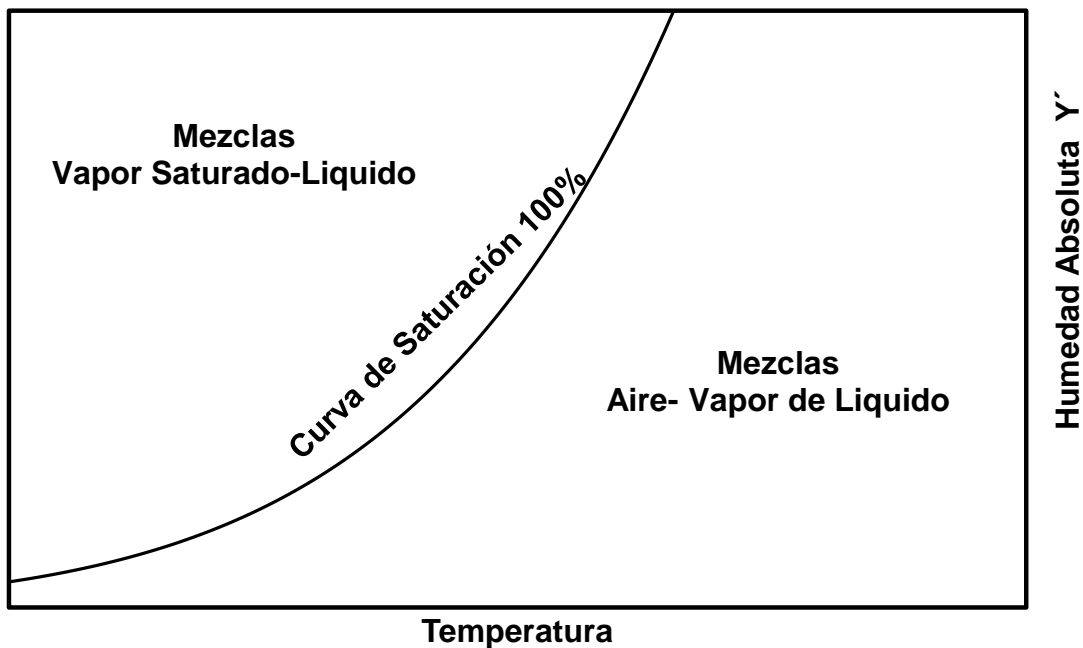


Figura 2. Localización de las diferentes zonas en un diagrama psicrométrico.

En una carta psicrométrica se encuentran todas las propiedades del aire, de las cuales las de mayor importancia son la temperatura de bulbo seco, la temperatura de bulbo húmedo, el punto de rocío, la humedad relativa, humedad absoluta, entalpía y volumen específico.

La temperatura de bulbo seco como ya sabemos, es la temperatura medida con un termómetro ordinario. Esta escala es la horizontal (abscisa), en la parte baja de la carta, según se muestra en la Figura 3 Las líneas que se extienden

verticalmente, desde la parte baja hasta la parte alta de la carta, se llaman líneas de temperatura de bulbo seco constantes (Pilatosky Figueroa, 2002).

La temperatura medida con un termómetro de bulbo húmedo es la temperatura que resulta cuando se evapora el agua de la mecha, que cubre el bulbo de un termómetro ordinario. Como se muestra en la Figura 3. Las líneas de temperatura de bulbo húmedo constantes o líneas de bulbo húmedo, corren diagonalmente de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, en un ángulo de aproximadamente 30° de la horizontal (ASHRAE, 2009).

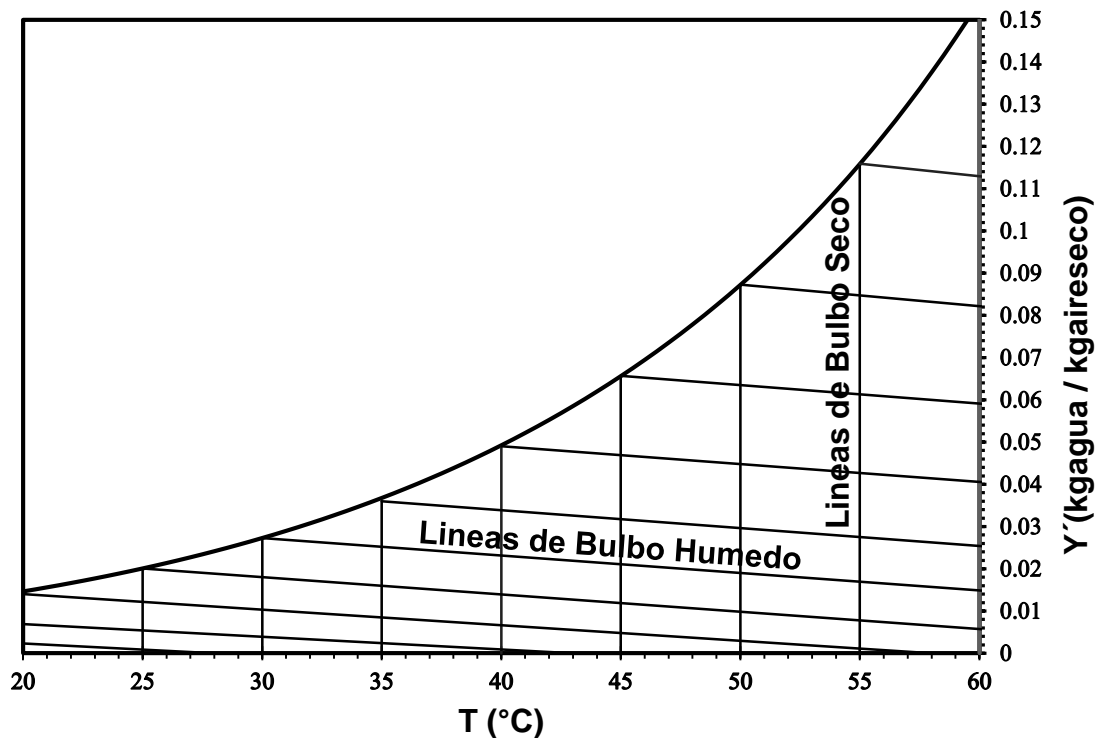


Figura 3. Representación de líneas de bulbo seco y líneas de bulbo húmedo en un diagrama psicrométrico.

Las curvas localizadas entre el eje de las abscisas y la curva de saturación corresponden a las isolinneas de humedad relativa cuyo valor disminuye mientras

más se alejan de la curva de saturación. La Figura 4 representa las líneas de humedad relativa (Pilatosky Figueroa, 2002).

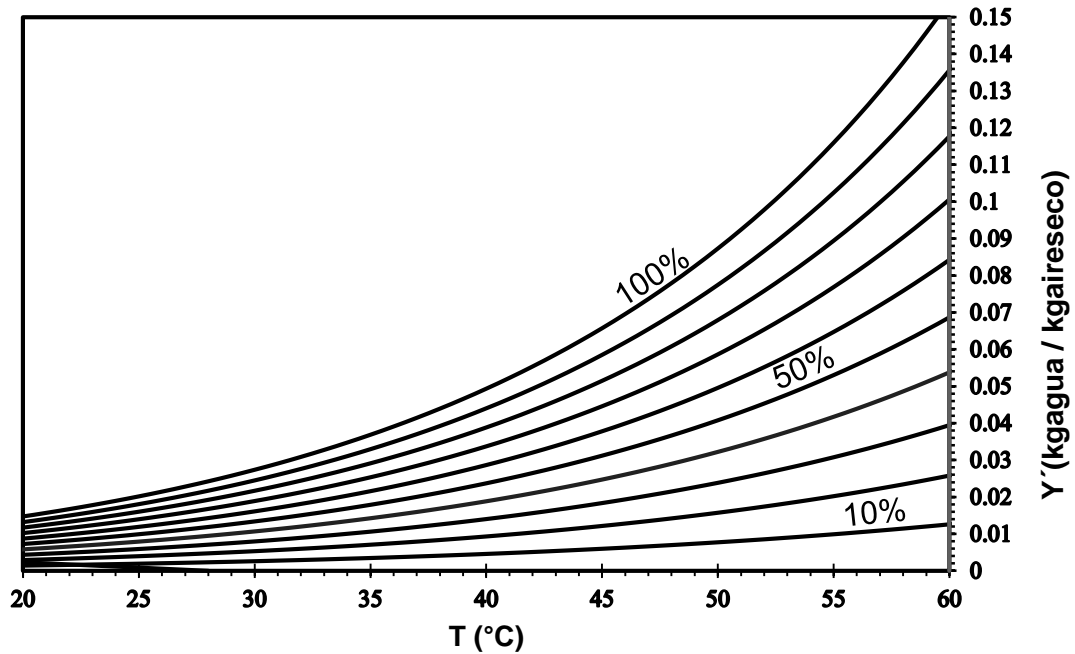


Figura 4. Representación de las isólineas de humedad relativa.

Además de las isólineas anteriores existen gráficas auxiliares que permiten la determinación de otras propiedades, tales como: el calor húmedo, volumen saturado y volumen seco, así como la entalpía de saturación. La localización de estas gráficas sobre el diagrama psicrométrico es muy variable. Como se puede observar en la mayoría de los diagramas psicrométricos su construcción está basada para una presión de 1 atm, sin embargo, puede emplearse para otras presiones, por medio de un factor de corrección, que consiste en multiplicar los valores obtenidos de las humedades relativas en el diagrama por la relación entre la presión de operación y la presión a que se ha construido el diagrama (ASHRAE, 2009).

II.2 Aplicaciones de la Operación de Humidificación del Aire

Los procesos de humidificación pueden llevarse a cabo para controlar la humedad de un espacio o bien, La deshumidificación por lo general se practica como un paso de los sistemas de acondicionamiento de aire, también puede utilizarse como parte de un sistema de recuperación de disolventes, pero en estas aplicaciones el vapor condensado no es agua sino un disolvente como el tricloroetileno, benceno o metanol. Cualquiera de estas aplicaciones en principio puede llevarse a cabo en piezas de equipos similares. Las direcciones de transferencia de masa y calor se determinan mediante la relación entre la humedad y temperatura de fase gaseosa de entrada y la temperatura del líquido de contacto (Foust, 1969).

La humidificación es simplemente la adición de agua al aire. No obstante, la humedad ejerce una poderosa influencia sobre los factores ambientales y fisiológicos. Unos niveles inadecuados de humedad (tanto muy altos como muy bajos) pueden causar incomodidad a las personas y pueden dañar muchos tipos de equipos y materiales. El tipo adecuado de equipamiento de humidificación puede ayudar a conseguir un control de la humedad eficaz, económico y sin problemas. El aire seco puede producir un gran número de problemas, todos ellos costosos, molestos e incluso peligrosos, especialmente si procesa o maneja materiales higroscópicos como madera, papel, fibras textiles, piel o productos químicos. El aire seco o la humedad fluctuante pueden ser causa de problemas graves de producción o de deterioro de los materiales. El aire seco también puede influir negativamente en los materiales higroscópicos de museos, escuelas, bancos, iglesias y edificios de oficinas (Armstrong International, 2015).

Las industrias deben tener equipos de humidificación para mantener las condiciones necesarias para la fabricación de sus productos, en la industria alimentaria en la fabricación de galletas esponjosas, livianas y tiernas, se debe mantener el aire a 75% de humedad relativa y permitir que la galleta leude sin

secarse. En la producción de queso, los almacenes de quesos necesitan mantener una alta humedad de 95% de humedad relativa para evitar que el queso se seque, forme una costra y se quiebre durante el proceso de maduración. Durante la fabricación de dispositivos explosivos, como municiones, pirotecnia o bengalas, la falta de control de la descarga eléctrica estática representa un alto riesgo para los materiales combustibles que se procesan. Al mantener una humedad de 55% de humedad relativa se evita la acumulación de estática, ya que la humedad actúa como conductor y disipa cualquier carga eléctrica ocasionada por la fricción. En el cultivo de hongos se utilizan humidificadores a fin de mantener la humedad ambiente en el nivel óptimo de 95% de humedad relativa. Estos son algunas aplicaciones que se le dan a la operación de humidificación de aire (JS Humidifiers, 2003).

II.2.1 Aplicaciones de las torres de enfriamiento de agua

Las torres de enfriamiento son de gran utilidad en las actividades industriales, pues en un sinnúmero de procesos es necesario el enfriamiento para dar continuidad y productividad a la industria. Las aplicaciones industriales donde intervienen las torres de enfriamiento son en procesos térmicos de la industria química, alimenticia, minera, en plantas termoeléctricas así como en procesos de separación. Dependiendo de la cantidad de energía que se quiera retirar del proceso se dimensiona la capacidad de evaporación de agua en las torres, con ello es posible encontrar en el mercado una gran variedad de tamaños, modelos y tipos de torres de enfriamiento.

La selección cae dentro del ámbito económico, con el diseño evaluado la pérdida de agua de enfriamiento inherente al contacto aire-agua, contra el costo de suministro y manejo de la fuente de enfriamiento al enfriador de superficie y el mayor costo de las unidades de superficie (Foust, 1969).

El aire y el agua son sustancias de bajo costo, y cuando se deben manejar grandes volúmenes, como en muchas operaciones de enfriamiento de agua es

esencial el equipo de costo inicial bajo y de costo de operación también reducido. Con frecuencia el armazón y el empaque interno son de abeto de Douglas, o bien de pino, material que es muy durable cuando se tiene un contacto continuo con agua. Es común la impregnación de la madera, bajo presión, con fungicidas como creosota, pentacloro fenoles, cromato acido de cobre y similares. Generalmente el entablado de los costados de la torre es de pino, cemento de asbesto, poliéster reforzado con vidrio y similares. Se han construido torres completamente de plástico. Generalmente, el empaque interno (“llenado”) es una forma modificada de cañas, enrejados horizontales arreglados en forma escalonada con filas alternadas a ángulos rectos. El empaque de plástico puede ser polipropileno, moldeado en forma de enrejado o alguna otra forma. Se utilizan muchos arreglos. El espacio vacío es muy grande, generalmente mayor del 90%, con el fin de que la caída de presión del gas sea lo más pequeña posible. En consecuencia, la interfase aire-agua no solo incluye la superficie de las películas líquidas que humedecen los enrejados (u otro empaque), sino también la superficie de las gotas que caen como lluvia desde cada fila de empaque hacia la siguiente (Treybal, 1994).

II.2.2 Tipos de torres de enfriamiento

Las torres de enfriamiento se clasifican según la forma en que se alimenta el aire, como a continuación se muestra (Sulvaran Aguirre, 2013).

1. Torres de circulación natural

- a) Atmosféricas: El movimiento del aire depende del viento y del efecto aspirante de los aspersores. Se utiliza en pequeñas instalaciones. Depende de los vientos predominantes para el movimiento del aire.
- b) Tiro natural: El flujo del aire necesario se obtiene como resultado de la diferencia de densidades, entre el aire más frío del exterior y húmedo del interior de la torre. Utilizan chimeneas de gran altura para obtener el tiro

deseado. Debido a las grandes dimensiones de estas torres se utilizan flujos de agua de más de 200000gpm.

2. Torres de tiro mecánico

El agua caliente que llega a la torre es rociada mediante aspersores que dejan pasar hacia abajo el flujo del agua a través de unos orificios .El aire utilizado en la refrigeración del agua es extraído de la torre de cualquiera de las formas siguientes:

- a) Tiro inducido: el aire se succiona a través de la torre mediante un ventilador situado en la parte superior de la torre. Son las más utilizadas. La Figura 5 muestra un esquema representativo de sus componentes.

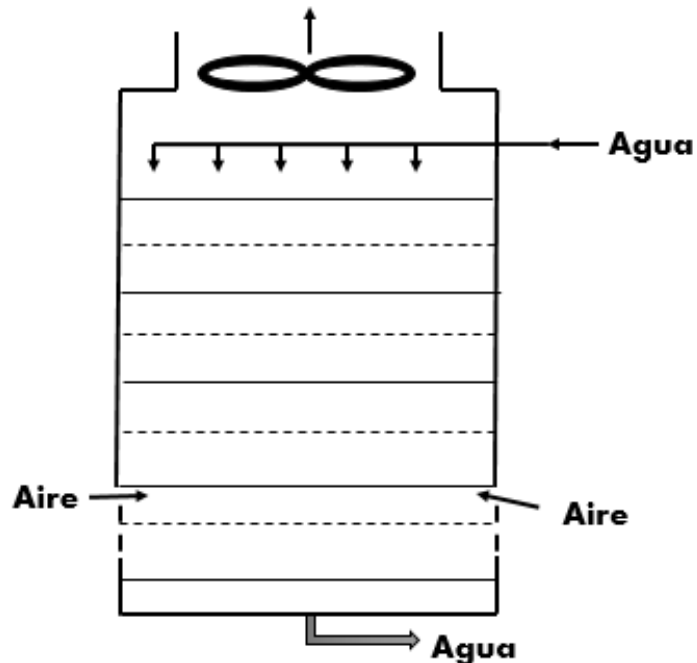


Figura 5. Torre de enfriamiento tiro inducido.

Fuente: Treybal, 1994.

- b) Tiro forzado: el aire es forzado por un ventilador situado en la parte inferior de la torre y se descarga por la parte superior.

Estas torres están sujetas particularmente a la recirculación del aire caliente y húmedo que es descargado, dentro de la toma del ventilador, debido a la baja velocidad de descarga y que materialmente reduce la efectividad de la torre. Las torres también llamadas a contracorriente tienen un área de presión menor que las de flujo cruzado pero requieren altura adicional, altura estática y cabeza dinámica para alcanzar el mismo efecto de enfriamiento.

3. Otros tipos:

1. Torres de flujo cruzado. El aire entra por los lados de la torre fluyendo horizontalmente a través del agua que cae. Estas torres necesitan más aire y tienen un coste de operación más bajo que las torres a contracorriente.

Las torres a flujo cruzado contienen una configuración del relleno a través de la cual el aire se mueve horizontalmente a través del agua que cae. Las torres de flujo cruzado utilizan esencialmente toda la altura de la torre para las rejillas de ventilación, reduciendo la velocidad de entrada del aire, y minimizando la recirculación y pérdida de tiro.

II.3 Componentes de una Torre de Enfriamiento

Para un mejor análisis de una torre de enfriamiento se estudiara cada uno de los componentes de esta por separado.

II.3.1 Distribuidor del líquido

El agua de entrada a la torre puede ser distribuida por dos formas, uno es por un flujo gravitatorio y el otro es a presión.

1. Flujo gravitatorio: comúnmente se emplea un recipiente o colector ubicado en la parte superior de la unidad, completamente abierto al ambiente para facilitar la inspección, limpieza y mantenimiento. Aquí el agua es

bombéada hasta el colector, de donde fluye por gravedad a través de boquillas removibles que pueden ser de plástico o porcelana situados en el fondo del colector. Como la salida a través de las boquillas es en forma de chorros se colocan platos de salpicadura en la parte inferior de los respectivos chorros, para descomponerlos en gotas que caerán posteriormente sobre la empaquetadura o relleno de la torre.

2. Presión: cuando se emplea este método el agua se introduce a presión a través de boquillas que atomizan el agua en vez de formar gotas como en el caso anterior. En esta forma el líquido ofrece mayor área de contacto efectivo al aire que circula, presentándose la desventaja de que si no se hace una selección adecuada de la boquilla las gotas atomizadas pueden ser arrastradas por el flujo de aire sin poder ser atrapados por los separadores de gotas.

II.3.2 Empaques o rellenos

Los empaques o rellenos de una torre de enfriamiento son elementos de formas geométricas que se colocan adecuadamente en el interior de la unidad y su función principal es aumentar la superficie de contacto disponible ya sea distribuyendo el líquido o retardando la caída de las gotas a través del equipo. Idealmente estos deben ser de bajo costo y fácil instalación. Ahora desde el punto de vista del diseño estos deben proveer un alto coeficiente de transferencia de masa y calor, además de baja resistencia al flujo de aire. Y pueden estar hechos de tableros de piel, bloques huecos de arcilla cocida, laminas metálicas, asbesto-cemento, plásticos o rejillas especiales (Elonka, 1983).

Empaques al azar: estos se arrojan en la torre durante la instalación y se dejan caer en forma aleatoria. En el pasado se utilizaron materiales fácilmente obtenibles.

Empaques Regulares: ofrecen las ventajas de una menor caída de presión para el gas y un flujo mayor, generalmente a expensas de una instalación más costosa que la necesaria para los empaques aleatorios.

II.3.3 Eliminador de arrastre

El eliminador de arrastre puede ser del mismo material del empaque. Es para evitar que se pierdan pequeñas cantidades de agua por arrastre y a diferencia de la pérdida por evaporación, esta puede reducirse con un buen diseño.

II.3.4 Ventilador

Los tipos de ventilador que se utilizan para torres de enfriamiento de tiro inducido, con flujos a contra-corriente son los de flujo axial con varias aletas pueden ser fijas o de un Angulo de inclinación variable.

Un ventilador no automático de hojas ajustables puede ser usado en un amplio rango de potencias (kW) debido a que el ventilador puede ajustarse para enviar el flujo deseado de aire al más bajo consumo de energía o potencia de trabajo, los ventiladores automáticos pueden cambiar las condiciones de carga. (Elonka, 1983).

II.4 Sistema de Equilibrio Aire-Agua

En las operaciones de humidificación y deshumidificación la fase líquida es un solo componente puro. La presión parcial de equilibrio del soluto en la fase gaseosa es, por tanto, función exclusiva de la temperatura cuando la presión total del sistema se mantiene constante. Por otra parte, a presiones moderadas la presión parcial de equilibrio es casi independiente de la presión total y virtualmente igual a la presión de vapor del líquido. De acuerdo con la ley de Dalton la presión parcial de equilibrio puede convertirse en la fracción molar de equilibrio y , en la fase gaseosa. Puesto que el líquido es puro, x , es siempre la unidad. Los datos de equilibrio con frecuencia se presentan como gráficas de y ,

frente a la temperatura para una presión total dada, se muestra en la Figura 6 para el sistema aire-agua a 1 atm una gráfica de entalpía contra temperatura. (McCabe, 2002).

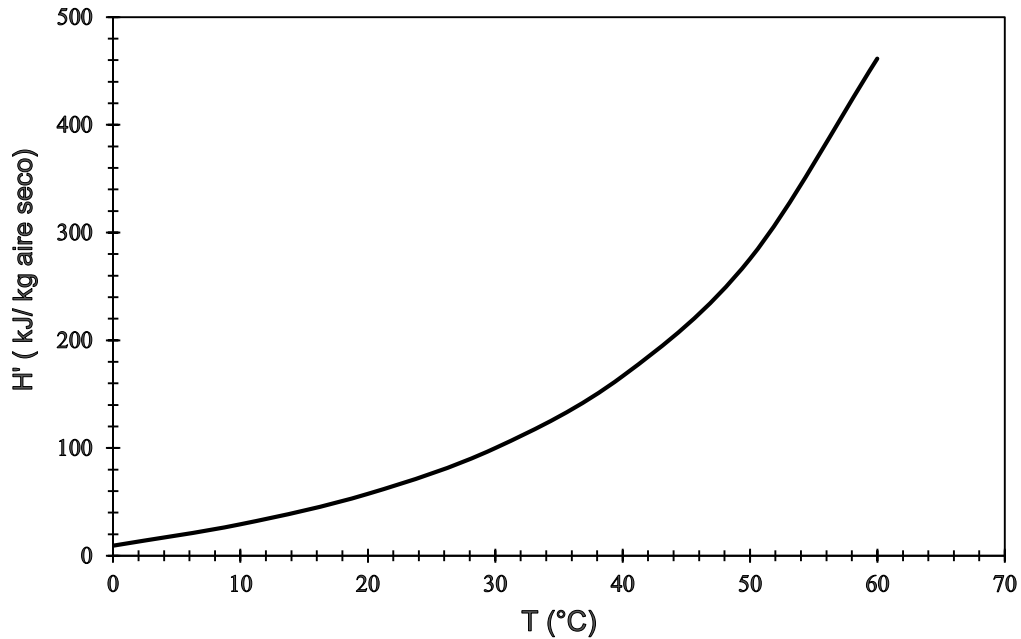


Figura 6. Equilibrio de sistema Aire-Agua.
Fuente: Treybal, 1994

II.5 Hidrodinámica en Torres Empacadas

En la mayoría de los empaques al azar, la caída de presión que sufre el gas es modificado por el flujo del gas y del líquido en forma similar a la que se muestra en la Figura 7. En la región entre A y B, la retención del líquido aumenta rápidamente con el flujo del gas, el área libre para el flujo del gas se reduce y la caída de presión aumenta más rápidamente. Esto se conoce como recargo. Cuando el flujo del gas aumenta hasta B a un flujo fijo del líquido, ocurre uno de los siguientes cambios: (1) una capa del líquido, a través de la cual burbujea el gas, puede aparecer en la parte superior del empaque; (2) el líquido puede llenar la torre, empezando por el fondo o por cualquier restricción intermedia, como el

soporte empacado, de tal forma que hay un cambio de gas disperso-líquido continuo a líquido disperso-gas continuo que se conoce como inmersión, o (3) las capas de espuma pueden elevarse rápidamente a través del empaque. Al mismo tiempo, el arrastre del líquido por el gas efluente aumenta con rapidez y la torre se inunda. No es práctico operar una torre inundada; la mayoría de las torres operan justamente por debajo o en la parte inferior de la región de recargo (Treybal, 1994).

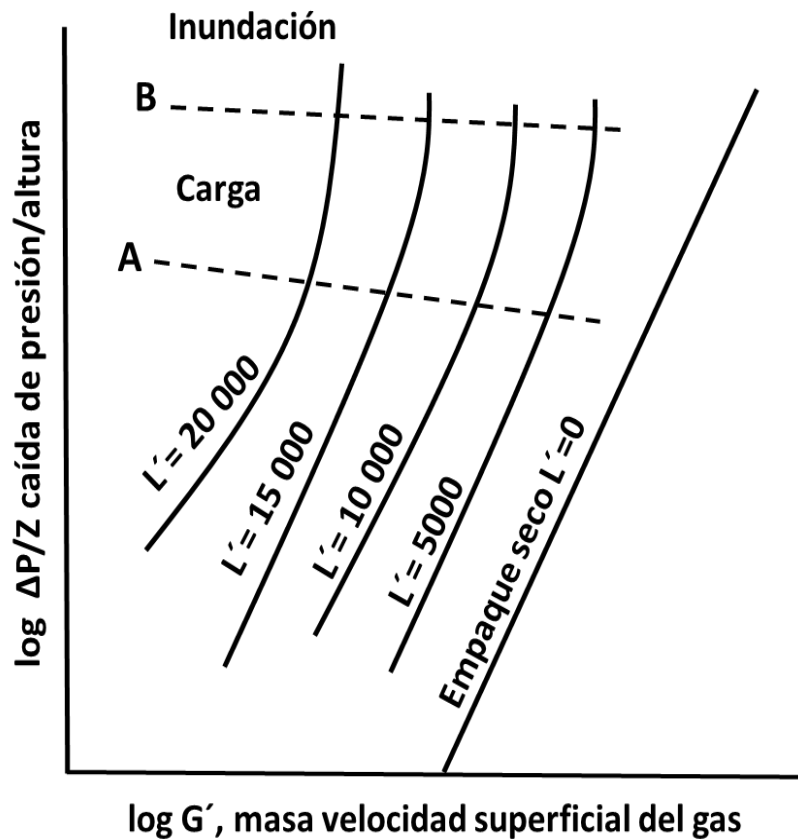


Figura 7. Caída de presión del gas típica para el flujo a contracorriente del líquido y el gas en empaques.

Fuente: Treybal, 1994

II.6 Relaciones Fundamentales para Operaciones Adiabáticas de Humidificación.

Las torres de enfriamiento tienen como finalidad enfriar una corriente de agua por vaporización parcial. Esto se logra con el consiguiente intercambio de calor sensible y latente entre una corriente de aire seco y frío y una corriente de agua caliente estas corrientes de aire y agua circulan en contraflujo por la torre de enfriamiento. Al entrar en contacto el aire con el agua se forma una fina película de aire húmedo saturado sobre la lámina de agua que desciende por el relleno. Esto es debido a que la presión parcial de vapor de agua en la película de aire es superior a la del aire húmedo que circula por la torre. Produciéndose una evaporación. La masa de agua evaporada extrae el calor latente de vaporización del propio líquido y el calor latente es cedido al aire, obteniéndose de esta manera un enfriamiento del agua y un aumento en la temperatura del aire. Otra manera de explicar el funcionamiento de una torre de enfriamiento es la siguiente: Cuando el líquido a una cierta temperatura T_L . Entra en contacto con el aire a temperatura T_G , donde la temperatura T_G es menor que T_L . La película del líquido que está en contacto directo con el líquido se evapora. Para que este líquido pueda cambiar de fase, necesita obtener energía de algún lugar disponible, la fuente más cercana es el seno del líquido. Por lo tanto, al tomar esta energía del líquido este disminuye su temperatura (Villa, 2009).

Tomando en cuenta las entradas y salidas, para una torre de sección transversal constante, como lo muestra la Figura 8, un balance global de materia sería:

$$L_2 - L_1 = G_2 - G_1 \quad (10)$$

Y un balance global de energía suponiendo que el calor retirado del agua es el mismo calor que adquiere el aire, el flujo de aire es constante por lo tanto G_2 es igual a G_1 obteniendo así a G_s :

$$Q_{perdido\ por\ el\ agua} = Q_{ganado\ por\ el\ aire} \quad (11)$$

Donde

$$Q_{\text{perdido por el agua}} = L_2 H_{L2} - L_1 H_{L1} \quad (12)$$

$$Q_{\text{ganado por el aire}} = G_s H'_{2} - G_s H'_{1} \quad (13)$$

Sustituyen la Ec. (12) y (13) en Ec. (11):

$$L_2 H_{L2} - L_1 H_{L1} = G_s H'_{2} - G_s H'_{1} \quad (14)$$

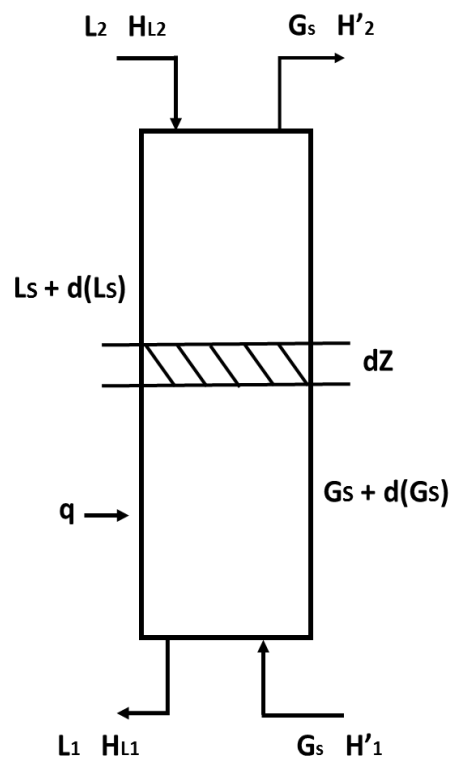


Figura 8. Balance de materia y energía en el interior de una torre de Enfriamiento, para una sección transversal determinada.

Generalmente la columna opera sin pérdidas de energía en el relleno, es decir trabaja Adiabáticamente, esta sección se encuentra suficientemente alejada de la pared, y la aproximación de la operación adiabática será más grande a medida que el área transversal de la torre sea mayor.

Las entalpías de la fase líquida se les puede representar de la siguiente manera.

$$H_{L2} = C_L(T_{L2} - T_0) \quad (15)$$

$$H_{L1} = C_L(T_{L1} - T_0) \quad (16)$$

Donde T_0 es una temperatura de referencia.

Las pérdidas son debido a la evaporación del líquido hacia el aire, recordando que cuando el aire sale de la torre de enfriamiento su humedad absoluta ha aumentado debido a la saturación interna en el relleno, estas pérdidas son menores al 5%. Por lo tanto se puede expresar lo siguiente:

$$L_2 \approx L_1 = L_s \quad (17)$$

Sustituyendo Ec. (15) y (16) en Ec. (14) y considerando Ec. (17):

$$L_s C_L (T_{L2} - T_{L1}) = G_s (H'_2 - H'_1) \quad (18)$$

Reagrupando términos:

$$\frac{L_s C_L}{G_s} = \frac{(H'_2 - H'_1)}{(T_{L2} - T_{L1})} \quad (19)$$

La Ec. (19) representa la pendiente de la línea de operación de una torre de enfriamiento, esta recta representa la trayectoria de las condiciones de fase a medida que el flujo pasa a través del relleno en la torre de enfriamiento.

II.6.1 Transferencia de calor por difusión y convección simultáneas para el relleno de una torre de enfriamiento.

En una torre de enfriamiento existen dos formas de transferir calor, convección y difusión del agua al aire.

$$q = q_d + q_c \quad (20)$$

Donde q_d es la transferencia de calor por difusión y q_c es la transferencia de calor por convección, donde el área de trabajo es el área transversal del relleno en la torre de enfriamiento y no la superficie que se forma en el volumen del relleno, superficie en la que se logra la transferencia de calor.

La Ec. (19) también se le puede representar en forma diferencial

$$\frac{L_S C_L}{G_S} = \frac{dH'}{dT_L} \quad (21)$$

Donde el único valor que es constante es el flujo de aire por unidad de área ya que el flujo de agua tiene una variación debido a la evaporación de este fluido, estas pérdidas se producen ya que el aire seco se satura al pasar por el interior de la torre, en esta existe una lluvia de agua en dirección contraria a la dirección del aire.

Acomodando

$$L_S C_L dT_L = G_S dH' = K_Y (H^* - H') adV \quad (22)$$

$$L_S C_L dT_L = G_S dH' = K_Y a (H^* - H') dZ \quad (23)$$

La Ec. (22) es la clave para el cálculo del diseño y el análisis para el comportamiento de las torres de enfriamiento. K_Y es el coeficiente global de transferencia de masa. Análoga a Coeficiente global de transferencia de calor (U_c) en los intercambiadores

de calor, debe recordarse que no existe factor de obstrucción para transferencia de calor por contacto directo. De esta manera se logra la transferencia de masa desde el fluido líquido a un fluido gaseoso. En las torres de enfriamiento el valor de “a” que es la superficie de contacto entre el agua y el aire, no puede determinarse directamente, ya que está compuesto de disposiciones al azar de gotas y de superficies de película (Kern Donald, 1999).

Para determinar el número de unidades de transferencia global despejamos e integramos la Ec. (23).

$$K_Y a \int_0^Z dZ = G_s \int_{H'_1}^{H'_2} \frac{dH'}{(H^* - H')} \quad (24)$$

Reacomodando:

$$Z = \frac{G_s}{k_Y a} \int_{H'_1}^{H'_2} \frac{dH'}{(H^* - H')} \quad (25)$$

Donde la integral de la parte derecha es el número de unidades de transferencia global.

$$N_{TOG} = \int_{H'_1}^{H'_2} \frac{dH'}{(H^* - H')} \quad (26)$$

Esta integral se puede resolver por el método gráfico o por un método numérico.

Para la obtención de la Altura global de una unidad de transferencia de entalpia del gas es igual a las constantes del lado derecho de a Ec. (24)

$$H_{TOG} = \frac{G_s}{K_Y a} \quad (27)$$

O bien:

$$H_{TOG} = \frac{Z}{N_{TOG}} \quad (28)$$

Con frecuencia se prefiere H_{TOG} en lugar de K_Ya , como una medida del comportamiento del empaque, puesto que depende menos de los flujos y tiene la sencilla unidad de longitud.

II.7 Eficiencia de Torre de Enfriamiento

La eficiencia de enfriamiento de estos equipos, está dada en general por la siguiente Ecuación:

$$\eta_t = \frac{\eta_{t,real}}{\eta_{t,ideal}} X 100 \quad (29)$$

El enfriamiento real, está dado por el rango de enfriamiento y el enfriamiento ideal está dado por la suma de rango de enfriamiento y la aproximación.

El rango de enfriamiento es la diferencia de la temperatura de entrada y la temperatura de salida y la aproximación es la diferencia entre la temperatura de salida y la temperatura de bulbo húmedo.

$$\eta_t = \frac{T_{L2}-T_{L1}}{(T_{L2}-T_{L1})+(T_{L1}-T_{w1})} X 100 = \frac{T_{L2}-T_{L1}}{T_{L2}-T_{w1}} X 100 \quad (30)$$

La aproximación definen los límites del rendimiento de una torre dada, es decir que si el agua se enfriara en una instalación ideal, la mínima temperatura que podría alcanzar sería la temperatura del bulbo húmedo, es decir la temperatura de salida sería igual a la temperatura de bulbo húmedo de entrada con lo que se obtendría una eficiencia máxima, por esta razón es perfectamente posible enfriar agua a valores de temperatura de salida menores que la temperatura de bulbo seco de entrada del aire.

De la misma manera se puede obtener la eficiencia para la humidificación del aire, estas se puede determinar de las siguientes formas:

$$\eta_t = \frac{T_{G1} - T_{G2}}{T_{G1} - T_{W1}} \times 100 \quad (31)$$

O utilizando las humedades absolutas

$$\eta_t = \frac{Y'_{1} - Y'_{2}}{Y'_{1} - Y'_{s}} \times 100 \quad (32)$$

III. Metodología Experimental

III.1 Diseño del Equipo

Los equipos de humidificación de aire y enfriamiento de agua vienen en diferentes configuraciones, las cuales varían según el tipo de flujo de aire, el tipo de depósito, e instalación del equipo y los materiales de construcción. Estas características y un gran número de factores en el diseño distinguen a un equipo de enfriamiento de otro.

El equipo de enfriamiento que se diseñó corresponde a una torre de enfriamiento de tiro inducido, dado que el aire es succionado por un ventilador colocado en la parte superior del equipo lográndose una distribución uniforme de aire a través del empaque. El flujo de agua es de manera descendente dentro de la torre. Dado este arreglo se clasifica como una torre de flujo a contracorriente ya que el flujo de aire y el flujo del agua se mueven en direcciones opuestas entre sí dentro de la torre, la Figura 9 ilustra el diseño de la torre de enfriamiento de tiro inducido y contracorriente.

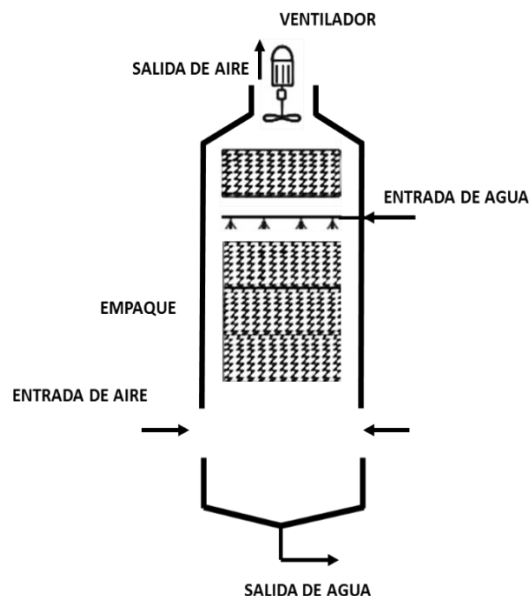


Figura 9. Torre de enfriamiento de tiro inducido y contracorriente.

III.1.1 Empaque de la torre

El elemento más importante de una torre de enfriamiento es la superficie de contacto para la transferencia de calor a la cual se le llama relleno o empaque. La efectividad del empaque radica en su capacidad de promover el contacto entre el aire y el agua con mínima resistencia al flujo de aire. El relleno utilizado en este equipo tiene como nombre comercial CoolPad y es el que muestra la Figura 10.

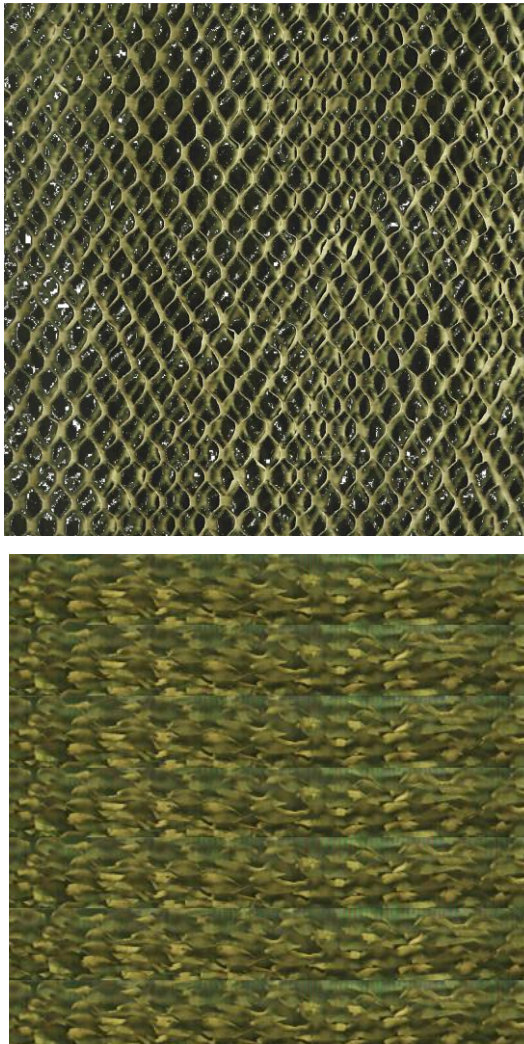


Figura 10. Empaque Coolpad.

Coolpad es un relleno de enfriamiento evaporativo que brinda una alta eficiencia de enfriamiento, las dimensiones del empaque son de un área de 625 cm^2 y una altura

de 47 cm, obteniendo un volumen de 29375 cm^3 , así mismo tiene una superficie interfacial específica de $0.38 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$, el procedimiento para determinar esta superficie aparece en el Anexo D.

III.1.2 Ventilador

Es un extractor ROBEL del modelo 008, este equipo extrae el aire de manera axial, tiene un diámetro de 21.60 cm de entrada y 21.2 de salida, además de un consumo de 0.7 A.

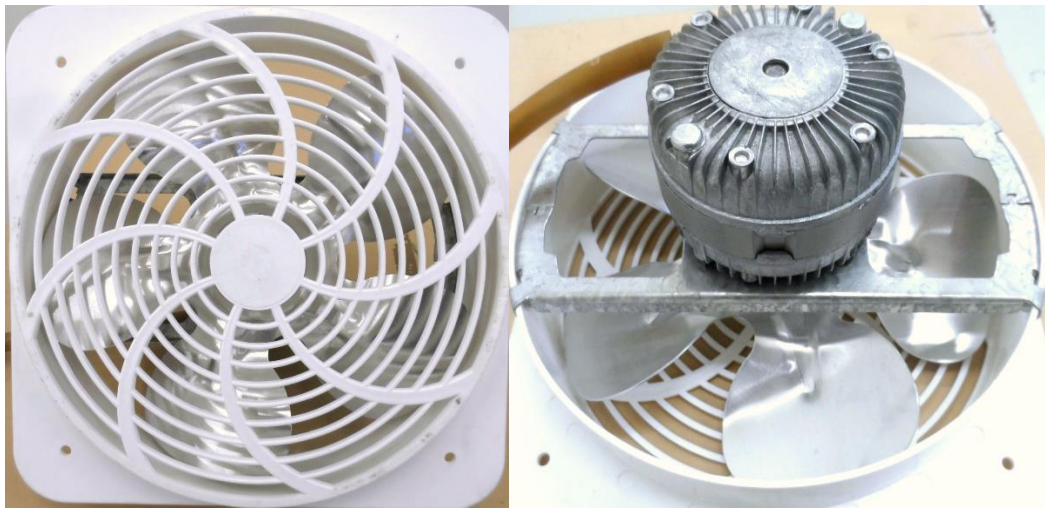


Figura 11. Extractor ROBEL modelo 008.

El extractor ROBEL 008 como se muestra en la Figura 11 es de cinco aspas fabricadas de aluminio, la garganta del extractor está fabricada de plástico haciéndolo muy ligero y práctico. Su diseño proporciona una entrada suave de aire al ventilador, lo cual aumenta la eficiencia y reduce así costos de energía.

III.1.3 Distribuidor de agua

El distribuidor de agua fue diseñado para proporcionar un esparcimiento de líquido uniforme sobre el empaque. El flujo de agua es introducido a presión y como se muestra en la Figura 12, los ocho tubos de plástico del distribuidor tienen cinco

orificios los cuales distribuyen el agua para ofrecer una mayor área de contacto efectivo al aire que circula.

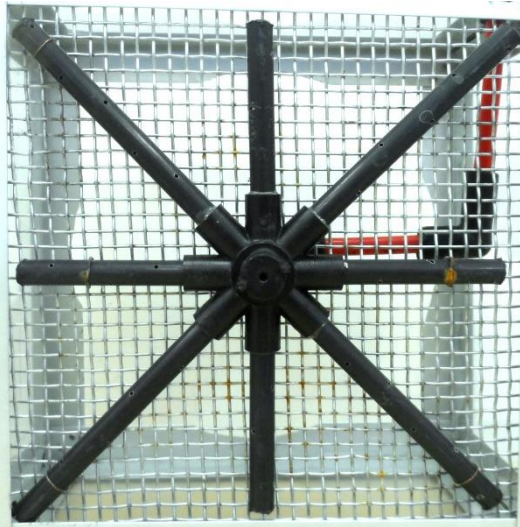


Figura 12. Distribuidor de agua.

III.1.4 Eliminador de rocío

El eliminador de arrastre es del mismo material del empaque Coolpad. Es un panel de coolpad de 25x25 cm de lados y 2.5cm de altura, eso ayuda a capturar las gotas de agua arrastradas por el flujo de aire. En la Figura 13 se muestra el eliminador de rocío que utiliza la torre empacada.

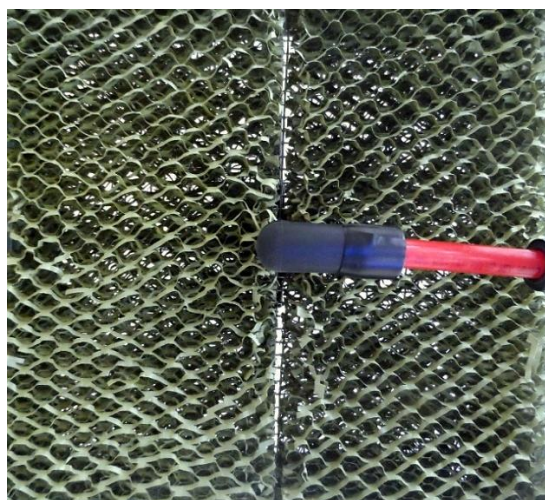


Figura 13. Eliminador de rocío Coolpad.

III.1.5 Calentador

Para aumentar la temperatura de entrada del líquido a la torre empacada de enfriamiento de agua se utiliza el grifo eléctrico lorenzetti que se observa en la Figura 14.



Figura14. Grifo eléctrico Lorenzetti.

El grifo eléctrico lorenzetti tiene una potencia de 4.5 kW, una tensión de 127 volts y un fusible de 40 amperes, se utiliza cable número 10, la presión mínima de trabajo es de 20 kPa y la máxima de 400 kPa, estas características son necesarias para su instalación.

III.1.6 Depósito de almacenamiento de agua

El diseño del tanque es para una capacidad de 20 litros está construido de un armazón de aluminio de 1" (ver Figura 15), y las paredes son de acrílico lo que hace visible los flujos de entrada y salida del depósito de agua.

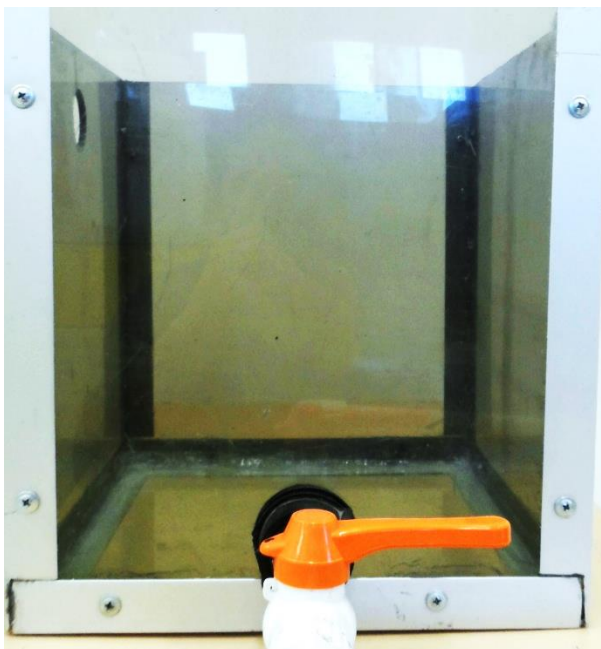


Figura 15. Depósito de agua de 20 L.

III.1.7 Bomba

La bomba MICROPUMP® modelo 75211-62 que aparece en la Figura 16, tiene una velocidad de salida de 90 a 9000 rpm que proporciona un caudal que va de 0 a 26.5 L/min.



Figura 16. Bomba MICROPUMP® modelo 75211-62.

Los mandos de las bombas contienen el motor del mando de la bomba y los controles del motor en una unidad compacta. Las cabezas de bomba MICROPUMP® están conectadas directamente al motor, que es accesible por el panel delantero. Además, estos mandos disponen de las características siguientes: motor de cojinetes de bolas para servicio continuo, tienen un arranque controlado, control de velocidad en una gama de 100:1, las bombas están acopladas magnéticamente al motor.

III.2 Construcción del Equipo

La construcción de la torre empacada para la humidificación de aire y enfriamiento de agua, fue dividida en tres piezas.

I. Parte superior

Para construir esta pieza se determinó que las dimensiones de ésta, las cuales son de 25 cm por cada uno de sus lados y 15 cm de altura, posteriormente con ayuda de una segueta se cortaron 12 ángulos de aluminio de 1", ocho de una longitud de 25 cm y los otros cuatro de 15 cm de longitud. Para unir los ángulos de aluminio se hicieron perforaciones en las esquinas de cada ángulo y fueron fijados con remaches de $\frac{1}{4}$ " como se muestra en la Figura 17.

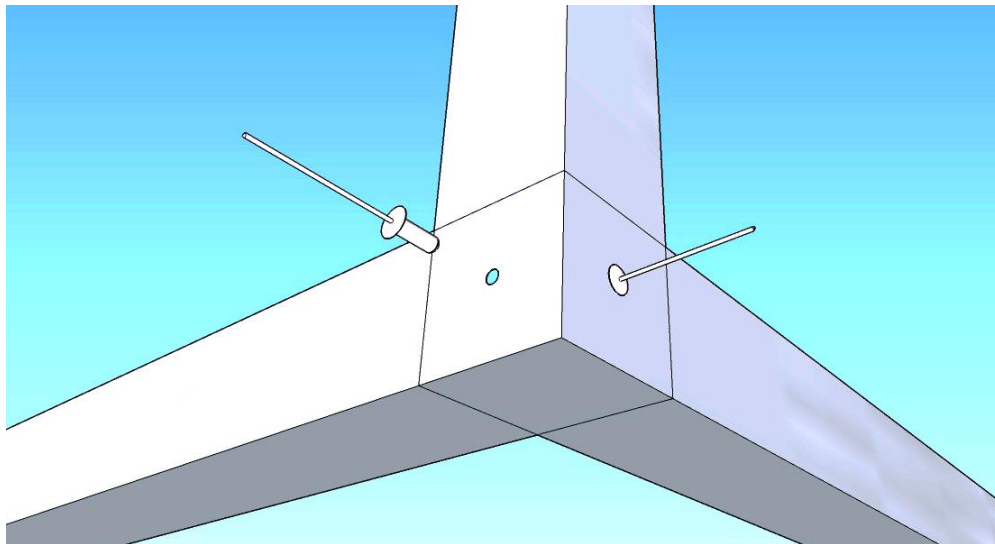


Figura 17. Unión de ángulos de aluminio con remaches de $\frac{1}{4}$ ".

Después de unir los ángulos y tener la estructura bien reforzada se procedió a colocar los cuatro vidrios con un sellador adhesivo 100% de silicona, así es como se obtuvo la primera pieza del equipo como se observa en la Figura 18.

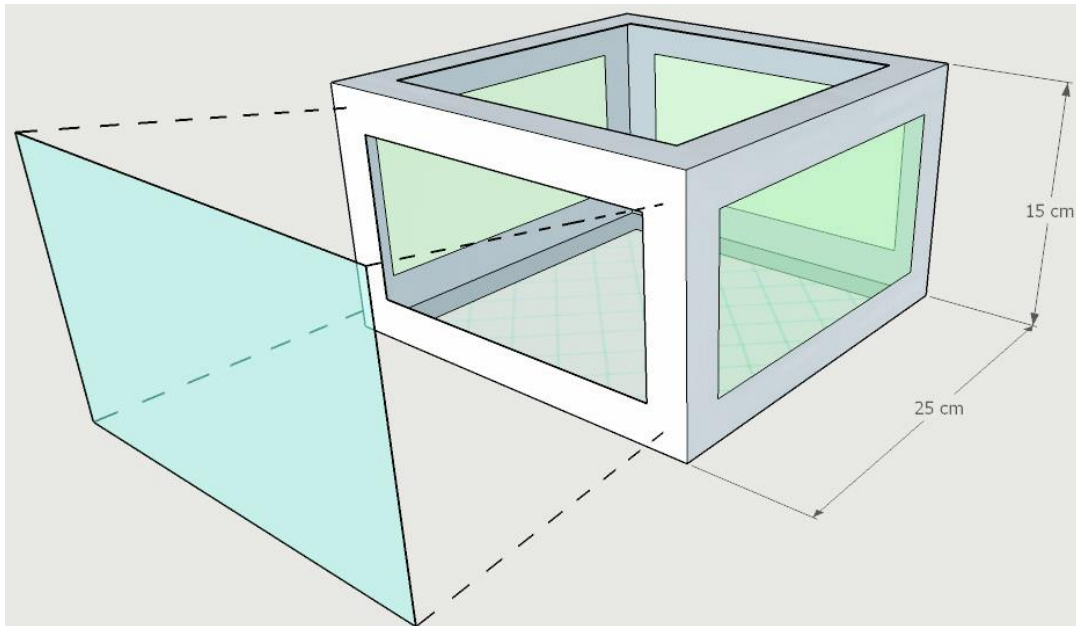


Figura 18. Pieza de la parte superior de la torre empacada.

II. Parte central

La parte central de torre es donde se encuentra el empaque coolpad, las dimensiones de esta estructura son de 25 cm por cada uno de sus lados y 50 cm de altura, para construir esta parte de la torre con una segueta se cortaron ocho ángulos de 1" con una longitud de 25 cm y cuatro de 50 cm. Para unir los ángulos de aluminio se hicieron perforaciones en las esquinas de cada ángulo y fueron fijados con remaches de ¼" (Ver Figura 19).

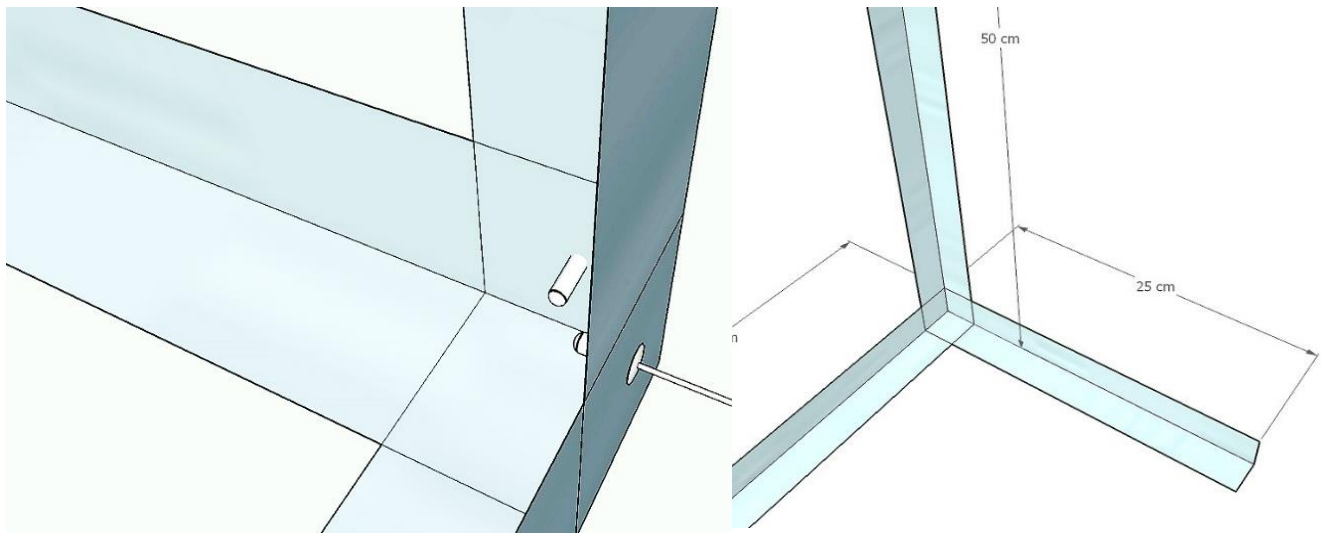


Figura 19. Unión ángulos para parte central de la torre.

Después de unir los ángulos y tener la estructura bien reforzada se procedió a colocar los cuatro vidrios con un sellador adhesivo 100% de silicona, teniendo lista la estructura de la parte central se introdujo el empaque coolpad como se observa en la Figura 20.

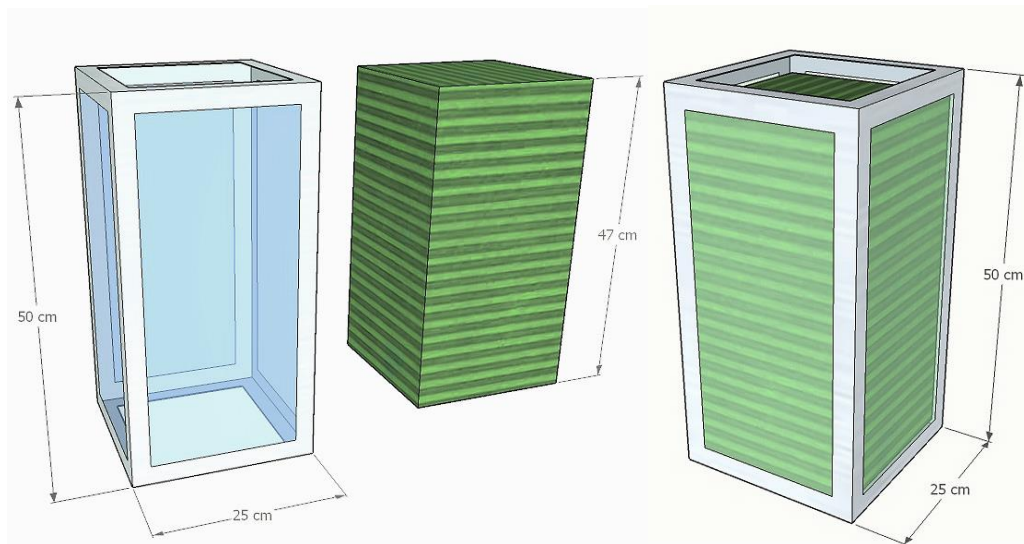


Figura 20. Pieza de la parte central de la torre empacada.

III. Parte inferior

La pieza inferior de la torre fue construida con ángulo de aluminio de 1", cuatro piezas cortadas con segueta de una longitud de 25 cm y otras cuatro de 15 cm de longitud. El fondo de esta pieza tiene una pequeña forma de pirámide cuadrangular invertida construida con lámina de aluminio, en cada una de sus esquinas tanto para el ángulo como para la lámina se llevaron a cabo perforaciones y fueron remachados con remaches de ¼" (ver Figura 21).

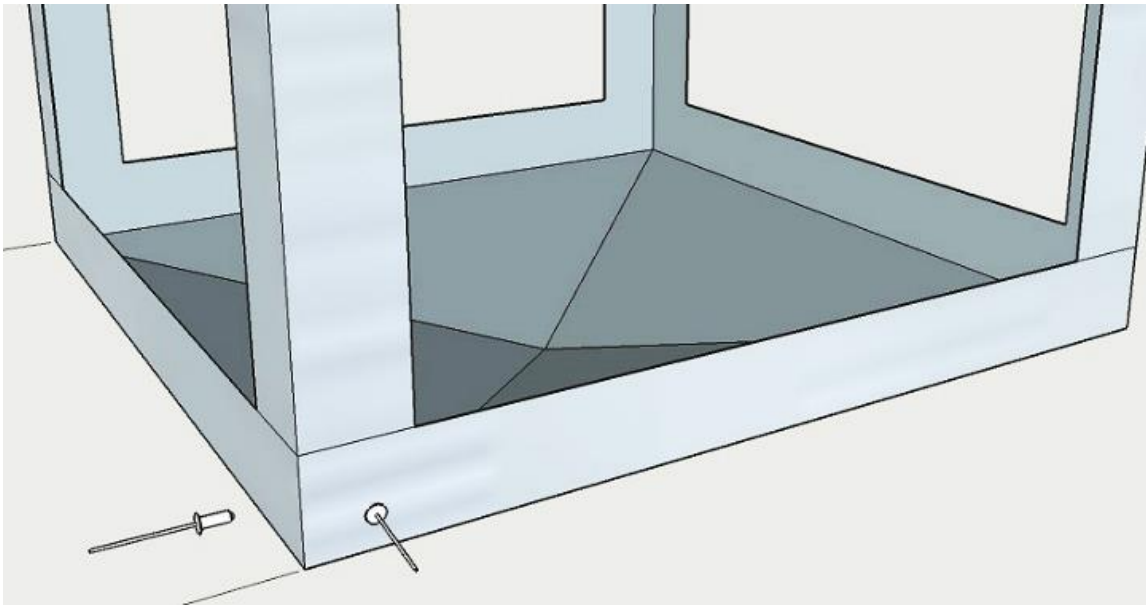


Figura 21. Ensamblado de parte inferior de la torre empacada.

Después de unir los ángulos y la lámina de aluminio se tiene una estructura bien reforzada y se procedió a colocar dos vidrios de manera que fueran paralelos, para incrustar los vidrios se utilizó un sellador adhesivo 100% de silicona. Las otras dos caras se les colocó lámina de aluminio de dimensiones 25x25 cm y 7 cm de altura, esto con el objetivo de dejar las ventanas para el flujo de entrada de aire. La pieza que se obtuvo se ve en la Figura 22.

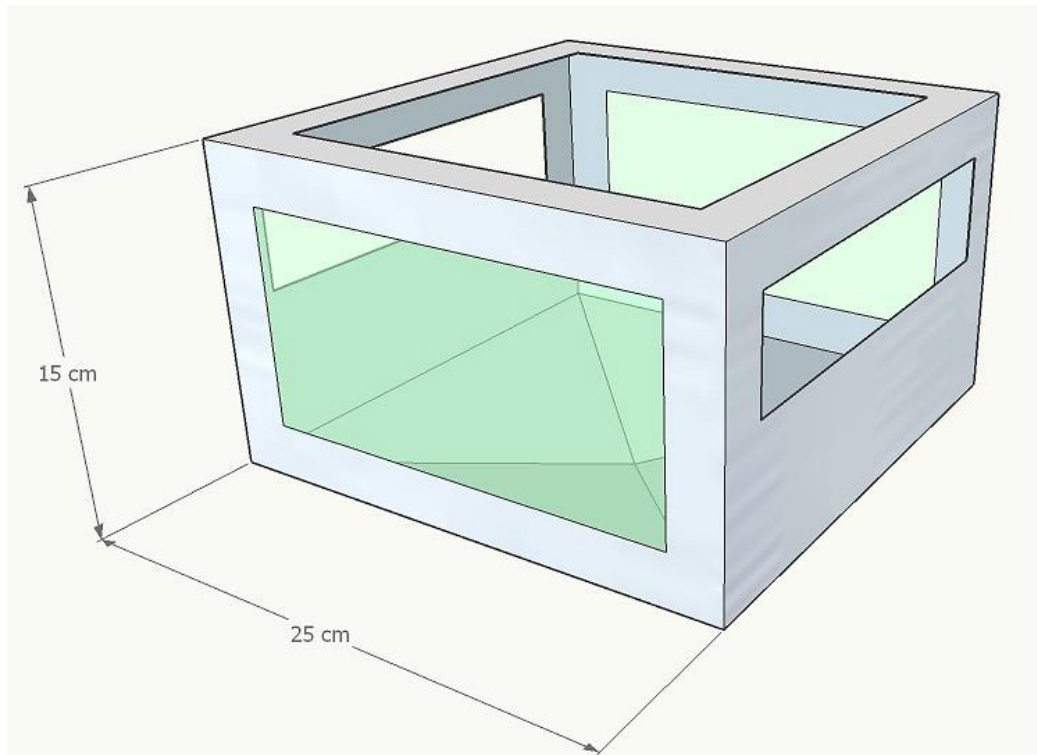


Figura 22. Pieza de la parte inferior de la torre empacada.

Estas tres piezas fueron unidas mediante tornillos de $\frac{1}{2}$ " para tener la torre empacada para la humidificación de aire y enfriamiento de agua de dimensiones 25x25 cm de lados y 80 cm de altura (ver Figura 23). A esta estructura se le construyó una base de fierro fabricada con cuatro PTR's de 1" que funcionan como patas de la base y están reforzadas con ángulo de aluminio de 1". A las patas se les adiciono tapones de goma de 1".

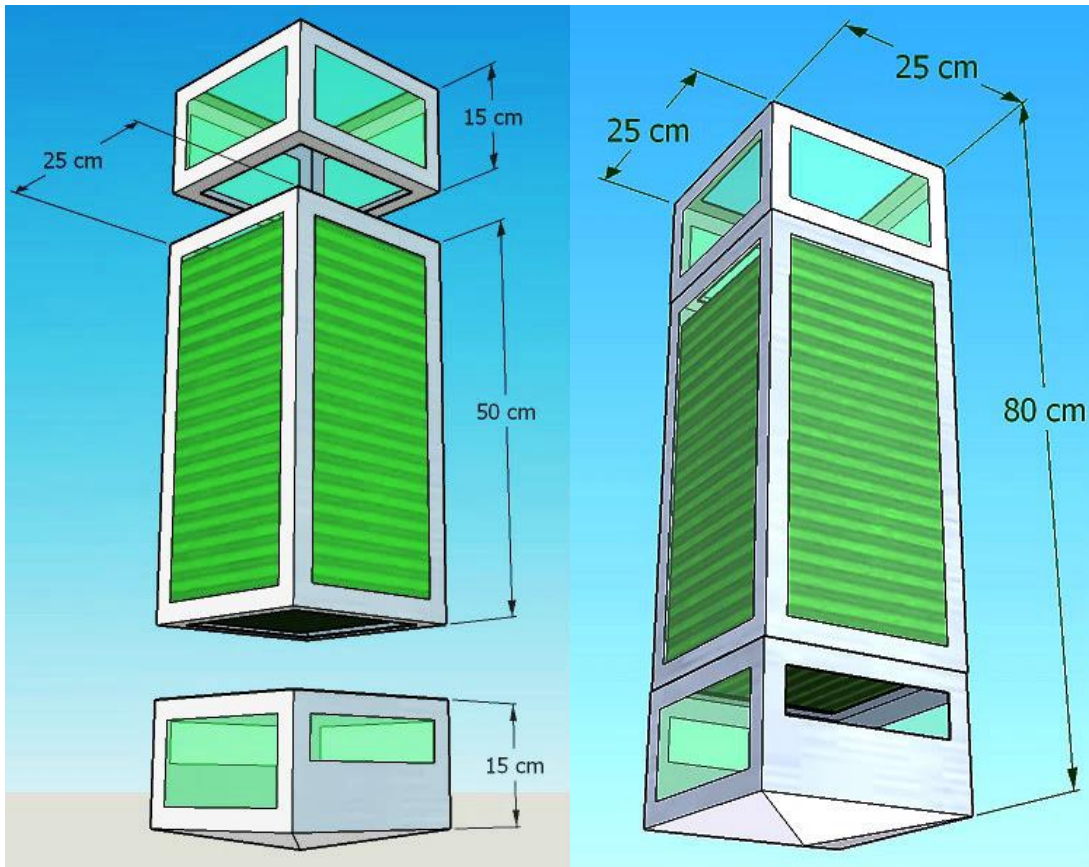


Figura 23. Torre empacada para la humidificación de aire y enfriamiento de agua.

IV. Equipamiento.

Después de haber construido el armazón y la base de la torre se empezó a armar, a la pieza inferior se le hizo un desagüe de 1" y se colocó sobre la base de metal construida, para unir la pieza inferior con la pieza central se colocó un empaque de hule para evitar las fugas, y se unieron las piezas con cuatro tornillos de ¼" colocados en las esquinas, se colocó una malla de aluminio y sobre estas el empaque coolpad de 47 cm de altura, para unir la pieza central con la pieza superior se utilizaron igualmente cuatro tornillos de ¼" colocados en las esquinas, donde se unen éstas dos piezas se colocó el distribuidor de agua fijado a una malla de aluminio, sobre esta malla está el eliminador de rocío coolpad. El distribuidor de agua está conectado a la tubería mediante una manguera Synflex Eclipse de 3/8"

que entra por la parte media de la pieza superior. Sobre la pieza superior está colocado el ventilador. El depósito de almacenamiento de agua se encuentra a un costado de la base de la torre, conectando la salida de agua de la torre y al depósito mediante tubería, de igual manera el depósito de almacenamiento de agua se conecta a la entrada de la bomba por medio de tubería, y la salida de la bomba se conecta por tubería con el grifo eléctrico, este grifo está conectado al distribuidor de agua mediante tubería.

V. Tubería

El arreglo de la tubería de la torre empacada se inicia en el depósito de agua, y tiene la siguiente trayectoria:

- a) El desagüe que es de 1" reduce a una rosca de $\frac{3}{4}$ ", a esta se le coloca una reducción macho-hembra de $\frac{3}{4}$ " a $\frac{1}{2}$ ".
- b) Enseguida se coloca un nipple de PVC de $\frac{1}{2}$ " que conecta a una válvula de bola del mismo material.
- c) A la salida de la válvula se le colocó un adaptador macho de $\frac{1}{2}$ " de PVC que se une con 10 cm de tubo hidráulico PVC RD 26 de $\frac{1}{2}$ ".
- d) Para cambiar de dirección se colocó un codo de 90° para seguir con 20 cm de tubo hidráulico PVC RD 26 de $\frac{1}{2}$ ".
- e) Con otro codo de 90° volvemos a la dirección inicial pero en sentido contrario adicionando 5 cm de tubo hidráulico PVC RD 26 de $\frac{1}{2}$ ".
- f) A este tubo se le añade un adaptador macho de $\frac{1}{2}$ " de PVC que une a la rosca unión universal de PVC de $\frac{1}{2}$ ".
- g) La rosca unión universal de PVC de $\frac{1}{2}$ " está conectada a la entrada de la bomba, y la salida de esta que se encuentra en la parte superior se conecta a otra rosca unión universal de $\frac{1}{2}$ ".
- h) La rosca unión universal de PVC de $\frac{1}{2}$ " está conectado con un adaptador macho de $\frac{1}{2}$ " adicionándole 4 cm de tubería hidráulica PVC RD 26 de $\frac{1}{2}$ ".

- i) Con un codo de 90° se cambia de dirección y sigue una tubería hidráulica PVC RD 26 de ½" de 25 cm de longitud.
- j) A la tubería se le coloca un adaptador hembra de ½" para conectar con el grifo eléctrico lorenzetti.
- k) La salida del grifo eléctrico lorenzetti se encuentra conectada a una rosca unión universal de CPVC de ½", a esta se le coloca un tubo de CPVC hidráulico de ½" que tiene una longitud de 62 cm.
- l) Al tubo de CPVC hidráulico de ½" se le conecta de manera horizontal una "T" de ½" del mismo material.
- m) En la parte superior de la "T" se coloca un conector recto de manguera de cobre, y sobre él se colocó un termómetro digital, mientras que por la salida central se coloca 1 cm de tubería hidráulica de CPVC de ½" junto con un conector recto de manguera.
- n) Al conector recto se unió una manguera Synflex Eclipse de 3/8" la cual está conectada al distribuidor de agua.
- o) La salida de agua de la torre se da por un desagüe de ¾", a la que se le añade 5 cm de tubo hidráulico de PVC de ¾", seguido de un codo de 90°.
- p) Al codo de 90° se le añaden 15 cm de hidráulico de PVC de ¾" y se le coloca de manera horizontal una "T" de ¾", donde en la parte superior se coloca un termómetro digital y por la inferior cae el agua al depósito de almacenamiento, para la recirculación de agua.

Toda esta construcción dio como resultado una torre empacada para la humidificación de aire y enfriamiento de agua a nivel laboratorio, con un armazón de aluminio, paredes de vidrio, un empaque de relleno de 47 cm, un distribuidor de agua, un eliminador de rocío, un ventilador en la parte superior, un depósito de almacenamiento de agua, una válvula de bolas, una bomba con velocidades de salida de 90 a 9000 rpm, un grifo eléctrico con tres niveles de temperatura, dos termómetros digitales colocados a la entrada de agua de la torre y a la salida de

agua de la torre, todos estos conectados con tuberías de diferentes materiales y dimensiones como se es posible observar en la Figura 24.

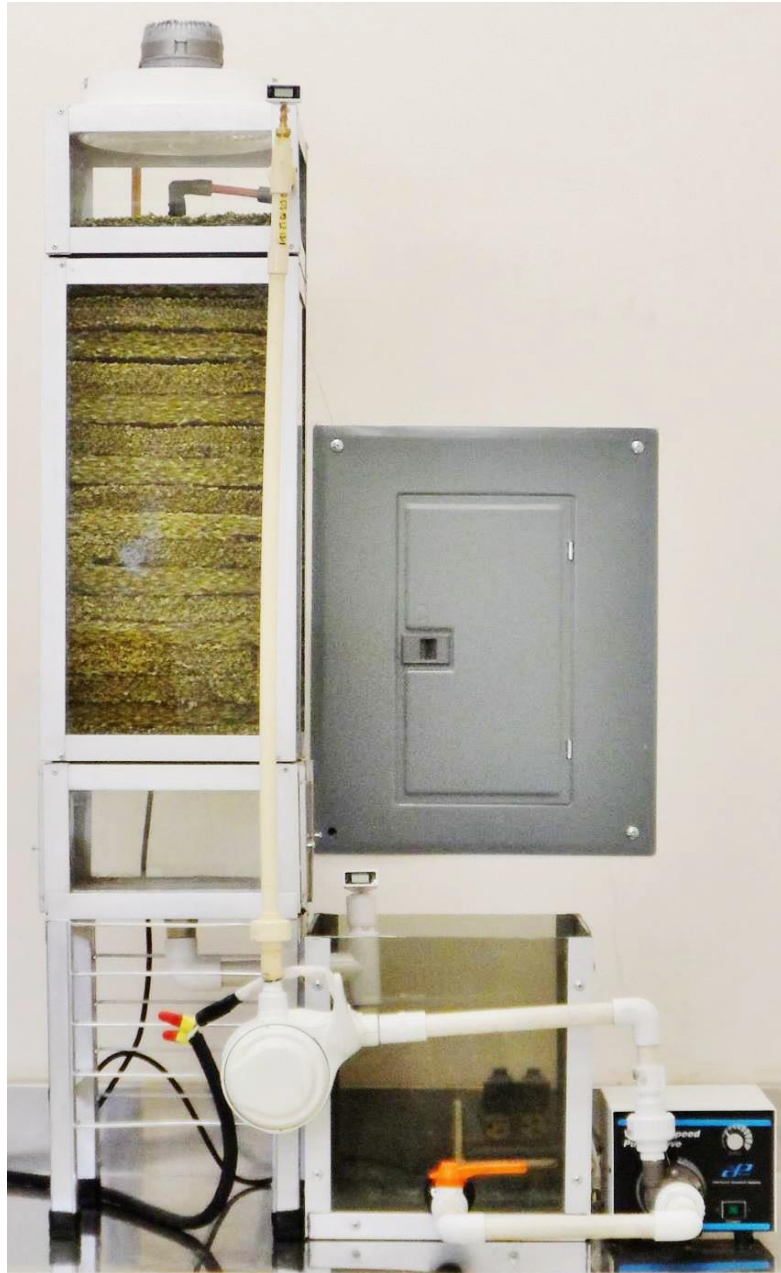


Figura 24. Torre empacada para la humidificación de aire y enfriamiento de agua a nivel laboratorio.

- VI. Costos de construcción y equipamiento de la torre empacada para la humidificación de aire y el enfriamiento de agua a nivel laboratorio.

Una parte importante de este trabajo es saber el valor monetario del equipo construido. Para esto se realizó un análisis económico sobre los costos de construcción y equipamiento de la torre empacada. En la Tabla B.I de los anexos se enlistan los materiales para la construcción de la torre empacada y el depósito de almacenamiento de agua así como todos los accesorios del arreglo de la tubería. Mientras que la Tabla B.II de este apartado está compuesta por los equipos que completan la torre empacada y su valor económico. Finalmente en la Tabla B.III aparecen el valor total de los materiales utilizados para la construcción de la torre empacada y el valor total de los equipos que completan a ésta, esto con el objetivo de saber el valor monetario del equipo construido.

III.3 Operación del Equipo

La Figura 25 muestra el diagrama de flujo de la torre empacada con las variables y equipos del sistema.

- I. Inspección inicial
 1. Verificar que exista energía eléctrica en la línea de alimentación.
 2. Verificar el nivel de agua en el tanque (12 L mínimo)
 3. Verificar que las tuberías estén bien conectadas
 4. Verificar que la válvula este cerrada
- II. Operación inicial
 1. Conectar la bomba MICROPUMP® modelo 75211-62 y el grifo eléctrico lorenzetti a la línea de alimentación de energía eléctrica.
 2. Encender los termómetros digitales y espera a que se estabilice la lectura en cada uno de ellos, registrar delta de temperaturas en caso de que se presente.
 3. Abrir válvula de bola completamente y válvula de seguridad del grifo eléctrico lorenzetti.
 4. Abrir ventanillas laterales de la torre para permitir el flujo de entrada del aire.

5. Seleccionar los valores de flujo de agua, para los cuales se desea determinar la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo del aire.
6. Si se va operar sin calentamiento de agua, es decir solo humidificar el aire, seguir los siguientes pasos:
 - a) Encender la bomba, al mismo tiempo conectar el ventilador para que encienda.
 - b) Regular los flujos de agua y aire a los valores deseados.
 - c) Con el higrómetro registrar la temperatura bulbo seco y humedad relativa del aire a la entrada de la torre.
 - d) Colocar el higrómetro a la salida del aire de la torre y registrar cada determinado tiempo la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa.
 - e) Registrar valores de temperatura de entrada y salida del agua.
7. Si se va operar con calentamiento de agua, es decir llevar a cabo un enfriamiento de agua, seguir las siguientes indicaciones.
 - a) Encender la bomba, al mismo tiempo conectar el ventilador para que encienda.
 - b) Regular los flujos de agua y aire a los valores deseados.
 - c) Establecer el nivel de calentamiento del agua (en este caso el grifo eléctrico lorenzetti permite dos tibia o caliente) seleccionar uno e iniciarlo.
 - d) Con el higrómetro registrar la temperatura de entrada y humedad relativa del aire a la entrada de la torre.
 - e) Registrar valores de temperatura de entrada y salida del agua desde el inicio del calentamiento durante determinados intervalos de tiempo hasta que se dé un registro constante de las temperaturas.
 - f) Colocar el higrómetro a la salida del aire de la torre y registrar durante los intervalos de tiempo que se registró la temperatura de salida y entrada del agua, también hacerlo con la temperatura del aire y la humedad relativa, ver Figura 26.

- III. Puntos a inspeccionar durante la operación
 1. Temperatura de bulbo seco del aire a la entra y salida del sistema
 2. Temperatura de bulbo húmedo del aire a la entrada y salida del sistema
 3. Temperatura del agua a la entrada y salida de la torre empacada.
- IV. Paro normal del equipo
 1. Apagar calentamiento del grifo eléctrico lorenzetti
 2. Apagar bomba de agua
 3. Apagar ventilador de aire desconectándolo del alimentador de energía eléctrica.
 4. Cerrar válvula de bola
 5. Apagar termómetros digitales
 6. Desconectar del alimentador de energía eléctrica el grifo eléctrico lorenzetti y la bomba de agua.
 7. Guardar los instrumentos de medición que no se encuentran instalados permanentemente en el sistema.

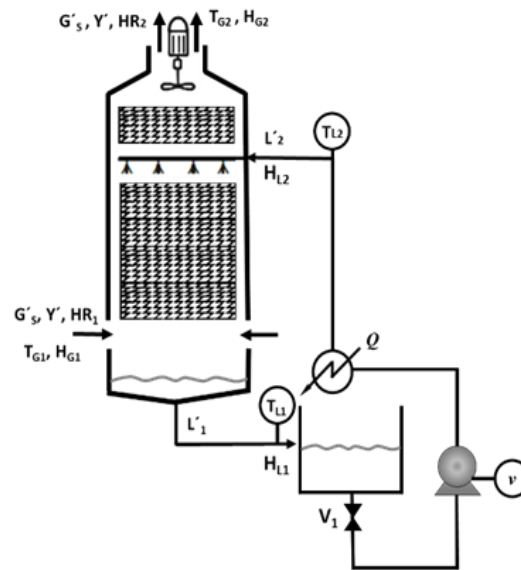


Figura 25. Diagrama de flujo de la torre empacada construida, con variables a registrar.

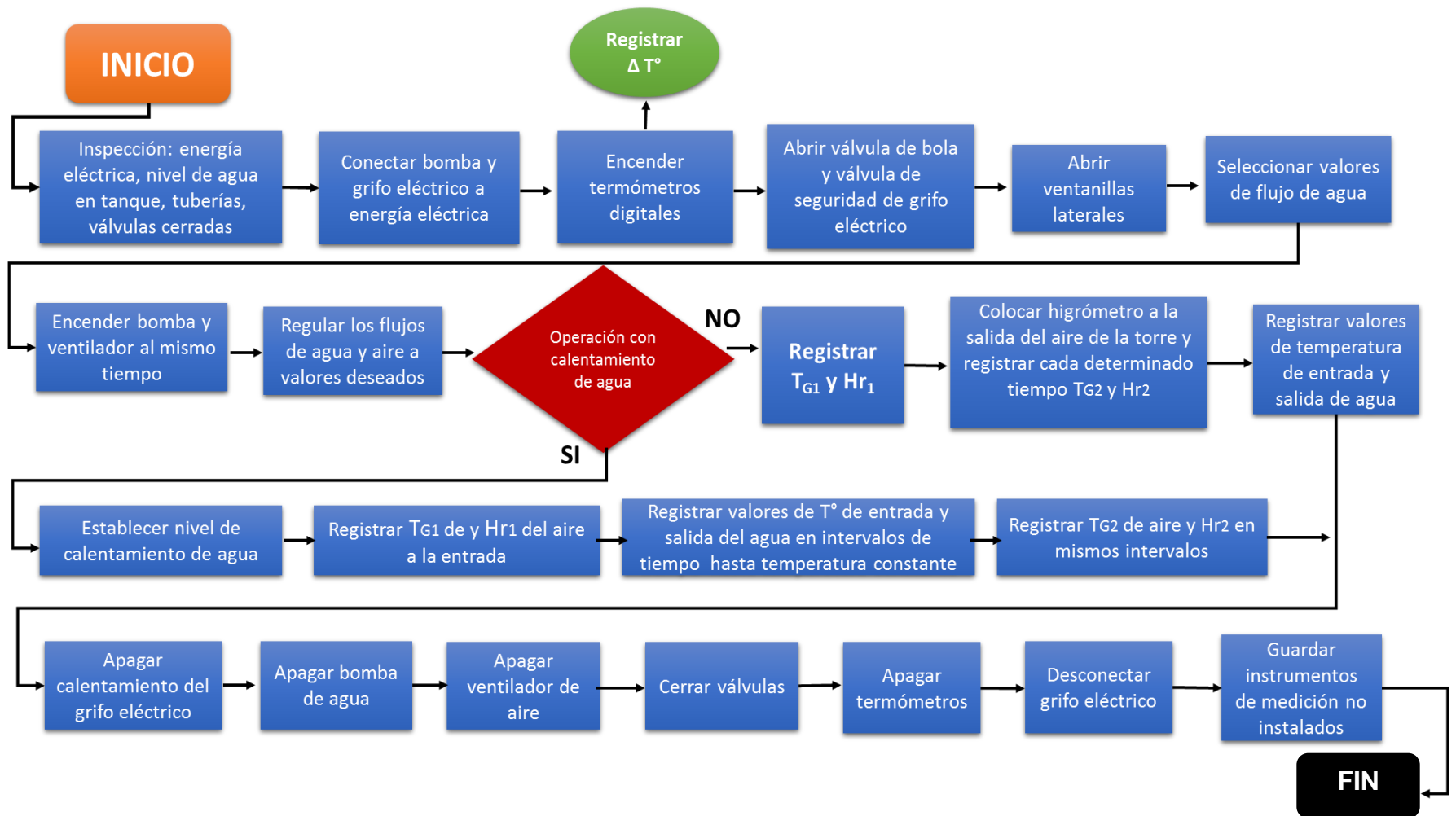


Figura 26. Diagrama de flujo de operación de la torre empacada.

III.4 Mantenimiento del Equipo

El mantenimiento, tanto a nivel preventivo como correctivo, resulta esencial para conseguir y prolongar en el tiempo las condiciones de funcionamiento eficaz de los equipos y maquinarias en general, pero de manera especial de las torres de enfriamiento que por sus condiciones de funcionamiento y situación a la intemperie resultan muy vulnerables a diversos agentes externos muy variables y de difícil control. La implantación y seguimiento del mantenimiento preventivo tiene una enorme repercusión en el ahorro energético y en la vida útil de los equipos.

- I. Almacén, carrocería o envoltorio del cuerpo de la torre: como el almacén está construido de aluminio conviene vigilar la aparición de manchas de óxido ocasionadas por algunos productos de tratamiento del agua, o deposiciones que puedan favorecerlos, especialmente si el contenido de cloruros en el agua de recirculación es elevado.
- II. Paredes laterales de la torre: la torre empacada está construida por material de vidrio en sus paredes mientras que el depósito de agua de acrílico, estas no requieren mayor cuidado que su limpieza y revisión en caso de aparición de signos de deterioro en su apariencia externa, o de daños por esfuerzos mecánicos o golpes.
- III. Empaque o relleno de la torre: el empaque coolpad utilizado en la torre, se debe revisar su estado de limpieza pues es posible la generación de hongos, lama, o algas además de las incrustaciones normales de partículas de polvo, polen, arcillas haciendo una reducción de eficiencia de intercambio de calor y la efectividad en la evitación o limitación de dispersión de gotas y aerosoles. También debe comprobarse que la calidad y características del relleno le permiten soportar sin daños ni deformaciones las temperaturas normales de trabajo del agua que van a recibir. El hecho de quedar sometido a temperaturas superiores a las que puede soportar, aunque fuera por espacios de tiempo cortos, así como el quedar sometidos al efecto de

heladas, pueden dañarlos seriamente, deformándolos o haciéndoles frágiles hasta el punto de inutilizarlos.

- IV. Fugas de agua: Las rutinas de mantenimiento deben comprender la observación de fugas, goteos o rezumes de agua que pueden darse en las uniones de las partes del equipo, en las conexiones de tuberías, en la bomba de agua o en el depósito de almacenamiento de agua.
- V. Distribuidor de Agua: El distribuidor de agua puede presentar fallas por incrustaciones de desechos arrastrados por el flujo de agua, así como deterioro del relleno. Es necesario asegurarse que los flujos de salida no estén tapados u obstruidos en algún porcentaje.
- VI. Bomba: Las intervenciones de mantenimiento se centran en la medición de tensión y consumo de sus motores y la observación de sentido de giro, ruidos anormales o vibraciones que puedan ser síntoma de desgaste de rodete o cojinetes, roturas de álabes o descentramiento del eje, fenómenos de cavitación o defecto de anclaje a su bancada.
- VII. Ventilador: En cuanto a la disposición entre el ventilador y su motor de accionamiento, una parte de tratamiento común en las operaciones de mantenimiento del ventilador es: la tensión y el consumo, el sentido de giro y el engrase de rodamientos del motor, observar el estado de la pintura u oxidación en la hélice o los álabes y en la carcasa del motor, que determinará su limpieza y repintado.

Problemas de mantenimiento y su control o prevención:

Corrosión: En caso de la aparición de corrosión sus procesos de eliminación, normalmente son por medios ácidos que atacan a los materiales de los equipos, especialmente a los metales. Para evitar la corrosión hay que controlar el pH del agua, procurando valores entre 7 y 9, hacer limpieza permanente de los equipos.

Lodos: Están formados por acumulaciones de polvo y elementos insolubles que forman masas que se depositan en los fondos, para su eliminación se utilizan productos secuestrantes y dispersantes que facilitan su movilidad en el agua

permitiendo así su eliminación por filtrado o purga y en caso necesario por barrido con agua a presión.

Algas: Cuando se produce su invasión resulta difícil su erradicación permanente. Se desarrollan fácilmente en los sitios que se mantienen húmedos y soleados. El cubrimiento de las balsas privándolas de luz impide o disminuye grandemente su proliferación. Los tratamientos con compuestos de amonio o sales de cobre y derivados del cloro resultan eficaces, pero requieren precaución en su dosificación. Los primeros pueden producir fenómenos indeseados de espuma y los otros pueden resultar corrosivos.

Bacterias: Son muy diversas y numerosas. Las actividades de las distintas bacterias son múltiples, actuando sobre el hierro y sobre otros minerales disueltos en el agua, descomponiéndolos o facilitando sus reacciones químicas y originando fangos, residuos y compuestos corrosivos. Se opta por combatir selectivamente a las especies que se consideran perniciosas o peligrosas, mediante derivados de cloro o bromo y tratamientos de choque con biocidas no oxidantes.

IV. Resultados y Discusión

IV.1 Resultados para el Enfriamiento de Agua.

Los datos experimentales registrados para calcular el coeficiente global de transferencia de masa (K_{ya}) fueron: flujo de agua, temperatura del agua, temperatura de bulbo seco del aire y humedad relativa del aire, todas estas a la entrada y salida de la torre empacada. Otros datos importantes como la temperatura de bulbo húmedo del aire y entalpía del aire a la entrada y salida de la torre fueron calculados mediante el diagrama psicrometrico para aire-vapor de agua a 1 atmosfera de presión total. Las variables de altura de empaque, capacidad calorífica del agua, área de sección transversal ya eran conocidas. Los valores de cada variable están descritos en las Tablas A.I, A.II y A.III, del apartado de anexos, para diferentes condiciones de operación (flujo de agua, nivel de calentamiento y flujo de aire).

Las corridas experimentales se llevaron a cabo con condiciones de operación de flujo de entrada de agua a los niveles 1,2, y 3, estos niveles de flujo fueron medidos experimentalmente haciendo varias mediciones, finalmente se registraron los valores promedios de los tres niveles de flujo de operación, estos aparecen en la Tabla I. De igual manera el equipo se operó con nivel 1 y 2 de calentamiento, el rango de calentamiento para cada nivel aparece en la Tabla II.

Las líneas de operación que se muestran de la Figura 27 a la Figura 35 corresponden a cada uno de los experimentos realizados bajo distintas condiciones de operación de la torre empacada y fueron construidas con las temperaturas de agua a la entrada y a la salida, junto a las líneas de operación se encuentra la línea de equilibrio del sistema aire-agua a la presión normal de 1 atmosfera (ver Figura 6).

El número de unidades de transferencia (N_{TOG}) fue calculado con la Ec. (26), la integral se resolvió con el método numérico de Simpson, este número también se puede obtener calculando el área bajo la curva. Una vez que se obtuvo el valor

del número de unidades de transferencia se calculó con la Ec. (28) la altura global de una unidad de transferencia de gas (H_{TOG}).

Flujo Másico de Gas Seco Superficial (G_s) se determinó al despejar de la Ec. (19), estos valores se muestran en las tablas IV, IX Y XIV.

El coeficiente global de transferencia de masa (K_Ya) que se despejo de la Ec. (27) y el calor ganado por el aire se calculó con la Ec. (13) en estos cálculos se utilizaron valores de flujo másico que aparecen en las Tablas IV, IX y XIV. En las Tablas V, X y XV están registrados los valores obtenidos del número de unidades de transferencia (N_{TOG}), la altura global de una unidad de transferencia de gas (H_{TOG}) y el coeficiente global de transferencia de masa (K_Ya), para cada una de las condiciones a las que se operó la torre empacada.

En las Tablas VII, XII y XVII se muestran las eficiencias para cada una de las pruebas que se realizaron, para la obtención de la eficiencia se utilizó la Ec. (30).

Con el objetivo de visualizar y obtener conclusiones de cómo se comporta el coeficiente de transferencia de masa (K_Ya) respecto a los flujos de agua se hicieron dos tipos de gráficas.

- a) Coeficientes de transferencia de masa (K_Ya) vs Flujo de agua, con el flujo de aire calculado (ver Figura 36).
- b) Coeficientes de transferencia de masa (K_Ya) vs Flujo de agua, con el flujo de aire medido experimentalmente (ver Figura 37).

Otras graficas realizadas para observar la eficiencia de la torre y la potencia de transferencia de calor fueron:

- a) Eficiencia de la Torre Empacada vs Flujo de Agua (Figura 38)
- b) Potencia de transferencia de Calor vs Flujo de Agua (Figura 39)

También se obtuvieron los coeficientes de transferencia de masa (K_{ya}) y la potencia de transferencia de calor (ver Tablas VIII, XIII y XVIII) midiendo las velocidades de entrada del flujo de aire estas velocidades se reportan en la Tabla III.

Tabla I. Niveles de flujo de agua (L/min).

Nivel	Flujo
1	2.1
2	4.6
3	6.2

Tabla II. Niveles de calentamiento del grifo eléctrico (°C).

Nivel	Temperatura
1	28-45
2	35-55

Tabla III. Velocidad del aire medido experimentalmente por el porcentaje de apertura de las ventanillas laterales (m/s).

% Apertura	Velocidad
100	3.3
50	3.5
25	3.7

IV.2 Con Ventanillas Laterales 100% Abiertas.

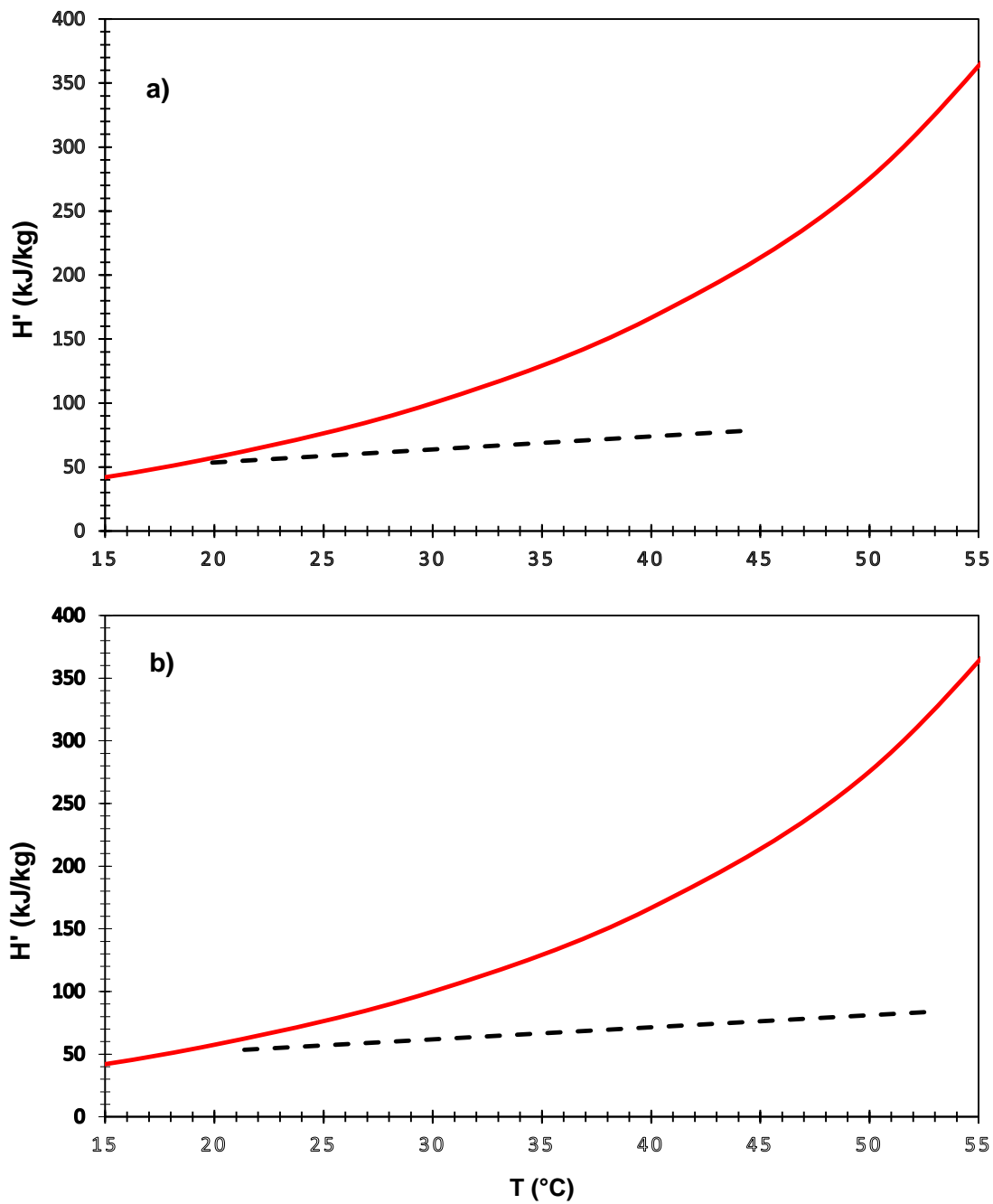


Figura 27. Línea de equilibrio del sistema aire-agua y línea de operación para las condiciones de ventanillas laterales 100% abiertas y; a) Flujo 1 de agua y nivel de calentamiento 1, b) Flujo 1 de agua y nivel de calentamiento 2.

— Línea de Equilibrio - - - - - Línea de Operación

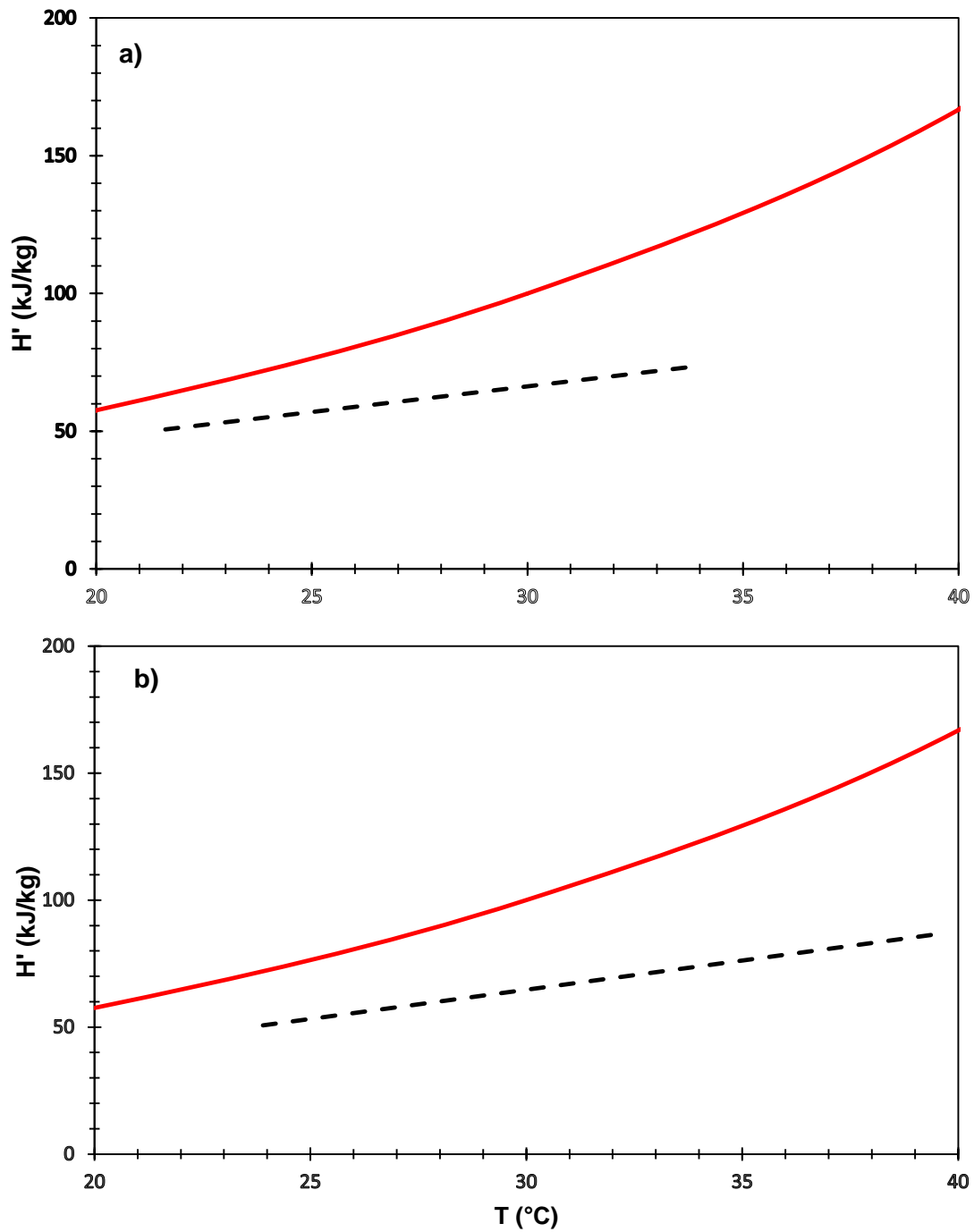


Figura 28. Línea de equilibrio del sistema aire-agua y línea de operación para las condiciones de ventanillas laterales 100% abiertas y; a) Flujo 2 de agua y nivel de calentamiento 1, b) Flujo 2 de agua y nivel de calentamiento 2.

—— Línea de Equilibrio - - - - - Línea de Operación

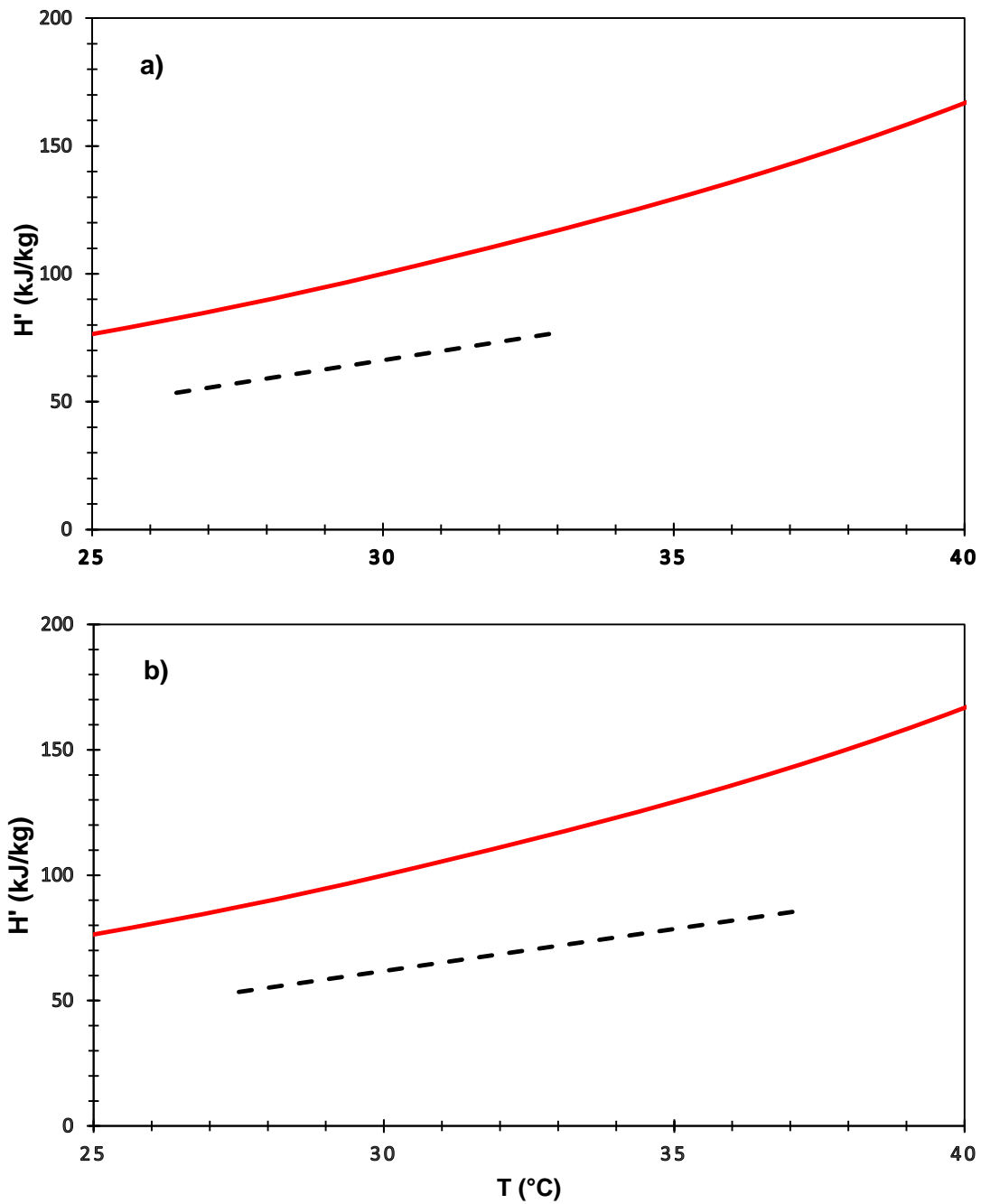


Figura 29. Línea de equilibrio del sistema aire-agua y línea de operación para las condiciones de ventanillas laterales 100% abiertas y; a) Flujo 3 de agua y nivel de calentamiento 1, b) Flujo 3 de agua y nivel de calentamiento 2.

— Línea de Equilibrio - - - - - Línea de Operación

IV.2.1 Tablas de resultados experimentales

Las siguientes tablas muestran resultados de coeficientes, potencia y la eficiencia de la torre de enfriamiento para ventanillas laterales completamente abiertas y se calcularon valores de flujo másico de aire seco superficial despejando de la Ec. (19) que es la pendiente de la línea de operación, estos valores se muestran en la Tabla IV, (los flujos másicos del agua fueron medidos experimentalmente).

Tabla IV. Flujos másicos calculados.

Nivel de Calentamiento	Variable	Flujo 1	Flujo 2	Flujo 3	Unidades
1	G_s	2.312	2.78	1.93	kg_B/m^2-s
	g_s	0.144	0.173	0.121	kg_B/s
	l_1	0.034	0.077	0.103	kg_A/s
2	G_s	2.419	2.25	2.075	kg_B/m^2-s
	g_s	0.151	0.14	0.129	kg_B/s
	l_1	0.034	0.077	0.103	kg_A/s

Tabla V. Resultados de coeficientes obtenidos operando el equipo con ventanillas laterales 100% abiertas.

Nivel de Calentamiento	Variables	Flujo 1	Flujo 2	Flujo 3	Unidades
1	N_{TOG}	1.005	0.842	0.688	-
	H_{TOG}	0.467	0.557	0.682	m
	K_{Ya}	4.945	4.985	2.836	kg/m^3-s
2	N_{TOG}	0.663	0.904	0.675	-
	H_{TOG}	0.708	0.519	0.696	m
	K_{Ya}	3.417	4.33	2.981	kg/m^3-s

Tabla VI. Potencia de la torre de enfriamiento, Q (kW).

Nivel de Calentamiento	Flujo 1	Flujo2	Flujo 3
1	3.67	3.97	2.89
2	4.57	5.04	4.20

Tabla VII. Eficiencia de la torre de enfriamiento, η_t (%).

Nivel de Calentamiento	Flujo 1	Flujo 2	Flujo 3
1	95.23	79.01	45.08
2	91.17	73.72	51.39

Tabla VIII. Coeficiente de transferencia de masa y potencial de la torre de enfriamiento con flujo másico de aire medido ($g_s = 0.135 \text{ kg}_B/\text{s}$).

Nivel de Calentamiento		Flujo 1	Flujo 2	Flujo 3	Unidades
1	K_{ya}	4.662	3.875	3.164	kg/m ³ -s
	Q	3.42	3.088	3.218	kW
2	K_{ya}	3.052	4.162	3.105	kg/m ³ -s
	Q	4.084	4.841	4.371	kW

IV.3 Con Ventanillas Laterales 50% Abiertas.

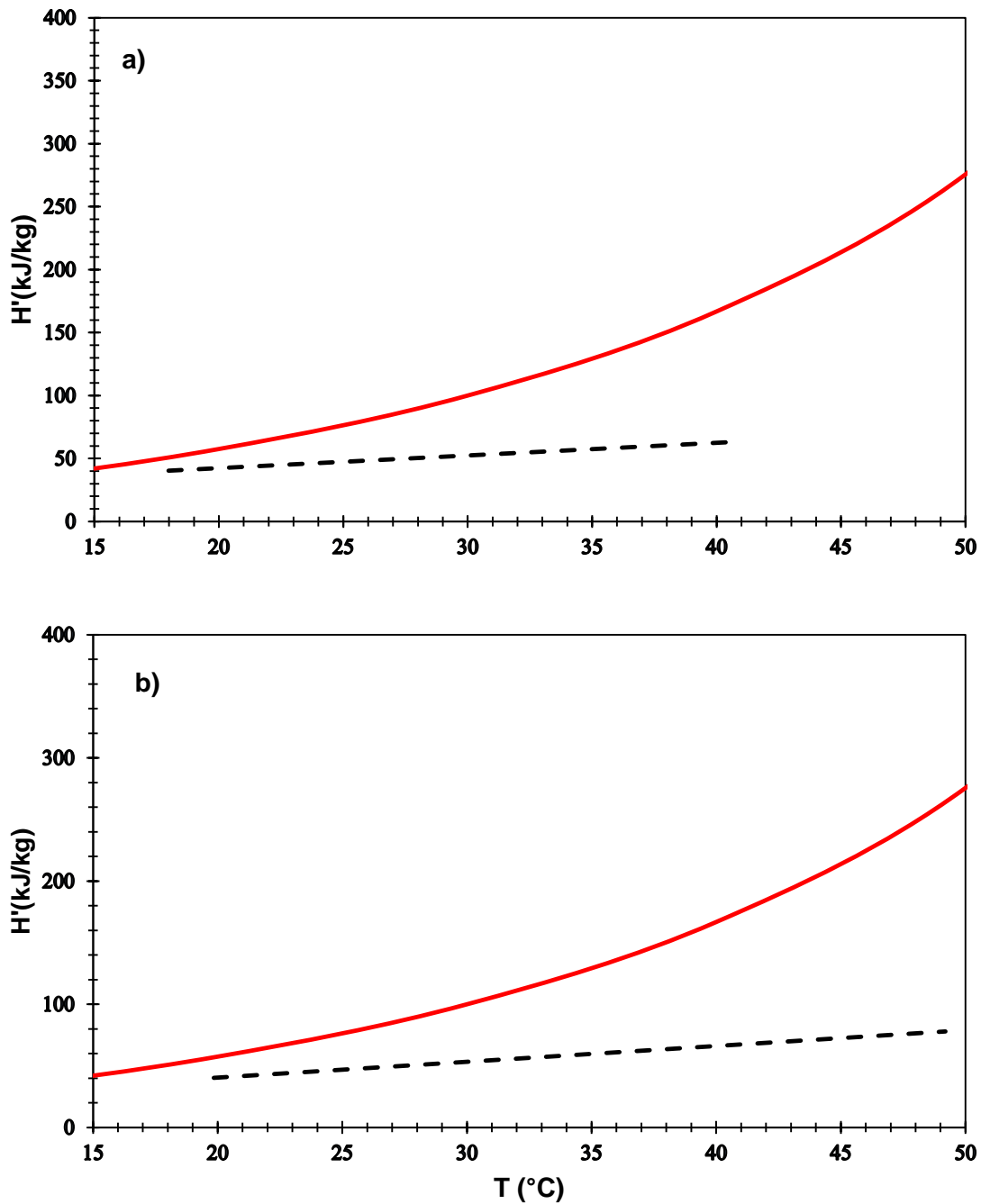


Figura 30. Línea de equilibrio del sistema aire-agua y línea de operación para las condiciones de ventanillas laterales 50% abiertas y; a) Flujo 1 de agua y nivel de calentamiento 1, b) Flujo 1 de agua y nivel de calentamiento 2.

—— Línea de Equilibrio - - - - - Línea de Operación

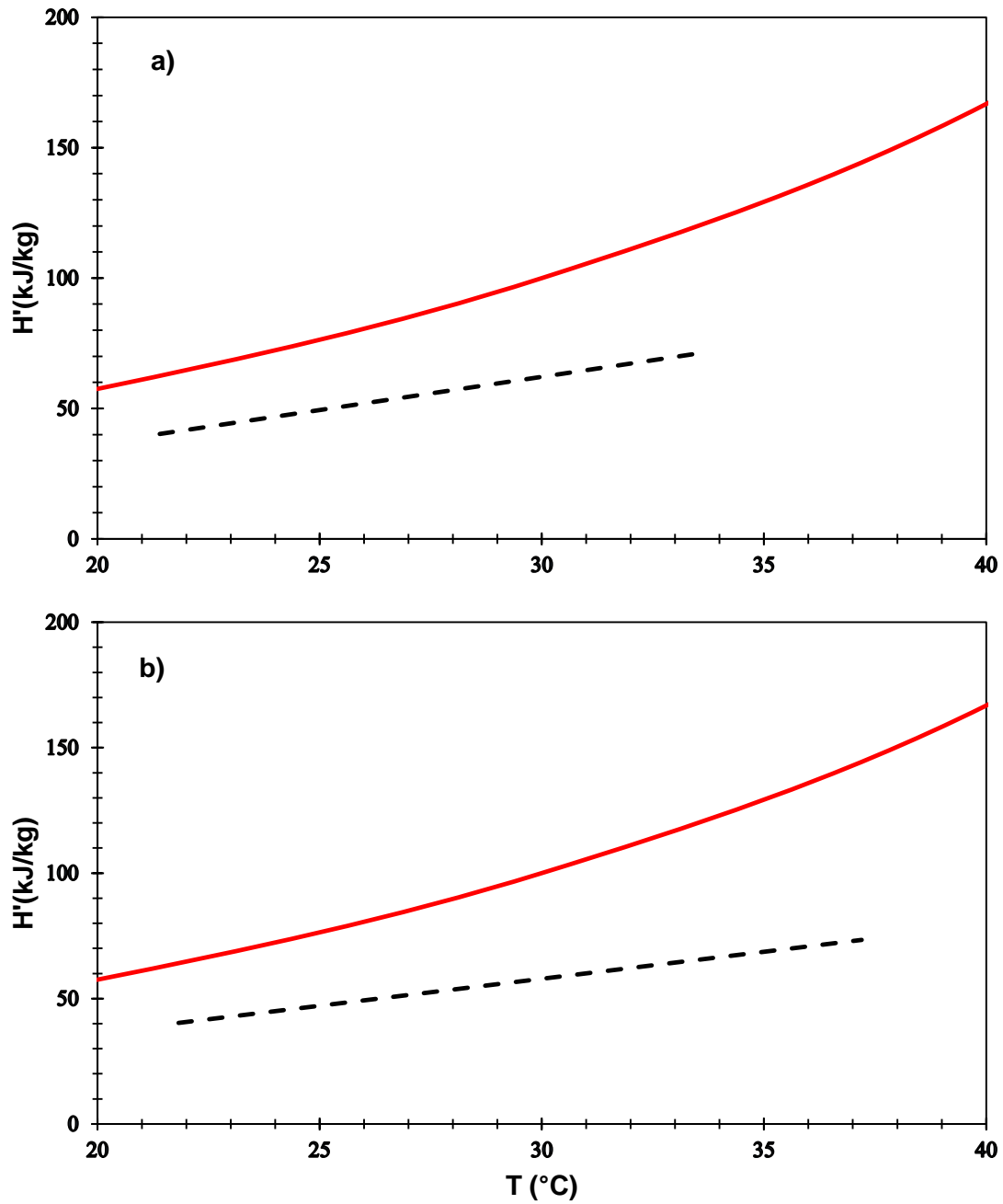


Figura 31. . Línea de equilibrio del sistema aire-agua y línea de operación para las condiciones de ventanillas laterales 50% abiertas y; a) Flujo 2 de agua y nivel de calentamiento 1, b) Flujo 2 de agua y nivel de calentamiento 2.

—— Línea de Equilibrio - - - - - Línea de Operación

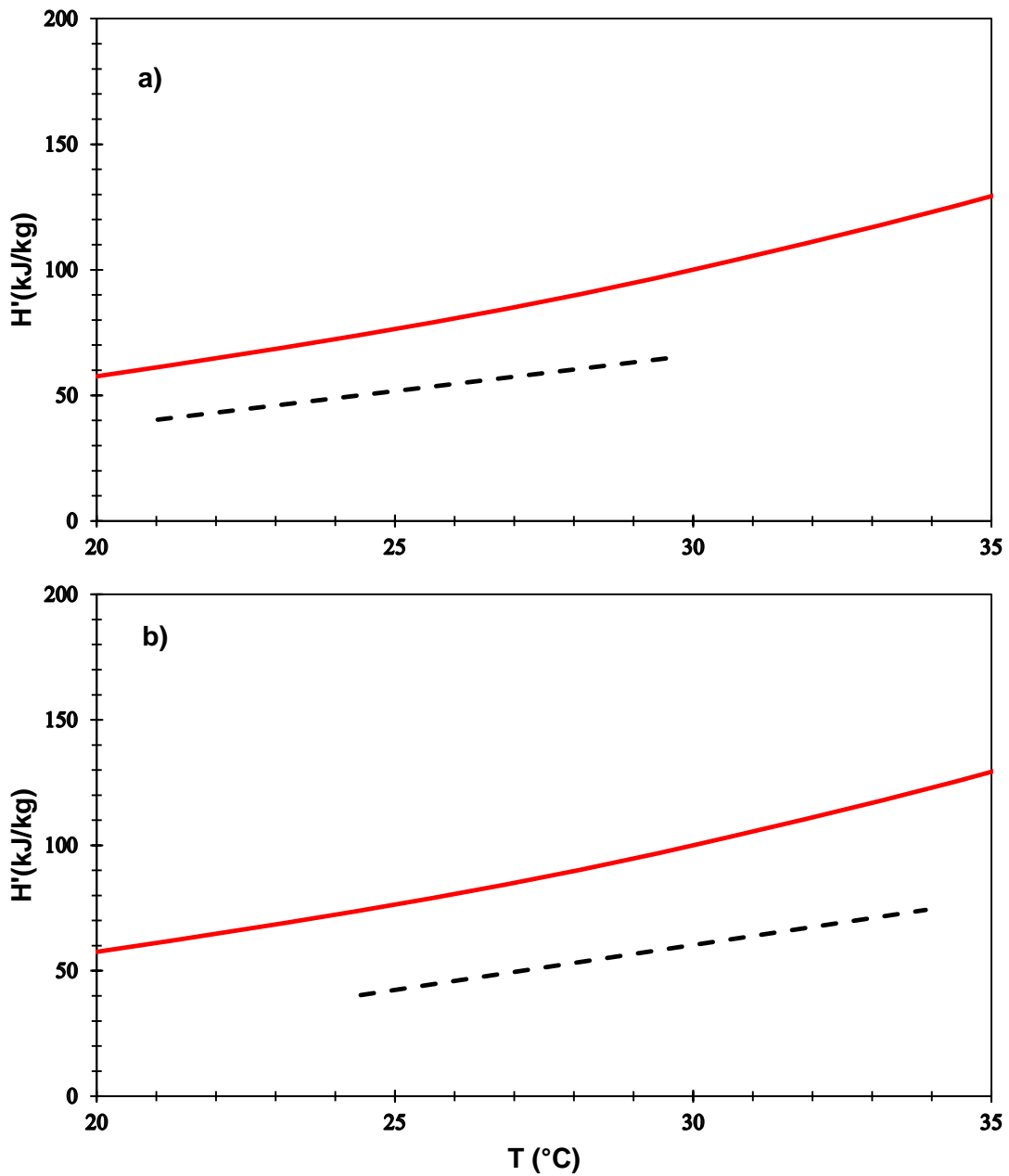


Figura 32. Línea de equilibrio del sistema aire-agua y línea de operación para las condiciones de ventanillas laterales 50% abiertas y; a) Flujo 3 de agua y nivel de calentamiento 1, b) Flujo 3 de agua y nivel de calentamiento 2.

— Línea de Equilibrio - - - - - Línea de Operación

IV.3.1 Tablas de resultados experimentales

Las siguientes tablas muestran resultados de coeficientes, potencia y la eficiencia de la torre de enfriamiento para ventanillas laterales 50% abiertas y se calcularon valores de flujo másico de aire seco superficial despejándola de la Ec. (19) que es la pendiente de la línea de operación, estos valores se muestran en la Tabla IX, (los flujos másicos del agua fueron medidos experimentalmente).

Tabla IX. Flujos másicos calculados.

Nivel de Calentamiento	Variable	Flujo 1	Flujo 2	Flujo 3	Unidades
1	G_s	2.3107	2.0385	2.4208	kg_B/m^2-s
	g_s	0.1444	0.1274	0.1513	kg_B/s
	l_1	0.0348	0.0773	0.1036	kg_A/s
2	G_s	1.82	2.4032	1.935	kg_B/m^2-s
	g_s	0.1137	0.1502	0.1209	kg_B/s
	l_1	0.0348	0.0773	0.1036	kg_A/s

Tabla X. Resultados de coeficientes obtenidos operando el equipo con ventanillas laterales 50% abiertas.

Nivel de Calentamiento	Variable	Flujo 1	Flujo 2	Flujo 3	Unidades
1	N_{TOG}	0.628	0.914	0.913	-
	H_{TOG}	0.747	0.513	0.514	m
	K_{Ya}	3.089	3.968	4.704	kg/m^3-s
2	N_{TOG}	0.665	0.8	0.805	-
	H_{TOG}	0.706	0.587	0.583	m
	K_{Ya}	2.577	4.092	3.315	kg/m^3-s

Tabla XI. Potencia de la torre de enfriamiento, Q (kW).

Nivel de Calentamiento	Flujo 1	Flujo 2	Flujo 3
1	3.35	3.9	3.7
2	4.27	4.97	4.11

Tabla XII. Eficiencia de la Torre de Enfriamiento, η_t (%).

Nivel de Calentamiento	Flujo 1	Flujo 2	Flujo 3
1	86.84	63.55	56.67
2	84.55	67.7	48.81

Tabla XIII. Coeficiente de transferencia de masa y potencia de la torre de enfriamiento con flujo másico de aire medido ($g_s= 0.137 \text{ kg}_B/\text{s}$).

Nivel de Calentamiento		Flujo 1	Flujo 2	Flujo 3	Unidades
1	Kya	2.931	4.267	4.260	$\text{kg}/\text{m}^3\text{-s}$
	Q	3.179	4.19	3.35	kW
2	Kya	3.104	3.73	3.755	$\text{kg}/\text{m}^3\text{-s}$
	Q	5.15	4.53	4.65	kW

IV.4 Con Ventanillas Laterales 25% Abiertas.

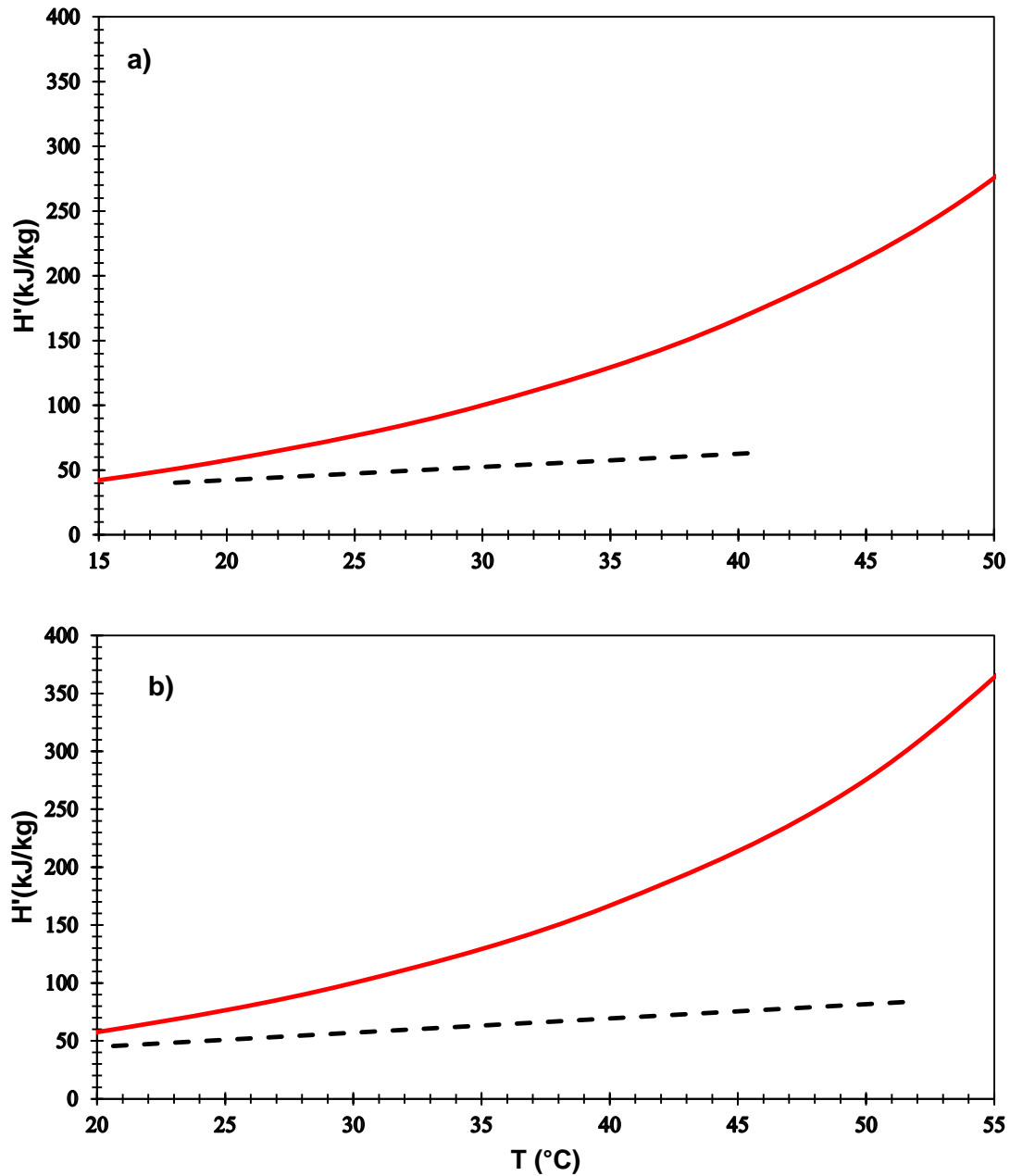


Figura 33. Línea de equilibrio del sistema aire-agua y línea de operación para las condiciones de ventanillas laterales 25% abiertas y; a) Flujo 1 de agua y nivel de calentamiento 1, b) Flujo 1 de agua y nivel de calentamiento 2.

—— Línea de Equilibrio - - - - - Línea de Operación

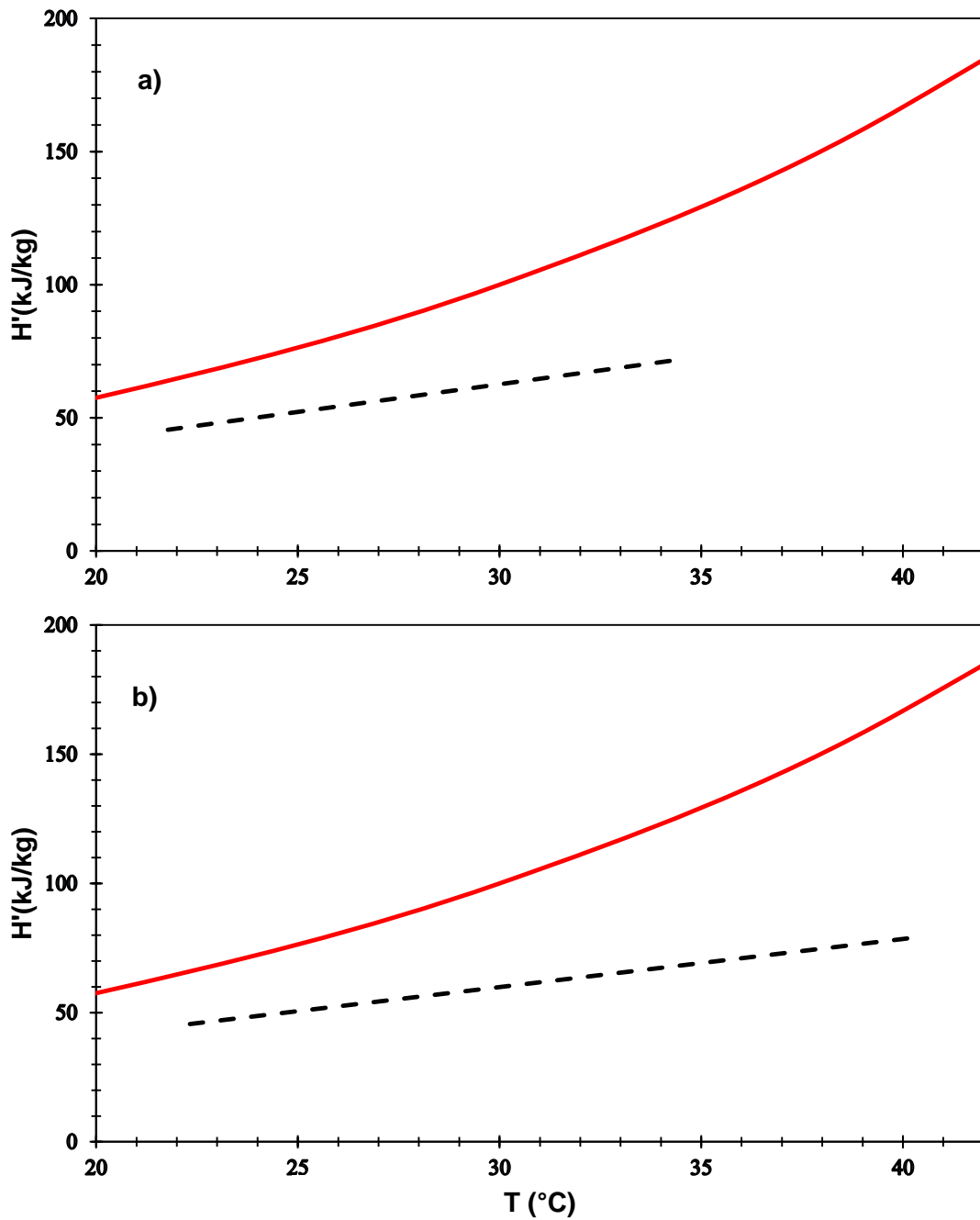


Figura 34. . Línea de equilibrio del sistema aire-agua y línea de operación para las condiciones de ventanillas laterales 25% abiertas y; a) Flujo 2 de agua y nivel de calentamiento 1, b) Flujo 2 de agua y nivel de calentamiento 2.

—— Línea de Equilibrio - - - - - Línea de Operación

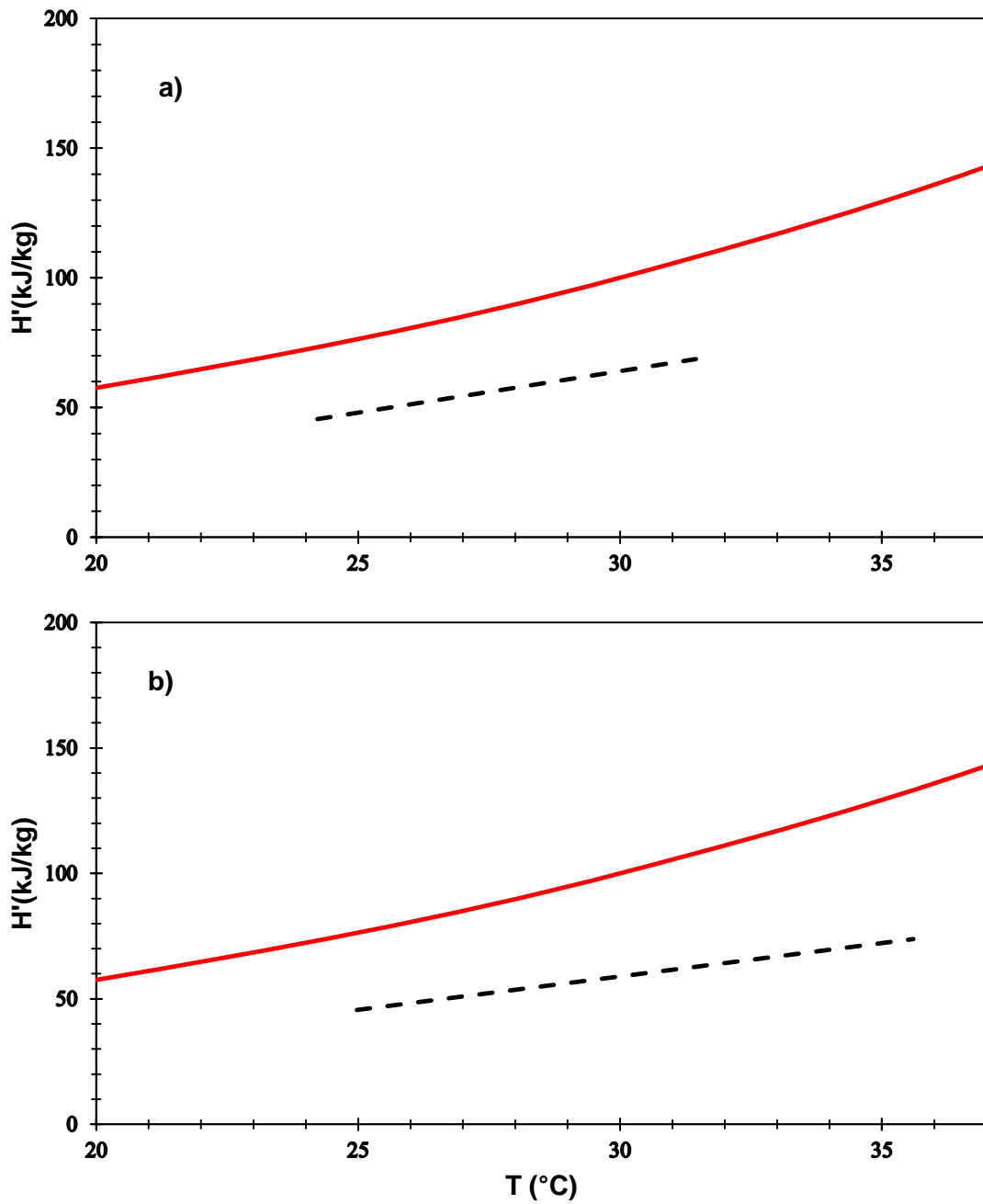


Figura 35. Línea de equilibrio del sistema aire-agua y línea de operación para las condiciones de ventanillas laterales 25% abiertas y; a) Flujo 3 de agua y nivel de calentamiento 1, b) Flujo 3 de agua y nivel de calentamiento 2.

—— Línea de Equilibrio - - - - - Línea de Operación

V.4.1 Tablas de resultados experimentales

Las siguientes tablas muestran resultados de coeficientes, potencia y la eficiencia de la torre de enfriamiento para ventanillas laterales 25% abiertas y se calcularon valores de flujo másico de aire seco superficial despejándola de la Ec. (19) que es la pendiente de la línea de operación, estos valores se muestran en la Tabla XIV, (los flujos másicos del agua fueron medidos).

Tabla XIV. Flujos másicos calculados.

Nivel de Calentamiento	Variable	Flujo 1	Flujo 2	Flujo 3	Unidades
1	G_s	1.721	2.4931	2.1648	kg_B/m^2-s
	g_s	0.1075	0.155	0.1353	kg_B/s
	I_1	0.0348	0.0773	0.1036	kg_A/s
2	G_s	1.9	2.7821	2.6057	kg_B/m^2-s
	g_s	0.1187	0.1738	0.1628	kg_B/s
	I_1	0.0348	0.0773	0.1036	kg_A/s

Tabla XV. . Resultados de coeficientes obtenidos operando el equipo con ventanillas laterales 25% abiertas.

Nivel de Calentamiento	Variable	Flujo 1	Flujo 2	Flujo 3	Unidades
1	N_{TOG}	0.679	0.745	0.692	-
	H_{TOG}	0.692	0.63	0.678	m
	K_{ya}	2.487	3.954	3.191	kg/m^3-s
2	N_{TOG}	0.717	0.803	0.624	-
	H_{TOG}	0.655	0.5849	0.753	m
	K_{ya}	2.899	4.7563	3.459	kg/m^3-s

Tabla XVI. Potencia de la torre de enfriamiento, Q (kW).

Nivel de Calentamiento	Flujo 1	Flujo 2	Flujo 3
1	3.15	4.158	3.134
2	4.578	5.769	4.608

Tabla XVII. Eficiencia de la torre de enfriamiento, η_t (%).

Nivel de Calentamiento	Flujo 1	Flujo 2	Flujo 3
1	82.1774	69.97	47.564
2	87.803	74.612	54.937

Tabla XVIII. Coeficiente de transferencia de masa y potencia de la torre de enfriamiento con flujo másico de aire medido ($g_s = 0.145 \text{ kg}_B/\text{s}$).

Nivel de Calentamiento	Variable	Flujo 1	Flujo 2	Flujo 3	Unidades
1	K_{ya}	3.352	3.68	3.42	$\text{kg}/\text{m}^3\text{-s}$
	Q	4.24	3.87	3.358	kW
2	K_{ya}	3.539	3.96	3.08	$\text{kg}/\text{m}^3\text{-s}$
	Q	5.589	4.81	4.1	kW

IV.5 Comportamiento del Coeficiente de Transferencia de Masa, la Eficiencia y la Potencia de Transferencia de Calor Respecto al Flujo de Entrada de Agua.

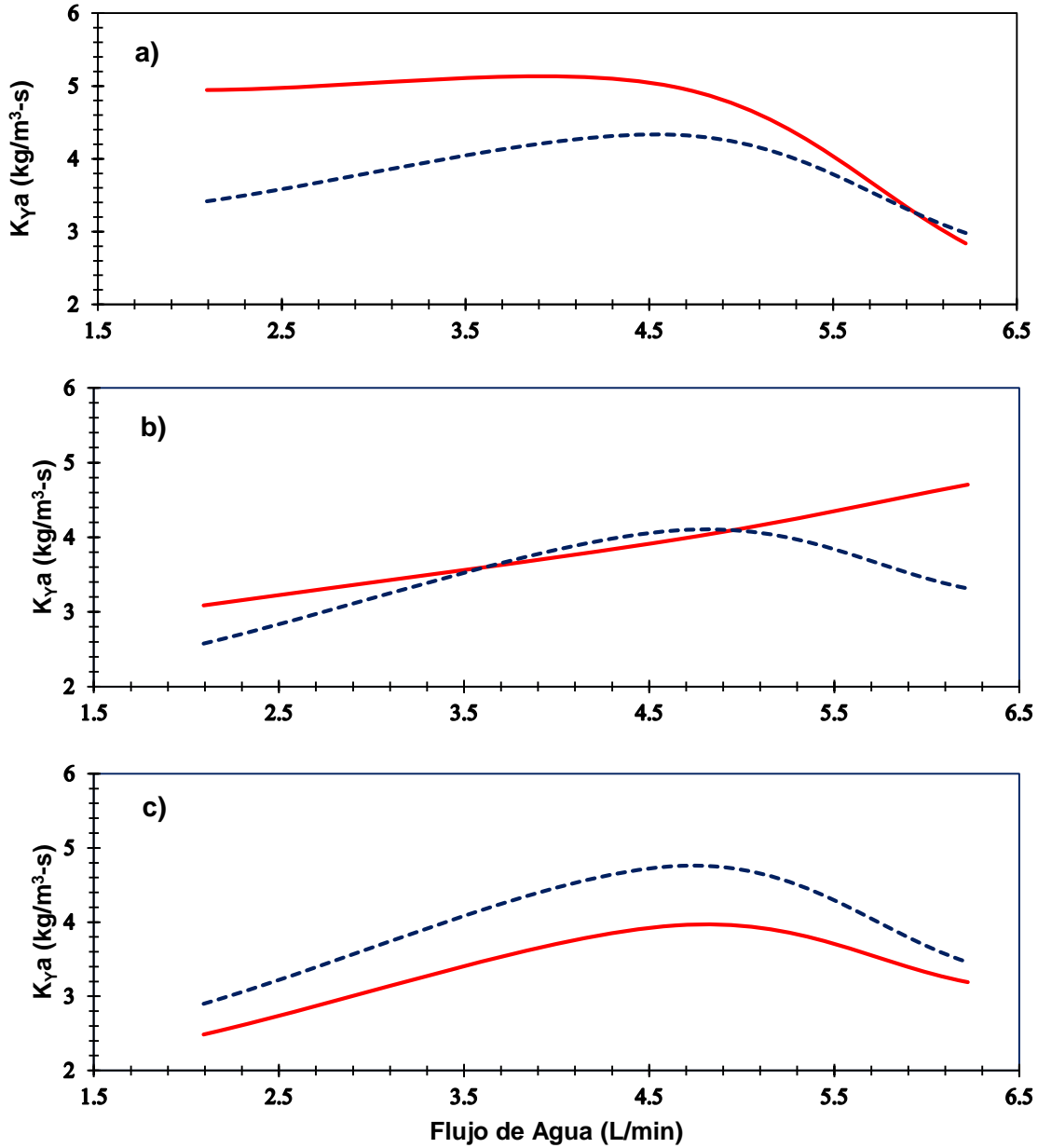


Figura 36. Coeficientes de transferencia de masa (K_{ya}) vs flujo de agua, con el flujo de aire calculado con las ventanillas laterales; a) 100% abiertas, b) 50% abiertas y c) 25% abiertas.

— Nivel 1 de Calentamiento - - - - Nivel 2 de Calentamiento

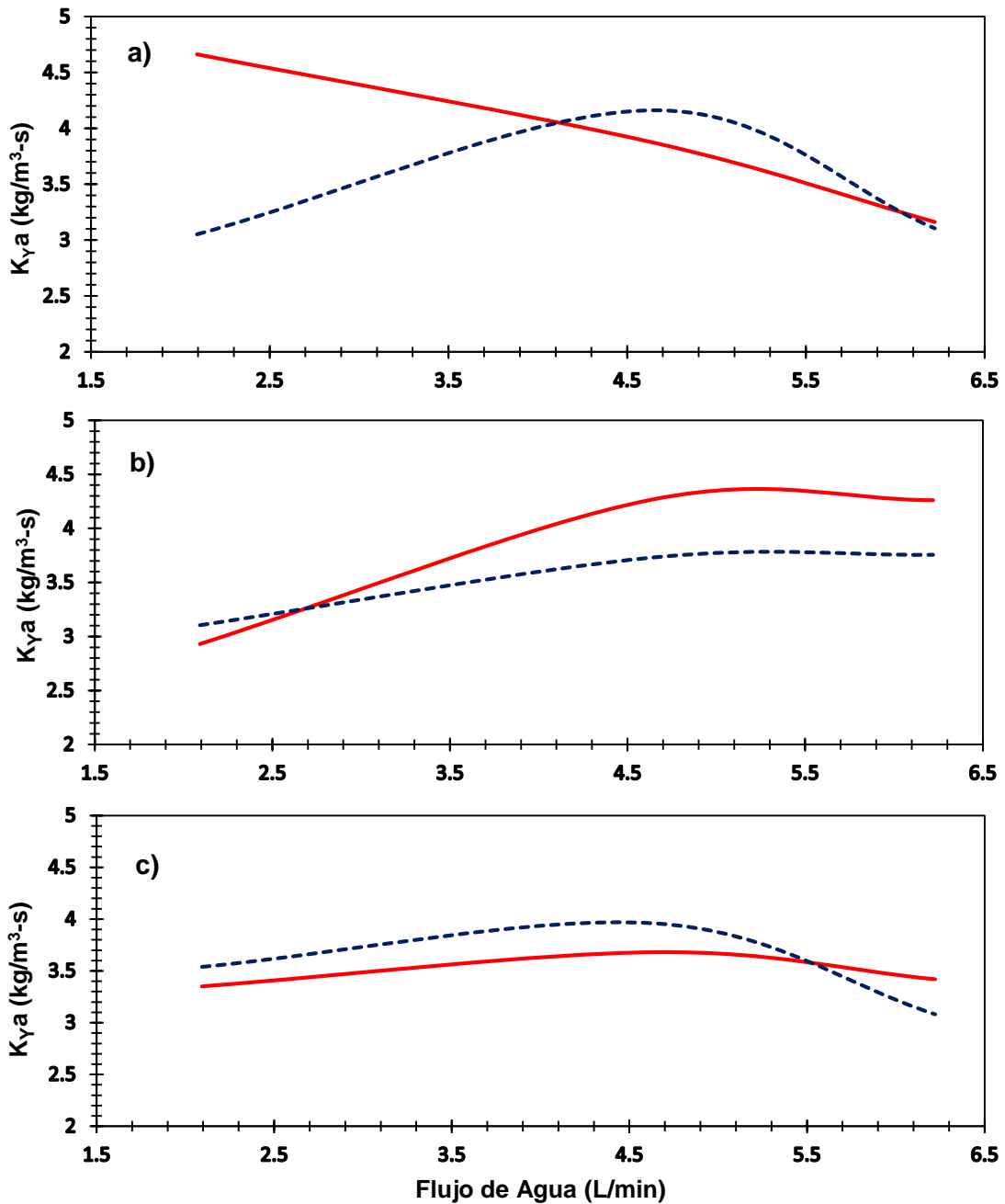


Figura 37. Coeficientes de transferencia de masa (K_{ya}) vs flujo de agua, con el flujo de aire medido experimentalmente con las ventanillas laterales; a)100% abiertas, b)50% abiertas y c)25%abiertas.

—— Nivel 1 de Calentamiento - - - - Nivel 2 de Calentamiento

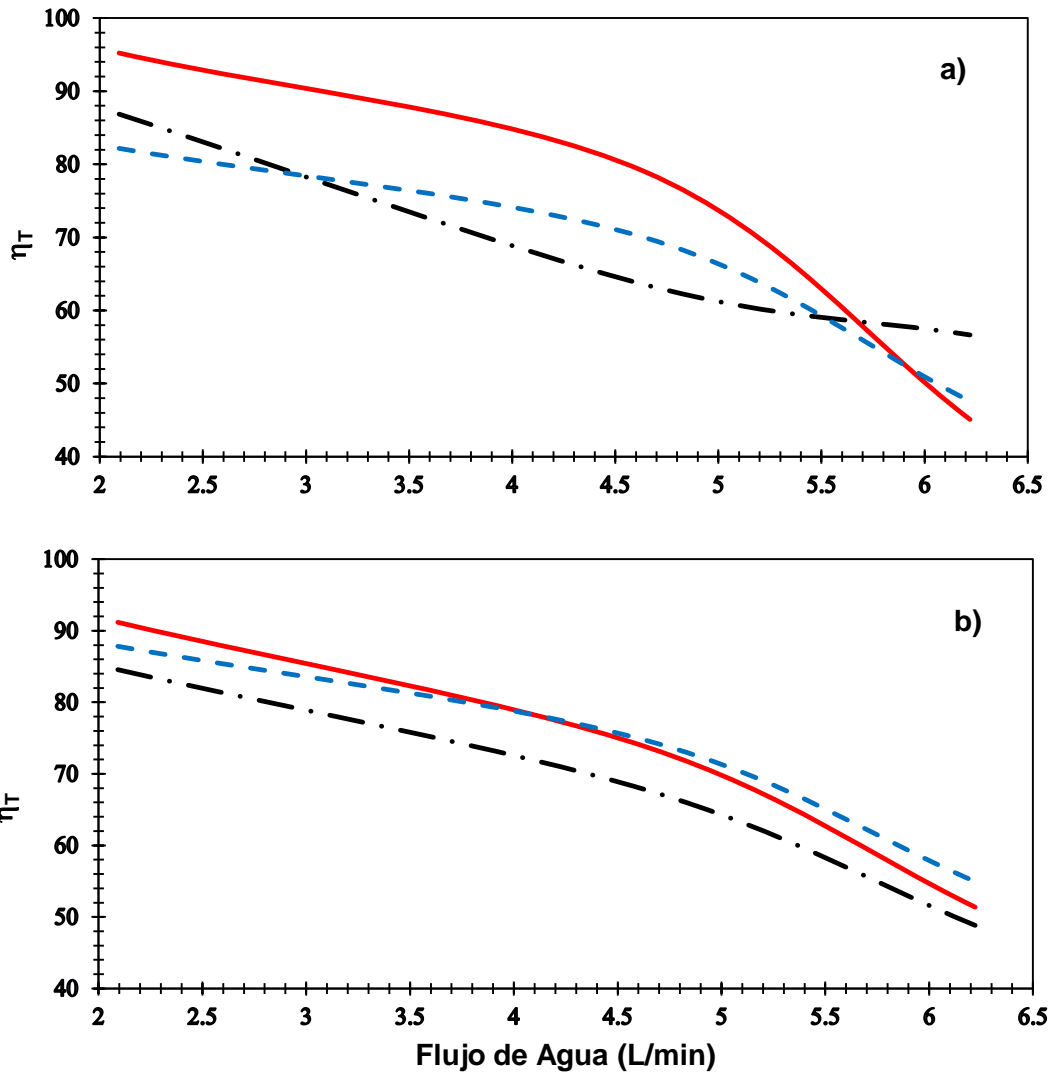


Figura 38. Eficiencia de la torre empacada vs flujo de agua; a) Nivel 1 de calentamiento, b) Nivel 2 de calentamiento.

- Ventanillas Laterales 100% Abiertas
- · - · - Ventanillas Laterales 50% Abiertas
- - - - Ventanillas Laterales 25% Abiertas

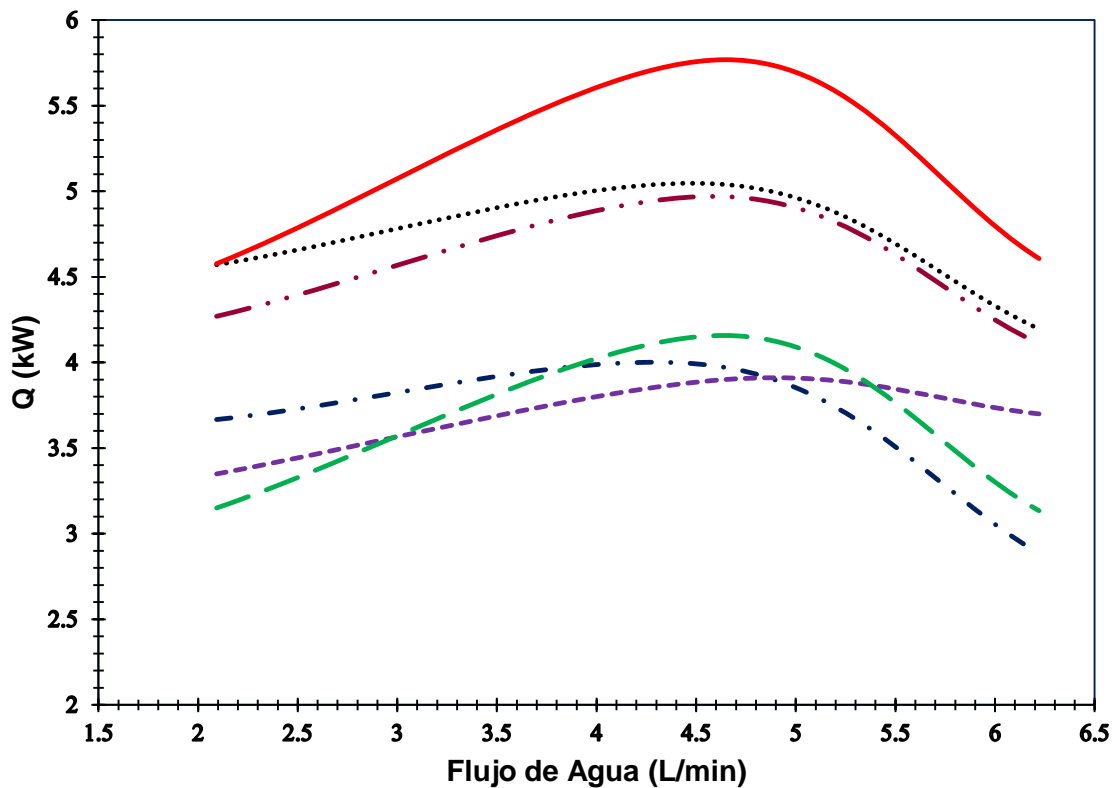


Figura 39. Potencia de transferencia de calor vs flujo de agua.

- · — · — Nivel 1 de calentamiento y ventanillas 100% abiertas
- · — · — Nivel 1 de calentamiento y ventanillas 50% abiertas
- · — · — Nivel 1 de calentamiento y ventanillas 25% abiertas
- Nivel 2 de calentamiento y ventanillas 100% abiertas
- · — · — Nivel 2 de calentamiento y ventanillas 50% abiertas
- Nivel 2 de calentamiento y ventanillas 25% abiertas

IV.6 Análisis de Resultados para Enfriamiento de Agua

En las Figuras 27-35 es posible observar el comportamiento de las líneas de operación, éstas al aumentar el flujo de agua la línea de operación tiene una reducción de tamaño, esto se debe al tiempo de residencia del agua en la resistencia (grifo eléctrico), la velocidad de flujo de agua es inversamente proporcional al tiempo de residencia, es decir entre mayor es la velocidad de flujo de agua menor es el tiempo de residencia del agua en la resistencia provocando

así un incremento de temperatura bajo a la entrada de la torre empacada. Por lo contrario con una velocidad de flujo de agua menor se obtiene un tiempo de residencia mayor lo que trae consigo una temperatura de entrada de agua elevada.

Otro inconveniente con el tiempo de residencia, pero ahora dentro de la torre de enfriamiento, es la rapidez del agua de entrada con poca temperatura, debido a la velocidad de flujo cruza a través de los 47 cm de empaque coolpad pues es tan rápido que el aire no alcanza a enfriarla el agua, teniendo así pérdidas de eficiencia como lo muestran las Tablas X, XVI y XXII.

El coeficiente de transferencia de masa (K_{ya}), representa la facilidad a la transferencia de masa, entre mayor es el coeficiente de transferencia de masa mayor es la facilidad de transferencia. Los coeficientes de transferencia de masa calculados para el empaque coolpad demuestran la facilidad de transferencia de éste. En la Figura 36 se graficó el coeficientes (K_{ya}) vs Flujo de agua, con el flujo de aire calculado, con diferentes condiciones de operación, el comportamiento del coeficiente (K_{ya}) no tuvo grandes variaciones se mantuvo parcialmente constante para cada condición de operación de la torre empacada. De igual manera en la Figura 37 se graficó el coeficientes (K_{ya}) vs Flujo de agua, con el flujo de aire medido experimentalmente y los resultados obtenidos tienen un comportamiento similar para cada condición de operación. Cabe señalar que la diferencia entre los valores del flujo de aire calculado y los del flujo de aire medido experimentalmente difiere en decimales.

La Figura 38 muestra el flujo de agua vs eficiencia de la torre empacada, como se observa a medida que el flujo de agua aumenta la eficiencia disminuye, para flujos de nivel 1 la eficiencia obtenida varía de un 95 a un 82%, mientras que para flujos de nivel 2 la eficiencia va de un 79 a un 63%, los flujos de nivel 3 son los que presentan menor eficiencia de desempeño pues arroja valores de eficiencia de un 56 a un 45%. El flujo de agua vs potencia de transferencia de calor se observa en la Figura 39, donde los valores de potencia de transferencia de calor son

mayores para el nivel 2 de calentamiento. Esto se debe a que el nivel 2 de calentamiento proporciona una mayor temperatura de entrada del agua a la torre, pues la resistencia (grifo eléctrico) le proporciona más calor al agua, con una temperatura de agua de entrada elevada se produce una mayor transferencia de calor en la torre empacada.

La torre empacada de tiro inducido construida para la realización de este trabajo se compara con una torre piloto de enfriamiento de tiro forzado construida y analizada por Jader D. Alean quien en su artículo publicado en el 2009, “Simulación de una Torre de Enfriamiento Mecánica Comparada con Curvas Experimentales”, obteniendo los resultados que muestra la Tabla XIX.

Tabla XIX. Resultados de torre de enfriamiento de tiro forzado analizada en el artículo “Simulación de una Torre de Enfriamiento Mecánica Comparada con Curvas Experimentales”.

Variable	Valores	unidades
K_{ya}	1.4	kg/seg-m ³
Q	2.99	kW
η_t	76	%
I_s	0.1242	kg/seg
g_s	0.0742	kg/seg
Z	1.42	m
A_t	0.0625	m ²

Haciendo un análisis comparativo se puede ver que el área de transferencia de la torre piloto tiene la misma área de transferencia que la torre empacada de tiro inducido construida, sin embargo la altura del empaque de la torre piloto de tiro forzado es tres veces mayor a la construida para este trabajo.

Aun así la torre empacada de tiro inducido presenta mayor eficiencia en la mayoría de las pruebas experimentales con niveles de flujo 1 y 2, tiene eficiencias

que van de 95 a un 79 %, mientras que la torre piloto presenta una eficiencia de 76%. En el nivel 3 de flujo de agua se obtuvieron eficiencias muy bajas con valores que van desde un 54 a 45%, esto significa que a niveles más altos de flujo de agua la torre empacada de tiro inducido no obtendrá una buena eficiencia. El empaque que se utilizó en la torre empacada de tiro inducido construida muestra una mayor transferencia de masa, en todas las condiciones de operación pues el coeficiente ($K_Y a$) más alto obtenido fue de 4.985 Kg/seg- m^3 y el más bajo de 2.487 Kg/seg- m^3 , todos superan el coeficiente con valor de 1.4 Kg/seg- m^3 de la torre de enfriamiento de tiro forzado, por lo tanto, la torre empacada de tiro inducido a nivel laboratorio cumple con los objetivos establecidos

IV.7 Resultados para Humidificación de Aire.

En la prueba experimental de humidificación de aire, se utilizaron las condiciones de niveles de flujo 1,2 y 3, así como rejillas de entrada de aire a un 100% de abertura y a un 50%, se tomaron datos de entrada de humedad relativa y temperatura de bulbo seco del aire. Estos mismos datos se estuvieron midiendo en intervalos de 10 segundos hasta lograr el punto de saturación máximo en cada una de las pruebas realizadas (ver Figuras 40 y 41).

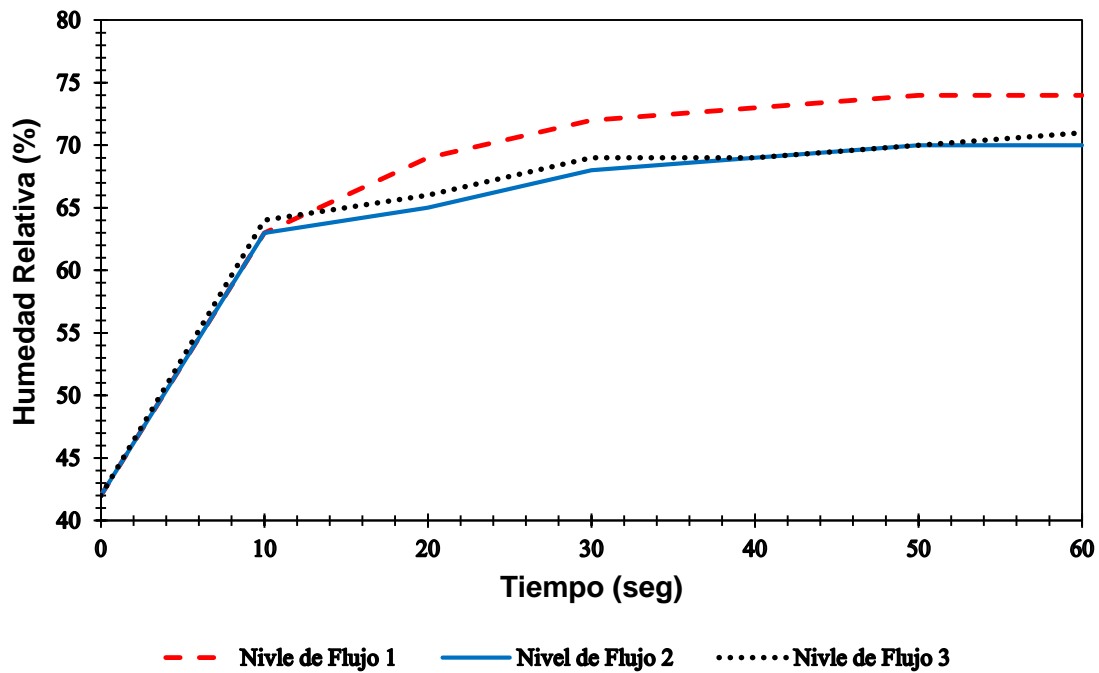


Figura 40. Grafica de humedad relativa vs tiempo para cada uno de los niveles de flujo de agua con ventanillas 100% abiertas.

Tabla XX. Comparación de porcentaje de saturación y temperatura de bulbo seco a la entrada y salida del sistema con ventanilla 100% abiertas.

Nivel de Flujo	T _{G1} (°C)	%S Entrada	T _{G2} (°C)	%S Salida
1	23.3	42.05	21.8	74.11
2	23.3	42.05	22	70.14
3	23.3	42.05	21.8	71.02

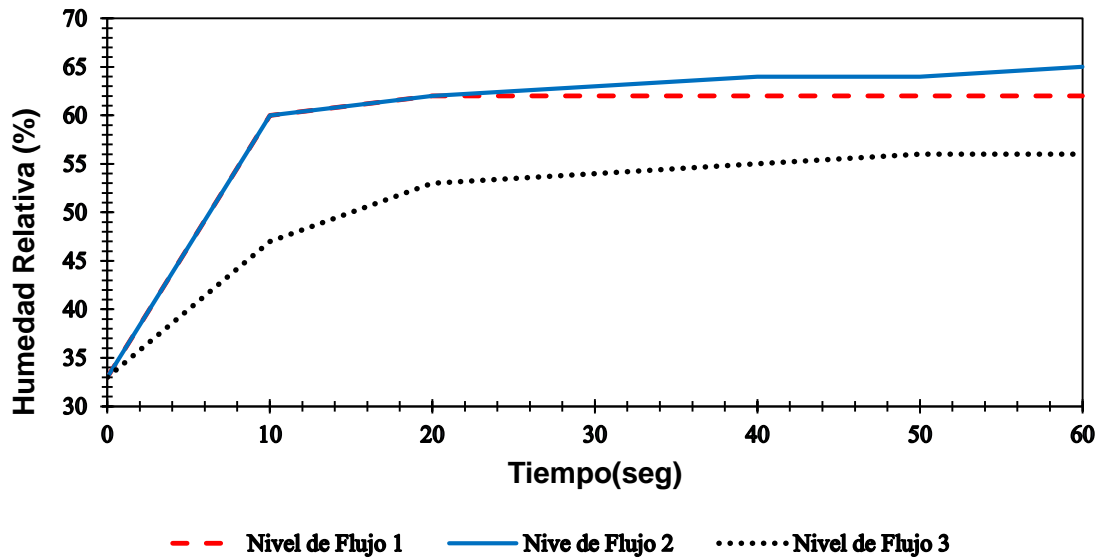


Figura 41. Grafica de humedad relativa vs tiempo para cada uno de los niveles de flujo de agua con ventanillas 50% abiertas.

Tabla XXI. Comparación de porcentaje de saturación y temperatura de bulbo seco a la entrada y salida del sistema con ventanilla 50% abiertas.

Nivel de Flujo	$T_{G1}(^{\circ}C)$	%S Entrada	$T_{G2}(^{\circ}C)$	%S Salida
1	24.3	33.02	22.9	62.1
2	24.3	33.02	23	65.14
3	24.3	33.02	23.7	56.1

IV.7.1 Línea de operación, eficiencia y agua de reposición para la humidificación.

En las Figuras 42 y 43 se muestran la líneas de operación a diferentes niveles de flujo de agua y aire, esta línea de operación se construyó sobre la carta psicrometrica utilizando temperatura de bulbo seco (T_G) y humedad absoluta (Y') de entrada y salida del sistema.

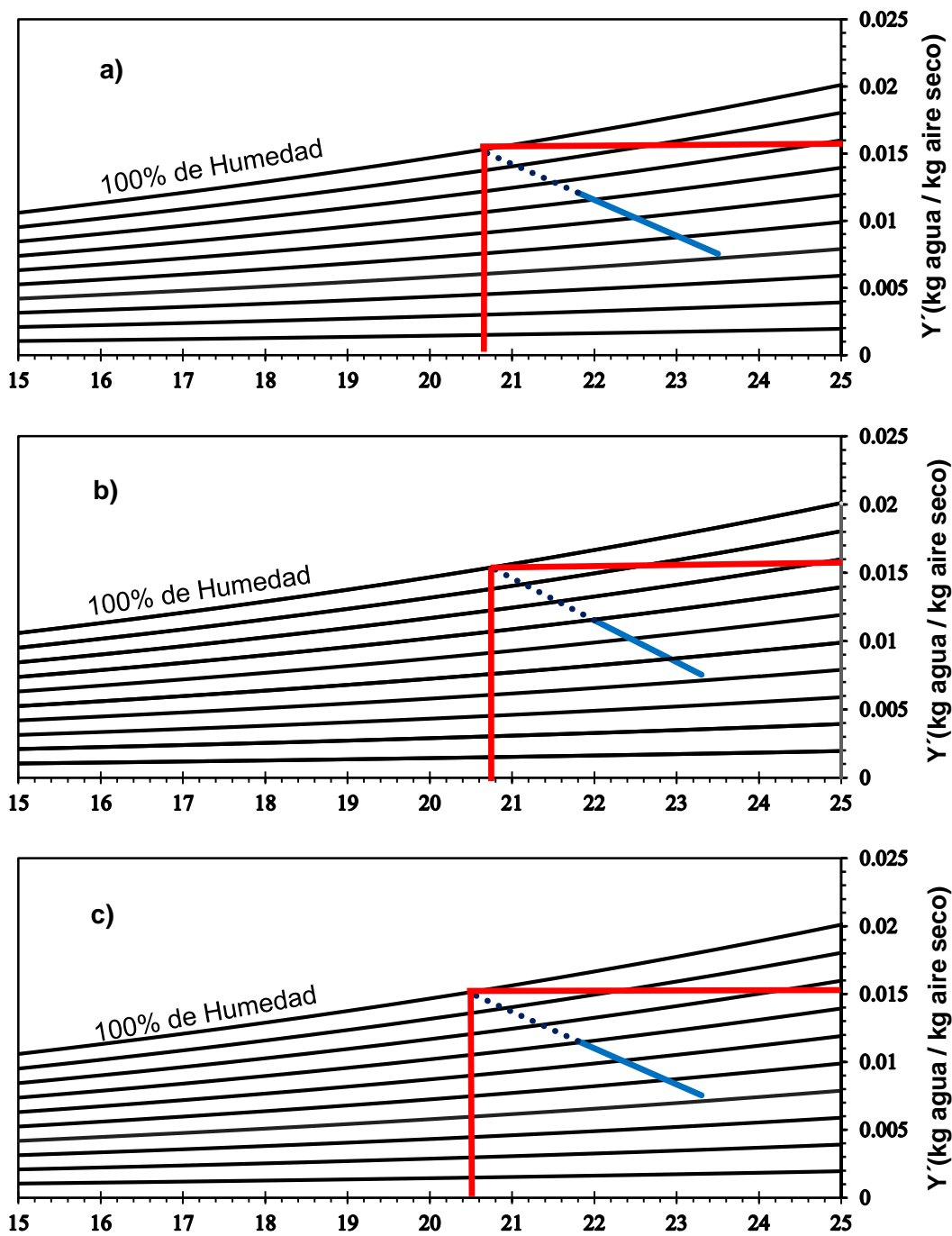


Figura 42. Graficas de línea de operación de humidificación con ventanillas 100% abiertas y con diferentes flujo de agua; a) Nivel 1, b) Nivel 2 y c) Nivel 3.

— Línea de Operación Prolongación de la Línea de operación

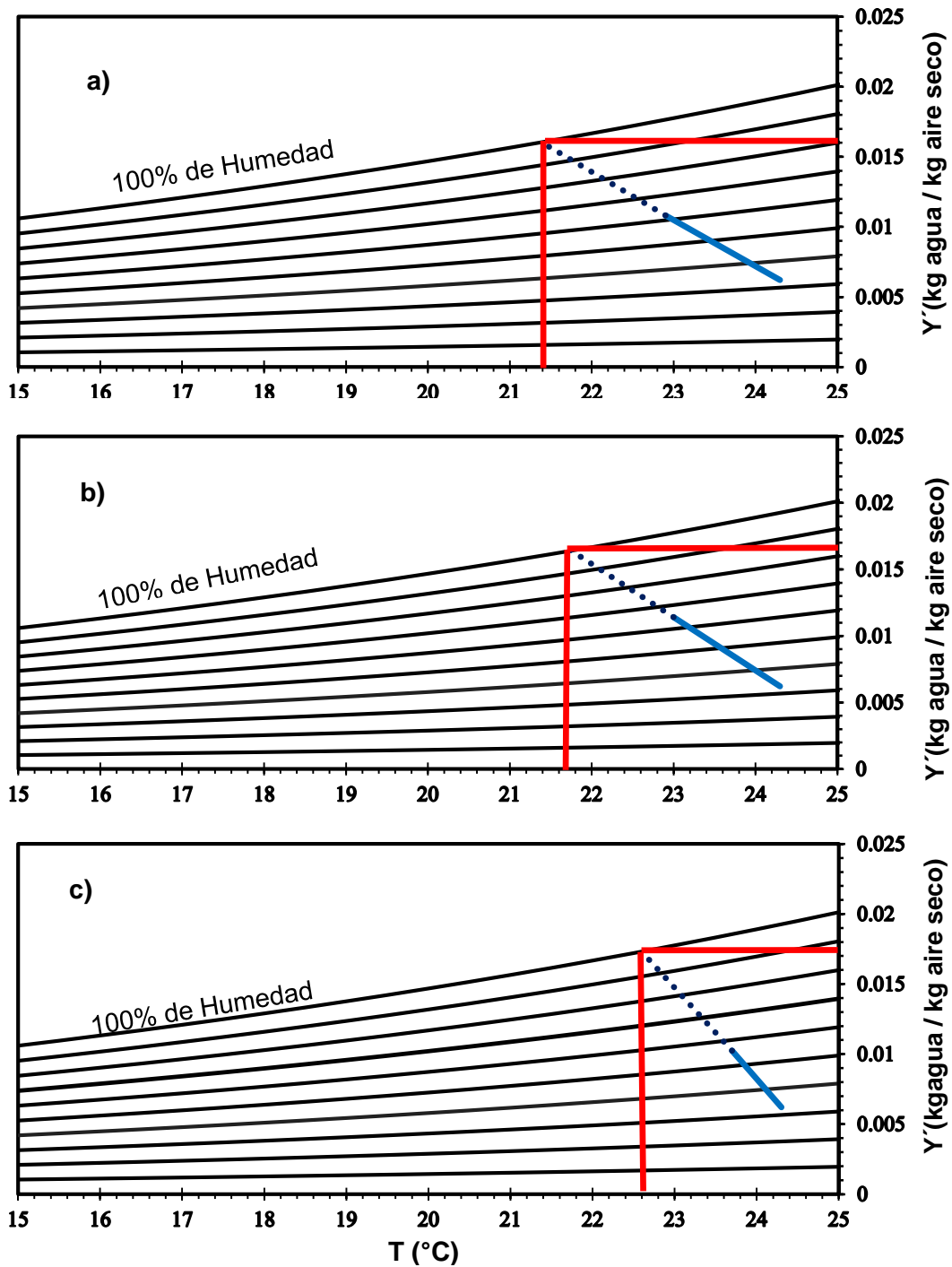


Figura 43. Graficas de línea de operación de humidificación con ventanillas 50% abiertas y con diferentes flujo de agua; a) Nivel 1, b) Nivel 2 y c) Nivel 3.

— Línea de Operación Prolongación de la Línea de operación

Como se puede observar en las líneas de operación tienes una prolongación punteada hasta la saturación, esto se realizó para leer los valores de la temperatura de bulbo húmedo (T_w) y la humedad absoluta de saturación (Y_s) y utilizar la Ec. (31) para obtener la eficiencia en cada uno de los casos, estos valores se muestran en las tablas XXII y XXIII.

Tabla XXII. Eficiencia de humidificación para ventanillas 100% abiertas.

Nivel de flujo	η_T (%)
1	58.6
2	51.6
3	52.4

Tabla XXIII. Eficiencia de humidificación para ventanillas 50% abiertas.

Nivel de flujo	η_T (%)
1	48.3
2	50
3	35.3

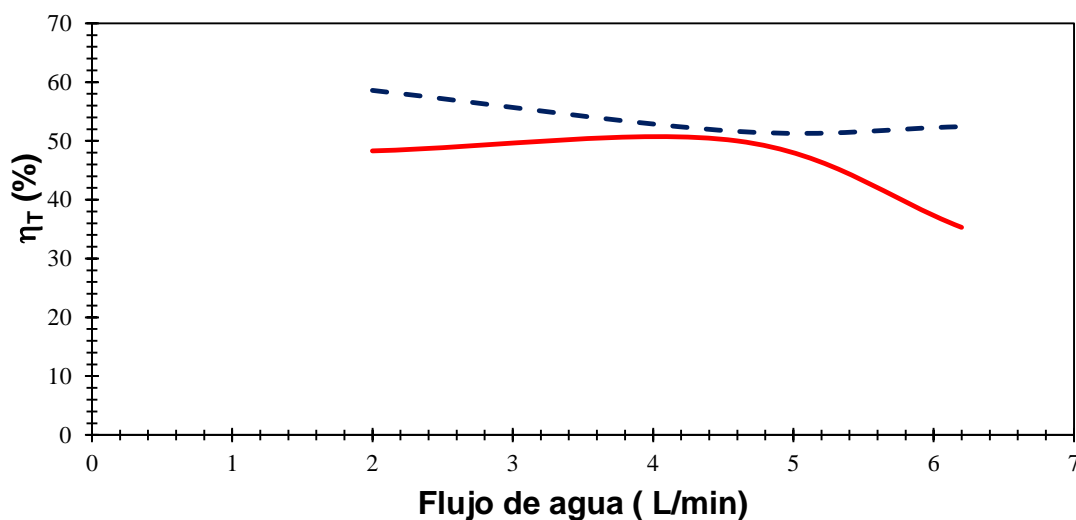


Figura 44. Grafica de eficiencia vs flujo de agua.

--- 100% Abierto — 50% Abierto

La siguiente Tabla XXIV muestra el agua que se necesita reponer por hora, para cada abertura de ventanilla y diferentes niveles flujos de agua, la Figura 44 muestra su variación con los diferentes flujos de agua y aire. Esta agua de reposición es el agua que se pierde por evaporación y se determina utilizando las humedades absolutas (Y') de entrada y salida del sistema multiplicando esa diferencia por el flujo de aire.

Tabla XXIV. Agua de Reposición Para Cada Flujo de Agua y Aire, M (L/hr).

Nivel de flujo	Rejillas 100%	Rejillas 50%
1	2.2	2.3
2	1.9	2.6
3	1.9	2

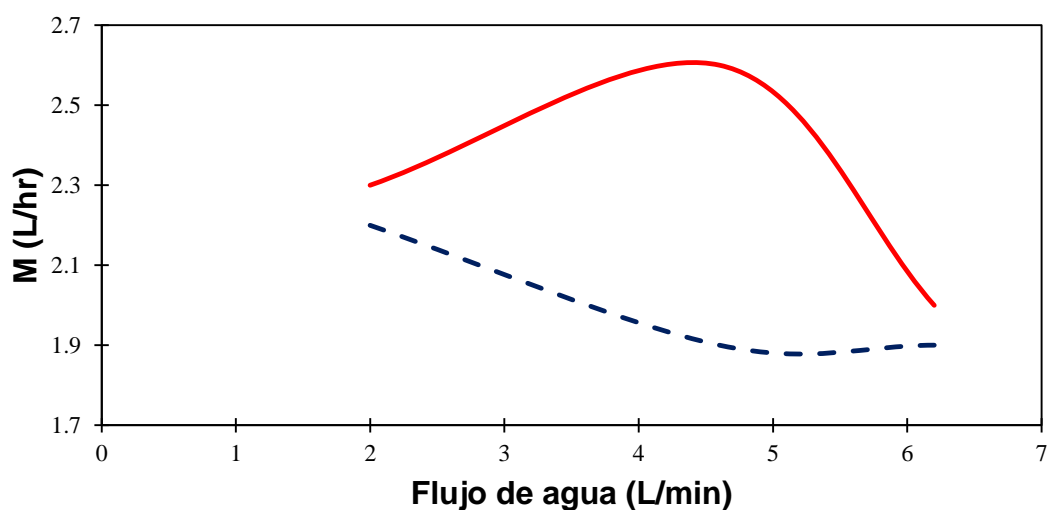


Figura 45. Grafica de reposición de agua vs flujo de agua.

--- 100% Abierto — 50% Abierto

IV.7.1 Análisis de resultados para humidificación de aire.

En la Figura 40 se puede observar que el flujo de agua de nivel 1 presenta una mayor humedad relativa, pero no muestra mucha diferencia a los otros dos niveles de flujo, mientras que en la Figura 41 se observa que el nivel de flujo de agua 2 tiene mayor alcance de humedad relativa, sin embargo en las dos gráficas se observa que en los primeros diez segundos se obtiene el mayor cambio de humedad del sistema. En las Tablas XX y XXI se observa con qué porcentaje de saturación entra al sistema y con qué porcentaje de saturación sale. La humedad absoluta fue determinada con la temperatura de bulbo seco y humedad relativa en el diagrama psicrométrico (Figura 1), la humedad absoluta de saturación se calculó con la Ec. (4) después se utilizó este valor en la Ec. (6) para calcular el porcentaje de saturación.

En humidificación se presentan eficiencias, estas no son tan altas como las que se presentan en el enfriamiento de agua, se pueden apreciar algunas variaciones con respecto a los flujos de agua y aire, con ventanillas laterales 100% abiertas se obtienen eficiencias más altas que cuando se opera con una abertura del 50% en las ventanillas y en ambos casos disminuyen cuando el flujo de agua aumenta como se puede ver en la Figura 44.

En la reposición del agua perdida por evaporación es pequeña, sin embargo se puede comparar entre los porcentajes de apertura de las ventanillas laterales, cuando las ventanillas tienen una apertura del 50% presentan más pérdida de agua por evaporación como se muestra en la Figura 45.

IV.8 Análisis Económico

En el mercado existen diversas compañías dedicadas al diseño y construcción de equipos de operaciones unitarias a nivel laboratorio como es Generatoris, S.A. de C.V a nivel nacional y EDIBON (España), Armfield (Reino Unido) en el extranjero. Con el objetivo de hacer una comparación del valor monetario de estos equipos se mandó cotizar una torre empacada para la operación unitaria

de humidificación con las empresas Armfield y Generatoris, S.A. Los precios de estos equipos se muestran en la Tabla XXV.

Tabla XXV. Precios de equipos de Laboratorio Para la Operación de Humidificación.

Equipo	Precio(MXN) sin Modulo	Precio(MXN)con Modulo
Generatoris	554,480.00	965,500
Armfield	325,730.40	492,354.32
Equipo Construido	42,733.84	-

La Torre Empacada para la Humidificación de Aire y el Enfriamiento de Agua construida para la experimentación tiene un valor económico muy inferior que los equipos construidos por empresas importantes como Armfield y Generatoris (ver Apéndice B). Sin embargo es posible la realización de prácticas a nivel laboratorio obteniendo buenos resultados, con esto se podrá cumplir el objetivo de estudiar la transferencia simultánea de masa y calor del sistema aire- agua.

V. Conclusiones y Recomendaciones

V.1 Conclusiones

La construcción y operación de la torre empacada para la humidificación de aire y enfriamiento de agua fue uno de los objetivos logrados con este trabajo, y después de haber experimentado en esta torre empacada fue posible cumplir con los objetivos específicos señalados al inicio del trabajo.

Los coeficientes de transferencia de masa (K_{ya}) calculados para el empaque coolpad demuestran un excelente contacto entre las fases. También se fue posible visualizar que la variación del flujo de entrada del agua a la torre no tiene una influencia dominante sobre el coeficiente de transferencia de masa dado que los valores obtenidos permanecen constantes.

El flujo de alimentación de agua tiene una gran influencia en la eficiencia de la torre empacada, entre mayor es el flujo menor es la eficiencia, esto es debido al tiempo de contacto del agua y el aire en el empaque.

Fue posible determinar la potencia de transferencia de calor donde se demostró que una mayor potencia de transferencia de calor es debido al aumento de temperatura de entrada del agua siendo así mayor la transferencia de calor en el área de contacto donde interactúa el flujo de aire y de agua. Otras variables que provocan cambios en el sistema son la temperatura del agua de entrada, humedad relativa de entrada y temperatura de bulbo seco de entrada.

Sin lugar a dudas el equipo constituido para la experimentación arroja excelentes resultados y teniendo claro el costo comercial en el mercado de un equipo como el construido, se sugiere seguir construyendo equipos para la experimentación y el estudio de las operaciones unitarias.

Se diseñó una práctica de laboratorio sobre Humidificación de Aire y Enfriamiento de Agua para los estudiantes de la Licenciatura de Ingeniería Química la cual aparece en el Anexo C.

V.2 Recomendaciones

Se recomienda antes de realizar experimentos en el equipo construido:

- Seguir los lineamientos descritos en el manual de operación, así mismo leer el manual de operación para lograr una comprensión y entendimiento del sistema.
- Utilizar agua destilada en la operación de la torre empacada.
- Para la realización prácticas de laboratorio sobre el enfriamiento de agua utilizar niveles de flujo de agua 2 a 4 L/min, que la temperatura del agua de entrada no exceda los 45 °C y las condiciones de humedad relativa menor a 60% esto es para que la torre de enfriamiento tenga buena eficiencia y un mejor rendimiento.
- En Prácticas de humidificación se recomienda trabajar con temperaturas de bulbo seco de 24 a 32 °C y humedad relativa menores de 45% esto con el fin de que se observe un mayor cambio en la temperatura de bulbo seco como también en la humedad relativa, estos cambios se podrán apreciar mejor con ventanillas laterales completamente abiertas, porque tiene mayor alcance de humidificación de aire.

ANEXO

A

Tablas de datos experimentales

Tabla A.I Datos experimentales de operación de la torre de enfriamiento con para un flujo de aire de ventanillas 100% abiertas.

Variable	Flujo 1		Flujo 2		Flujo 3		Unidades
	Nivel de Calentamiento		Nivel de Calentamiento		Nivel de Calentamiento		
	1	2	1	2	1	2	
Z	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	m
L	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	m
A _t	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	m ²
H _{r1}	57	57	57	57	57	0.57	%
T _{L1}	19.6	21.375	21.6	23.9	26.45	27.5	°C
T _{G1}	24.3	24.3	24.3	24.3	24.3	24.3	°C
H _{as1}	25	25	25	25	25	25	kJ/kg
H _{sat1}	75	75	70	70	75	75	kJ/kg
H' ₁	53.5	53.5	50.65	50.65	53.5	53.5	kJ/kg
T _{w1}	18.34	18.34	18.34	18.35	18.35	18.35	°C
C _L	4.187	4.187	4.187	4.187	4.187	4.187	kJ/kg-K
Y' ₁	0.0108	0.0108	0.0108	0.0108	0.0108	0.0108	kgA/kgB
H _{r2}	92.5	91.5	87.75	91.25	82.5	0.9025	%
T _{L2}	44.77	52.75	33.875	39.475	33.1	37.175	°C
T _{G2}	26.35	27.7	25.8	28.4	27.275	28.325	°C
H _{as}	28	27	27	29	27	29	kJ/kg
H _{sat}	83	89	80	92	88	92	kJ/kg
H' ₂	78.875	83.73	73.5075	86.4875	77.325	85.8575	kJ/kg
T _{w2}	25.03	26	23.61	27.19	24.85	26.97	°C
Y' ₂	0.0201	0.0216	0.0184	0.0224	0.0189	0.0221	kgA/kgB

Tabla A.II Datos experimentales de operación de la torre de enfriamiento con para un flujo de aire de ventanillas 50% abiertas.

Variable	Flujo 1		Flujo 2		Flujo 3		Unidades
	Nivel de Calentamiento		Nivel de Calentamiento		Nivel de Calentamiento		
	1	2	1	2	1	2	
Z	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	m
L	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	m
A _t	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	m ²
H _{r1}	48	48	48	48	48	48	%
T _{l1}	17.975	19.85	21.4	21.825	21.025	24.425	°C
T _{G1}	21.3	21.3	21.3	21.3	21.3	21.3	°C
H _{as1}	23	23	23	23	23	23	kJ/kg
H _{sat1}	59	59	59	59	59	59	kJ/kg
H' ₁	40.28	40.28	40.28	40.28	40.28	40.28	kJ/kg
T _{w1}	14.49	14.49	14.49	14.49	14.49	14.49	°C
C _L	4.187	4.187	4.187	4.187	4.187	4.187	kJ/kg-K
Y' ₁	0.0075	0.0075	0.0075	0.0075	0.0075	0.0075	kgA/kgB
H _{r2}	89.5	92.5	88.25	89.25	83.25	87.75	%
T _{L2}	40.975	49.2	33.45	37.2	29.575	33.9	°C
T _{G2}	23.3	26.425	25.15	25.875	23.95	26.2	°C
H _{as}	25	27	25	27	24	26	kJ/kg
H _{sat}	68	82	77	79	73	81	kJ/kg
H' ₂	63.485	77.875	70.89	73.41	64.7925	74.2625	kJ/kg
T _{w2}	21.99	25.46	23.62	24.45	24.85	26.97	°C
Y' ₂	0.0161	0.0202	0.0178	0.0188	0.0155	0.0188	kgA/kgB

Tabla A.III Datos experimentales de operación de la torre de enfriamiento con para un flujo de aire de ventanillas 25% abiertas.

Variable	Flujo 1		Flujo 2		Flujo 3		Unidades
	Nivel de Calentamiento		Nivel de Calentamiento		Nivel de Calentamiento		
	1	2	1	2	1	2	
Z	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	m
L	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	m
A _t	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	m ²
H _{r1}	55	55	55	55	55	55	%
T _{l1}	20.95	20.625	21.775	22.325	24.225	24.975	°C
T _{G1}	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	°C
H _{as1}	23	23	23	23	23	23	kJ/kg
H _{sat1}	64	64	64	64	64	64	kJ/kg
H' ₁	45.55	45.55	45.55	45.55	45.55	45.55	kJ/kg
T _{w1}	16.26	16.26	16.26	16.26	16.26	16.26	°C
C _L	4.187	4.187	4.187	4.187	4.187	4.187	kJ/kg-K
Y' ₁	0.0091	0.0091	0.0091	0.0091	0.0091	0.0091	kgA/kgB
H _{r2}	92	93.5	87	90.75	83.75	87	%
T _{L2}	42.575	52.05	34.625	40.15	31.45	35.6	°C
T _{G2}	25.575	27.65	25.675	26.87	25.4	26.125	°C
H _{as}	27	28	27	27	26	26	kJ/kg
H _{sat}	79	88	79	84	77	81	kJ/kg
H' ₂	74.84	84.1	72.24	78.7275	68.7125	73.85	kJ/kg
T _{w2}	24.53	25.46	23.95	24.45	22.86	24.39	°C
Y' ₂	0.0165	0.022	0.0181	0.0203	0.0171	0.0186	kgA/kgB

ANEXO

B

Tablas de costos construcción y equipamiento de la torre

Tabla B.I Costos de los materiales para la construcción de la torre empacada.

	Cantidad	Precio Unitario (MXN)	Precio Neto
Angulo Aluminio 1"	2	104.9	209.8
Vidrio 25x15 cm	6	7.44	44.64
Vidrio 25x50 cm	4	24.8	99.2
Vidrio 29x24 cm	1	13.8	13.8
Hoja de Acrílico 29x29	4	37.4	149.6
Lamina de Aluminio 30x30x30	1	88	88
Adhesivo 100% de silicona 300mL	3	64.9	194.7
Remache 1/4"	50	0.25	12.5
Malla de Aluminio 25x25	2	12	24
Desagüe 1"	1	18.5	18.5
Reducción macho-hembra 3/4" a 1/2"	1	5.5	5.5
Nipple de PVC 1/2"	1	3.5	3.5
Válvula de Bola de PVC	1	42.5	42.5
Adaptador Macho 1/2"	3	3.5	10.5
Tubo Hidráulico PVC RD 26 1/2"	1	12	12
Codo 90° de PVC 1/2"	3	5	15
Rosca Unión Universal PVC 1/2"	2	26.5	53
Adaptador hembra de 1/2"	1	4.5	4.5
Rosca Unión Universal CPVC 1/2"	1	29	29
Tubo Hidráulico CPVC 1/2"	1	17	17
"T" hidráulica de CPVC 1/2"	1	5	5
Conector Recto de bronce para manguera	1	36	36
Conector Recto de plástico para manguera	1	8	8
Manguera Synflex Eclipse de 3/8"	1	48	48
Tubo Hidráulico de PVC de RD 26 3/4"	1/2	14	7
Codo 90° de PVC 3/4"	1	5	5
"T" hidráulica de PVC 3/4"	1	6	6
Tornillo con rosca 1/2"	8	1.2	9.6
Empaque de hule	1	52	52
Empaque coolpad	2	59	118
PTR 1"	1	25	25
Pintura en aerosol plata metálico	1	37	37
Tapones de goma 1"	4	5.5	22
Total Materiales			\$1,425.84

Tabla B.II Costos de los equipos de la torre empacada.

Equipos	Cantidad	Precio Unitario (MXN)	Precio Neto (MXN)
Ventilador ROBEL 008	1	1200	1200
Grifo Eléctrico Lorenzetti	1	700	700
Bomba MICROPUMP® modelo 75211-62	1	39000	39000
Termómetro Digital	2	204	408
Total Equipos			\$41,308.00

Tabla B.III Valor Total de la Torre Empacada

	Valor
Total Materiales	1425.84
Total Equipos	41308.00
Valor Total de la Torre Empacada	\$42,733.84

ANEXO

C

**Practica para estudiantes de la licenciatura de ingeniería
química**

Práctica torre de humidificación de aire y enfriamiento de agua

Las operaciones de humidificación y deshumidificación implican transferencia de materia entre una fase líquida pura y un gas permanente que es casi insoluble en el líquido. Por otra parte, tanto la transferencia de calor como la transferencia de materia son importantes y se condicionan mutuamente. Cuando un líquido relativamente caliente se pone en contacto directo con un gas que no está saturado, parte del líquido se vaporiza. La temperatura del líquido disminuye debido principalmente al calor latente de evaporación. Este contacto directo de un gas con un líquido puro es muy frecuente en los casos de contacto de aire con agua para los siguientes propósitos: humidificación de aire para controlar el contenido de humedad del mismo en operaciones de secado o de acondicionamiento de aire; deshumidificación de aire, en el que el agua fría condensa algo del vapor de agua del aire caliente; y enfriamiento de agua donde la evaporación del agua en el aire enfría el agua caliente.

En una torre típica para enfriamiento de agua, el agua caliente fluye a contracorriente del aire. Por lo general, el agua caliente entra por la parte superior de una torre empacada y cae en cascada a través del material de empaque, y sale por el fondo. El aire entra por la parte inferior de la torre y fluye hacia arriba, a través del agua que desciende. El empaque de la torre distribuye el agua por medio de acanaladuras, lo cual suministra un área extensa interfacial de contacto entre el agua y el aire en forma de gotas y película de agua. El flujo de aire ascendente a través de la torre se puede inducir por medio de la tendencia natural del aire caliente a subir (tiro natural) o bien por la acción de un ventilador (tiro mecánico).

Objetivos

1. Conocer el funcionamiento y las partes que componen a una torre empacada para humidificación de aire y de enfriamiento de agua.
2. Realizar los balances de transferencia de masa y energía en la operación de humidificación.
3. Determinar el coeficiente global de transferencia de calor y como es afectado por diferentes variables.
4. Realizar el balance de energía para determinar la eficiencia global y potencia de transferencia de calor en una torre empacada de tiro inducido.

Cuestionario:

1. Describa la clasificación de las torres de enfriamiento y las partes que las componen.
2. Describa las ecuaciones para graficar una carta psicrométrica a partir de las tablas de vapor o las constantes de Antonie.
3. Obtenga la expresión para graficar las líneas de humidificación adiabática o líneas de bulbo húmedo en la carta psicrométrica.
4. Que representan las unidades de transferencia globales en una torre de humidificación.
5. Como se determina la eficiencia y potencia de una torre de enfriamiento.

Material de consulta:

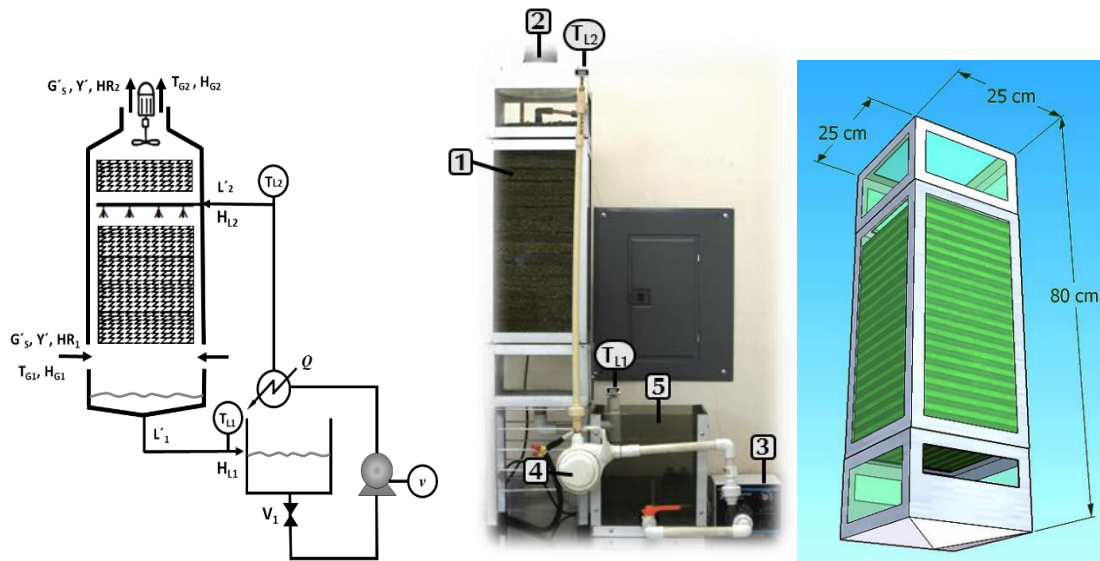
1. Treybal, R. E. (1994). Operaciones de humidificación. En *Operaciones de transferencia de masa*. México: McGraw-Hill.
2. McCabe, W. L., Smith, J. C., Harriott, P., (2007). Operación de Humidificación. En *Operaciones unitarias en Ingeniería Química*. México: McGraw-Hill.
3. Foust, A. S. (1969). Principios de operaciones unitarias. México: Compañía Editorial Continental.

Materiales y Sustancias:

Se requiere de un higrómetro que mida la temperatura de bulbo húmedo y/o humedad relativa. Un anemómetro para medir la velocidad de flujo de aire y un cronómetro para determinar el flujo de agua.

El equipo que se utiliza en la práctica se compone de las siguientes partes:

1. Una columna empacada de material de celulosa Coolpad (47 cm de altura)
2. Un ventilador extractor de aire (ROBEL 008) para provocar el tiro inducido de flujo axial.
3. Una bomba centrífuga de flujo variable 90-9000 rpm (MICROPUMP® modelo 75211-62)
4. Una resistencia eléctrica con una potencia de 4.5 kW (Grifo eléctrico Lorenzetti)
5. Un depósito de almacenamiento y recirculación de agua enfriada con capacidad de 20L.
6. Dos termómetros digitales para registro de temperatura de agua en la entrada (T_{L2}) y salida (T_{L1}) de la torre.



Metodología:

Parte A. Humidificación de Aire

1. Identifique cada uno de los componentes de la torre de enfriamiento experimental. Conecte la bomba a la línea de alimentación de energía eléctrica. Encienda los termómetros digitales y permita que se estabilicen las lecturas de temperatura en cada uno de ellos, en caso de que se presenten incrementos registrarlos en la bitácora.
2. Verifique que las válvulas de suministro de agua se encuentren completamente abiertas y abra las ventanillas laterales de la torre para permitir el flujo de entrada del aire a la torre. Mida la temperatura del agua en el depósito, así como la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo del aire ambiental. Registre en la bitácora los valores de las condiciones iniciales del experimento.
3. Energizar primeramente el ventilador para medir la velocidad de aire en la entrada y salida de la columna con ayuda de un anemómetro.
4. Con el higrómetro registrar las temperaturas y humedad relativa del aire a la entrada y en la salida de la torre.
5. Seleccionar un nivel de velocidad de la bomba y encenderla permitiendo que se establezca el flujo de agua y aire por espacio de 5 minutos. Con una probeta y cronómetro determine el flujo de agua a la salida del equipo.
6. Registrar todos los valores de temperatura de entrada y salida del agua, así como las temperaturas y humedad relativa del aire a la entrada y en la salida de la torre.

7. Repetir el procedimiento anterior seleccionando un flujo diferente para la entrada de agua. Hacer lo mismo para el flujo de aire cerrando las ventanillas.

Parte B. Enfriamiento de Agua

1. Conecte el grifo eléctrico a la línea de alimentación de energía eléctrica. Nota importante: no se debe energizar la resistencia del grifo mientras no exista agua dentro de las tuberías.
2. Encender la bomba y al mismo tiempo conectar el ventilador, regular los flujos de agua y aire a los valores deseados.
3. Establecer el nivel de calentamiento del agua (en este caso el grifo eléctrico Lorenzetti permite dos niveles de calentamiento).
4. Con el higrómetro registrar la temperatura y humedad relativa del aire a la entrada de la torre.
5. Registrar valores de temperatura de entrada y salida del agua desde el inicio del calentamiento, al mismo tiempo colocar el higrómetro a la salida del aire de la torre y registrar temperatura del aire y la humedad relativa durante intervalos de 10 segundos.
6. Repetir el procedimiento anterior para distintos flujos de entrada de agua y de aire.

Cálculos:

1. Realizar graficas de humedad relativa vs tiempo, comparar y discutir su comportamiento con los diferentes flujos de entrada de agua y aire.
2. Construir línea de operación, comparar y discutir su comportamiento con los diferentes flujos de entrada de agua y aire, y niveles de calentamiento del agua de entrada.

Para el Reporte:

1. Calcular N_{TOG} , H_{TOG} y k_{ya} para cada condición de operación de la torre empacada establecida.
2. Determinar la eficiencia de la torre empacada para cada condición de operación establecida.
3. Haga una gráfica de Flujo de agua vs Eficiencia, compare y discuta su comportamiento con las distintas condiciones de operación de la torre.
4. Haga una gráfica de Flujo de agua vs Potencia de Transferencia de Calor, compare y discuta su comportamiento con las distintas condiciones de operación de la torre.

5. Resuelva el siguiente problema: Una torre de enfriamiento de tiro inducido con flujo a contra corriente, enfría el agua de 43°C a 26.7°C cuando el aire ambiente está a 32.2°C, con una temperatura de bulbo húmedo de 15.6°C, con un gasto de líquido de 7300 Kg/hr-m² y utilizando la k_{ya} promedio obtenida en la experimentación.
- Determinar el flujo mínimo de gas.
 - Determinar la altura de empaque necesaria si el gasto de flujo gaseoso que se use es dos veces el mínimo encontrado en el inciso (a).
 - Calcular potencia de transferencia de calor.
 - Calcular eficiencia.

ANEXO

D

Superficie interfacial especifica del empaque coolpad

Procedimiento para la determinación de la superficie interfacial específica del empaque coolpad

- 1) Agregar 2 litros de agua al tanque graduado.
- 2) Sumergir en el tanque una pieza de empaque de dimensiones de 2.5 cm de altura y 25 cm de cada lado.
- 3) Registrar volumen desplazado (volumen del sólido).
- 4) El volumen obtenido en el paso anterior restarlo al volumen total para obtener el volumen de espacios vacíos.
- 5) Al volumen de espacios vacíos dividirlo entre la altura para obtener el área de espacios vacíos.
- 6) Con el área obtenida en el paso anterior se divide entre el volumen total del empaque y se obtiene la superficie interfacial específica.

Tabla de pieza de empaque.

Volumen del sólido	65.2 cm ³
Volumen vacío	1497.3 cm ³
Volumen total	1562.5 cm ³
Área de espacios vacíos	598.9 cm ²
Superficie interfacial específica	0.38 cm ² /cm ³

Bibliografía

- Alean, J. (2009, 07). *Simulación de una Torre de Enfriamiento Mecánica Comparada con Curvas Experimentales*. Recuperado 02, 2015, de <http://www.scielo.cl/pdf/infotec/v20n3/art03.pdf>
- ASHRAE, (2009, 01). *Psicrometría*. Recuperado 02, 2015, de <https://avdiaz.files.wordpress.com/2009/01/i-unidad1.pdf>
- Armstrong (2015, 01). *Soluciones Integrales de Sistemas*. Recuperado 02, 2015, de <http://www.armstronginternational.com/es/humidification>
- Elonka, S. M., Robinson, J. F., & Noriega, F. G. (1983). *Operación de plantas industriales: Preguntas y respuestas*. México: Libros McGraw-Hill de México.
- Foust, A. S. (1969). *Principios de operaciones unitarias*. México: Compañía Editorial Continental.
- JS Humidifiers (2003, 01). Recuperado 01, 2015, de <http://www.jshumidificadores.com.mx/aplicaciones-humidificador-industrial/>
- Kern, D. Q. (1999). *Procesos de Transferencia de Calor*. México: CONTINENTAL, S.A. DE C.V. MEXICO
- Marcilla, G. A., & García, C. A. N. (2002). *Introducción a las operaciones de separación: Contacto continuo*. Alicante: Universidad de Alicante.
- McCabe, W. L., Smith, J. C., Harriott, P., Lanto, A. M. A., Collí, S. M. T., & Osorio, M. A. (2002). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. México: McGraw-Hill.
- Pilatowsky Figueroa, (2002, 07). *Psicrometría, métodos de humidificación y dehumidificación y sus aplicaciones en el diseño arquitectónico*. Recuperado 01, 2015, de <http://www.uap.edu.pe/intranet/fac/material/24/20102BT24022421824010>

- Sulvaran Aguirre, J. (2013, 03). "*Rehabilitación de la torre marley de-101 en el complejo petroquímico pajaritos*". Recuperado 02, 2015, de <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/34394/1/sulvaranaguirre.pdf>
- Treybal, R. E. (1994). *Operaciones de transferencia de masa*. México: McGraw-Hill.
- Villa Jadán, S. (2009, 04).). *Determinación de correlaciones para tasa global de transferencia de calor y caída de presión en un determinado relleno de torre de enfriamiento utilizando un equipo experimental*. Recuperado 02, 2015, de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/862/1/1632.pdf>