



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE UN SISTEMA  
DE RECUPERACIÓN DE AGUA DE LAVADORAS DE ENVASES DE VIDRIO**

**Eric Joselito Aldana**

Asesorado por el Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez

Guatemala, julio de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE UN SISTEMA  
DE RECUPERACIÓN DE AGUA DE LAVADORAS DE ENVASES DE VIDRIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**ERIC JOSELITO ALDANA**

ASESORADO POR EL ING. VÍCTOR MANUEL MONZÓN VALDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, JULIO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
EXAMINADORA	Inga. Casta Petrona Zeceña Zeceña
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE AGUA DE LAVADORAS DE ENVASES DE VIDRIO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha marzo de 2013.



**Eric Joselito Aldana**

Guatemala, 07 de mayo del 2013

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
Dirección de Escuela de Ingeniería Química  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
Presente

Por medio de la presente hago constar que luego de previas revisiones, apruebo el Informe Final del Trabajo de Graduación titulado **“Evaluación del desempeño de una torre de enfriamiento de un sistema de recuperación de agua de lavadoras de envases de vidrio”** presentado por el estudiante universitario de la carrera de Ingeniería Química, Eric Joselito Aldana, quien se identifica con el número de carnet 200611212.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo.

Atentamente,



Ing. Qco. Víctor Manuel Monzón Valdez

Colegiado No. 656

Ing. Qco. Víctor Manuel Monzón Valdez  
Colegiado No. 656



Guatemala, 31 de mayo de 2013  
Ref. EI.Q.TG-IF.036.2013

Ingeniero  
**Víctor Manuel Monzón Valdez**  
DIRECTOR  
Escuela Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el Acta TG-048-2012-IF le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

### INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Eric Joselito Aldana**.

Identificado con número de carné: **2006-11212**

Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

#### EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE AGUA DE LAVADORAS DE ENVASES DE VIDRIO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Víctor Manuel Monzón Valdez**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

  
Ing. Jorge Mario Estrada Asturias  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
ACREDITADO POR  
Agencia Centroamericana de Acreditación de  
Programas de Arquitectura y de Ingeniería  
Período 2013 - 2015



ACAAI

Agencia Centroamericana de Acreditación de  
Programas de Arquitectura y de Ingeniería



El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **ERIC JOSELITO ALDANA** titulado: **"EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE AGUA DE LAVADORAS DE ENVASES DE VIDRIO"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, julio 2013

Cc: Archivo  
VMMV/ale

Universidad de San Carlos  
de Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 473 .2013

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE AGUA DE LAVADORAS DE ENVASES DE VIDRIO**, presentado por el estudiante universitario: **Eric Joselito Aldana**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno  
Decano en Funciones

Guatemala, 3 de julio de 2013

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por ser la fuente inagotable de amor, misericordia y sabiduría. Porque de él, y por él, y para él son todas las cosas.
<b>Mi madre</b>	Mirna Noemí Aldana por su amor y apoyo incondicional. Por su espíritu abnegado para sacrificar su tiempo, fuerzas y salud para mi beneficio.
<b>Mis hermanos</b>	Johan Gilberto, Luis Pablo Roberto y Ricardo Rafael Aldana (q.e.p.d.) por su amistad y apoyo.
<b>Mis abuelos</b>	Rafael Aldana (q.e.p.d.) y Zoila Aldana por los valores inculcados a través de su ejemplo.
<b>Mis tíos</b>	Por sus consejos, cuidados y disposición para amar.
<b>Amigos</b>	Por compartir a mi lado momentos de alegría y tristeza, abundancia y necesidad.
<b>Maestros</b>	Profesora Aura Violeta Hill, por su interés y seguimiento en mi formación académica.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**La Universidad de San  
Carlos de Guatemala**

Por la oportunidad de realizar mis estudios universitarios y brindarme los conocimientos necesarios para ser un profesional.

**Ing. Víctor Abel Salazar**

Por su apoyo brindado en el desarrollo del presente trabajo de graduación.

**Centro Guatemalteco  
para la Producción más  
Limpia**

Por su apoyo técnico y profesional en cada etapa del presente trabajo de investigación.

**Ing. Víctor Manuel  
Monzón Valdez**

Por su inversión de tiempo y conocimientos para el desarrollo del presente trabajo de graduación.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XIII
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS/HIPÓTESIS.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. ANTECEDENTES.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Enfriamiento evaporativo.....	3
2.2. Carta o gráfica de humedad.....	3
2.3. Temperatura de bulbo húmedo.....	4
2.4. Torres de enfriamiento.....	5
2.5. Tipos de torres de enfriamiento.....	5
2.5.1. Torres de tiro natural.....	5
2.5.1.1. Torres atmosféricas.....	6
2.5.1.2. Torres hiperbólicas.....	6
2.5.2. Torres de tiro mecánico.....	7
2.5.2.1. Torres de tiro forzado.....	7
2.5.2.2. Torres de tiro inducido.....	7
2.5.3. Torres de doble flujo.....	8
2.6. Empaques y torres empacadas.....	9
2.7. Contacto entre líquido y el gas.....	12

2.8	Especificaciones técnicas de la torre de enfriamiento en tratamiento .....	13
3.	METODOLOGÍA .....	17
3.1.	Variables .....	17
3.2.	Delimitación del campo de estudio .....	18
3.3.	Recursos humanos disponibles .....	18
3.4.	Recursos materiales disponibles .....	19
3.4.1.	Equipo .....	19
3.4.2.	Instrumentos de laboratorio .....	19
3.4.3.	Reactivos.....	20
3.5.	Técnica cuantitativa.....	20
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información .....	20
3.6.1.	Diseño de observaciones .....	21
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información .....	21
3.7.1.	Metodología para la medición de variables.....	22
3.7.1.1.	Flujo de agua a la entrada de torre de enfriamiento .....	22
3.7.1.2.	Temperatura de bulbo húmedo.....	23
3.7.1.3.	Temperatura de bulbo seco .....	24
3.7.1.4.	Temperatura del agua a la entrada y salida de la torre de enfriamiento .....	24
3.7.1.5.	Velocidad del aire .....	25
3.7.2.	Muestra de cálculo .....	25
3.7.2.1.	Rango de enfriamiento.....	26
3.7.2.2.	Aproximación .....	26
3.7.2.3.	Eficiencia térmica de torre de enfriamiento .....	27

3.7.2.4.	Carga de enfriamiento.....	27
3.7.2.5.	Coeficiente de transferencia de masa .....	28
3.7.2.6.	Presión atmosférica.....	29
3.7.2.7.	Carta psicrométrica .....	29
3.7.2.8.	Área transversal de torre de enfriamiento .....	29
3.7.2.9.	Densidad de irrigación.....	30
3.8.	Análisis estadístico .....	30
3.8.1.	Hipótesis estadísticas .....	30
3.8.2.	Hipótesis descriptiva .....	32
3.8.3.	Análisis de hipótesis correlacionales.....	32
3.8.4.	Análisis de hipótesis de comparación de grupos.....	33
4.	RESULTADOS.....	37
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	49
	CONCLUSIONES.....	55
	RECOMENDACIONES.....	57
	BIBLIOGRAFÍA.....	59
	APÉNDICE .....	61
	ANEXOS .....	91



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Empaques comunes en torres: (a) montura Berl; (b) montura Intalox; (c) anillos Rasching; (d) anillo plástico Pall .....	11
2.	Empaque de torre de enfriamiento en tratamiento.....	14
3.	Laminilla de empaque de torre de enfriamiento en tratamiento .....	15
4.	Espacio vacío entre laminillas de empaque de torre de enfriamiento en tratamiento .....	15
5.	Torre de enfriamiento del sistema de recuperación de agua de lavadoras en tratamiento.....	16
6.	Curva de eficiencia térmica promedio de torre de enfriamiento trabajando la lavadora de envase de línea 3 para cada relación de flujo agua/aire .....	38
7.	Curva de eficiencia térmica promedio de torre de enfriamiento trabajando las lavadoras de envase de línea 3 y línea 1 para cada relación de flujo aire/agua .....	39
8.	Curva de eficiencia térmica global de torre de enfriamiento para cada relación de flujo agua/aire.....	40
9.	Curva de coeficiente de transferencia de masa de torre de enfriamiento obtenido para cada relación de flujo agua/aire.....	42
10.	Curva de carga de enfriamiento de torre de enfriamiento para cada relación de flujo agua/aire .....	44
11.	Línea de saturación y línea de operación de torre de enfriamiento para la relación de flujo agua/aire de 0,75 a una presión atmosférica promedio de 0,83 atmósferas.....	46

12.	Línea de saturación y línea de operación de torre de enfriamiento para la relación de flujo agua/aire de 0,81 a una presión atmosférica promedio de 0,83 atmósferas .....	47
13.	Línea de saturación y línea de operación de torre de enfriamiento para la relación de flujo agua/aire de 0,85 a una presión atmosférica promedio de 0,83 atmósferas .....	48

## TABLAS

I.	Especificaciones técnicas de la torre de enfriamiento en tratamiento ..	13
II.	Especificaciones de empaque de torre de enfriamiento en tratamiento.....	14
III.	Variables de medición .....	17
IV.	Delimitación del campo de estudio .....	18
V.	Orden cronológico de toma de datos .....	21
VI.	Hipótesis estadísticas .....	31
VII.	Eficiencia térmica promedio obtenida de torre de enfriamiento trabajando la lavadora de envase de línea 3 para cada relación de flujo agua/aire .....	37
VIII.	Eficiencia térmica promedio obtenida de torre de enfriamiento trabajando las lavadoras de envase de línea 3 y línea 1 para cada relación de flujo agua/aire.....	37
IX.	Parámetros estadísticos de la curva de eficiencia térmica de torre de enfriamiento trabajando la lavadora de línea 3 respecto la relación de flujo agua/aire.....	38
X.	Parámetros estadísticos de la curva de eficiencia térmica de torre de enfriamiento trabajando la lavadora de línea 3 y línea 1 respecto la relación de flujo agua/aire .....	39

XI.	Eficiencia térmica global de torre de enfriamiento para cada relación de flujo agua/aire .....	40
XII.	Parámetros estadísticos de la curva de eficiencia térmica global de torre de enfriamiento para cada relación de flujo agua/aire .....	41
XIII.	Eficiencia térmica obtenida de torre de enfriamiento para cada relación de flujo agua/aire y los resultados de los parámetros estadísticos .....	41
XIV.	Coeficiente de transferencia de masa de torre de enfriamiento obtenido para cada relación de flujo agua/aire .....	42
XV.	Parámetros estadísticos de la curva de coeficiente de transferencia de masa de torre de enfriamiento para cada relación de flujo agua/aire .....	43
XVI.	Carga de enfriamiento de torre de enfriamiento para cada relación de flujo agua/aire.....	43
XVII.	Parámetros estadísticos de la curva de carga de enfriamiento de torre de enfriamiento para cada relación de flujo agua/aire .....	44
XVIII.	Eficiencia térmica de torre de enfriamiento antes y después de mantenimiento .....	44
XIX.	Área transversal óptima y área transversal real de torre de enfriamiento para cada flujo de agua a la entrada de la misma.....	45



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>Z</b>	Altura de torre de enfriamiento
<b>APROX</b>	Aproximación
<b>A<sub>o</sub></b>	Área transversal ideal de torre
<b>A<sub>T</sub></b>	Área transversal real de torre
<b>atm</b>	Atmósferas
<b>CE</b>	Carga de enfriamiento
<b>K<sub>ya</sub></b>	Coeficiente global de transferencia de masa
<b>ρ<sub>i</sub></b>	Densidad de irrigación
<b>S</b>	Desviación estándar
<b>ET</b>	Eficiencia térmica
<b>H<sub>ea</sub></b>	Entalpía del agua a la entrada
<b>H<sub>sa</sub></b>	Entalpía del agua a la salida

<b>H*</b>	Entalpía del aire en equilibrio con el agua
<b>H<sub>ye</sub></b>	Entalpía del aire saturado a la entrada
<b>H<sub>ys</sub></b>	Entalpía del aire saturado a la salida
<b>M</b>	Flujo másico de agua
<b>G</b>	Flujo másico de aire
<b>gal</b>	Galones
<b>°C</b>	Grados celsius
<b>gl</b>	Grados de libertad
<b>°F</b>	Grados Fahrenheit
<b>h</b>	Horas
<b>KJ</b>	Kilojoules
<b>kg</b>	Kilogramos
<b>l</b>	Litros
<b><math>\bar{X}</math></b>	Media aritmética
<b>m</b>	Metros

<b>min</b>	Minutos
<b>ft</b>	Pies
<b>%</b>	Porcentaje
<b>R</b>	Rango de enfriamiento
<b>L/G</b>	Relación líquido-gas.
<b>s</b>	Segundos
<b><math>\alpha</math></b>	Significancia
<b>P</b>	Significancia calculada
<b>N</b>	Tamaño de la muestra
<b>T<sub>ea</sub></b>	Temperatura de entrada del agua
<b>T<sub>bhe</sub></b>	Temperatura de bulbo húmedo de aire a la entrada
<b>T<sub>sa</sub></b>	Temperatura de salida del agua



## GLOSARIO

<b>Agua recuperada</b>	Agua residual del proceso de lavado, la cual es tratada previa a ser reinsertada en dicho proceso.
<b>Anemómetro</b>	Aparato destinado para medir la velocidad del aire.
<b>Aproximación</b>	Diferencia entre la temperatura de agua de salida de la torre de enfriamiento y la temperatura de bulbo húmedo.
<b>Área transversal</b>	Medida de la sección de superficie que cruza en dirección perpendicular al lado longitudinal de la torre de enfriamiento.
<b>Calor latente</b>	Energía requerida por unidad de sustancia para cambiar de fase.
<b>Calor sensible</b>	Energía que absorbe o libera un cuerpo sin que ocurra un cambio de fase.
<b>Carga de enfriamiento</b>	Calor disipado en una torre de enfriamiento, igual al producto del flujo másico de agua por el rango de enfriamiento.
<b>Densidad de irrigación</b>	Flujo de agua por unidad de área transversal de torre de enfriamiento.

<b>Entalpía</b>	Cantidad de energía que un sistema puede intercambiar con su entorno.
<b>Evaporación</b>	Cambio del estado líquido al estado gaseoso.
<b>Flujo másico</b>	Cantidad en masa de líquido o gas por unidad de tiempo.
<b>Flujómetro ultrasónico</b>	Dispositivo electrónico utilizado para la medición de flujo de agua, a través de señales acústicas de frecuencia conocida emitidas por un transductor emisor y captadas por un transductor receptor.
<b>Humedad</b>	Cantidad de vapor de agua presente en el aire.
<b>Lavadora de envases</b>	Máquina fabricada para eliminar partículas sólidas y microorganismos presentes en el envase.
<b>Nivel de confianza</b>	Probabilidad de que la media verdadera se ubique en un intervalo dado. Suele expresarse como porcentaje.
<b>Presión atmosférica</b>	Es la fuerza que el peso de la columna de atmósfera por encima del punto de medición ejerce por unidad de área.
<b>Saturación adiabática</b>	Proceso en el cual se satura de vapor de agua una cantidad de masa de aire determinada sin intercambiar calor con el entorno.

## RESUMEN

La presente investigación consiste en una evaluación de parámetros de desempeño y de diseño de una torre de enfriamiento de un sistema de recuperación de agua de lavadoras de envases, con la finalidad de determinar la causa del incumplimiento de la misma con los requerimientos de temperatura.

Para ello, se planteó una hipótesis general, la cual propuso que el incumplimiento con los requerimientos de temperatura de planta, se debía a un mal diseño de la torre de enfriamiento, a la falta de mantenimiento de la misma o a condiciones operacionales inadecuadas.

La evaluación se desarrolló cuantificando los valores de cada una de las variables necesarias para describir el fenómeno. Las mediciones se realizaron para 3 niveles de tratamiento distintos, esto haciendo variar la relación de flujo másico agua/aire. Cada nivel de tratamiento se realizó bajo 2 condiciones diferentes, trabajando una lavadora de envases y trabajando las 2 lavadoras de envases existentes.

A partir de las mediciones realizadas y de los parámetros calculados, se logró determinar que el incumplimiento de la torre de enfriamiento del sistema de recuperación de agua de lavadoras de envases con los requerimientos de temperatura de planta se debe a un mal diseño de la misma.



# OBJETIVOS

## General

Evaluar el desempeño de una torre de enfriamiento de un sistema de recuperación de agua de lavadoras de envases de vidrio.

## Específicos

1. Evaluar la relación de la eficiencia térmica de la torre de enfriamiento respecto a la razón agua/aire.
2. Evaluar la relación de la carga de enfriamiento de la torre de enfriamiento respecto a la razón agua/aire.
3. Evaluar el coeficiente de transferencia de masa de la torre de enfriamiento respecto a la razón agua/aire.
4. Establecer líneas de operación de la torre de enfriamiento del sistema de recuperación de agua de lavadoras de envases de vidrio.
5. Establecer las condiciones operativas que generen la mayor eficiencia térmica en la torre de enfriamiento del sistema de recuperación de agua de lavadoras de envases de vidrio.

## **HIPÓTESIS**

El incumplimiento de la torre de enfriamiento con los requerimientos de temperatura de planta se debe a un mal diseño de la torre de enfriamiento, a condiciones operacionales inadecuadas o a la falta de mantenimiento de la misma.

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento acelerado poblacional e industrial, ha generado grandes demandas de los recursos hídricos, dificultando cada vez más satisfacer las necesidades básicas de la población. Ante esta problemática, es necesario realizar esfuerzos encaminados al máximo aprovechamiento del uso del agua, indispensable para minimizar el deterioro ambiental.

En Guatemala la industria manufacturera es la segunda actividad económica que más consume agua para sus procesos productivos. Es por ello que es importante recuperar el agua y reutilizarla el mayor número de veces posible. Para ello es necesario contar con un sistema de enfriamiento bien diseñado para que los requerimientos de temperatura del agua que se reinserta en el proceso cumplan con las exigentes demandas técnicas y sanitarias.

Ante la importancia de contar con un sistema de enfriamiento efectivo y bien diseñado, se desarrolló la presente investigación, con la finalidad de determinar la causa del incumplimiento de una torre de enfriamiento de un sistema de recuperación de agua de lavadoras con los requerimientos de temperatura de planta.



## 1. ANTECEDENTES

En el Compendio Estadístico Ambiental 2010 publicado por el Instituto Nacional de Estadística (INE) con ayuda de la Oficina Coordinadora Sectorial de Estadísticas de Ambiente y Recursos Naturales (OCSE/Ambiente) y el Instituto Agricultura, Recursos Naturales y el Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA) de la Universidad Rafael Landívar muestra el panorama económico, social, ambiental e institucional de Guatemala para el 2010.

De acuerdo con estimaciones realizadas del 2006 la industria manufacturera es la segunda actividad económica que más agua utiliza, cerca del 24 por ciento del total de agua disponible para consumo, seguida de la agricultura y ganadería con un 56 por ciento. El documento refleja una creciente demanda del recurso hídrico, que es limitado, tanto para las actividades económicas como para el uso domiciliario. “El crecimiento de la población, el uso agrícola e industrial dan lugar a presiones en los recursos de agua dulce llegando a considerar los límites al desarrollo económico, al considerar que el agua es un recurso finito y bajo presiones humanas.”<sup>1</sup>

Además establece que la problemática del agua se complica al considerar la variabilidad climática, y la falta de políticas nacionales sobre la gestión integrada de los recursos hídricos.

Ante la urgente necesidad de conservar el recurso hídrico y mejorar la eficiencia y calidad de los procesos, el Centro Guatemalteco para la Producción

---

<sup>1</sup> INE. Compendio estadístico ambiental 2010. p. 27.

más Limpia junto al Fondo Mundial para la Vida Salvaje (WWF por sus siglas en inglés) realizan esfuerzos para lograr este objetivo. Es por esta razón que surge el presente trabajo de investigación, considerando además, que no existen estudios previos relacionados con el desempeño de una torre de enfriamiento de un sistema de recuperación de agua de lavadoras de envases de vidrio.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Enfriamiento evaporativo**

El enfriamiento evaporativo se basa en un sencillo principio, cuando se evapora el agua, el calor latente de evaporación se absorbe del cuerpo del agua y del aire de los alrededores. Como resultado, tanto el agua como el aire se enfrían durante el proceso. Este fenómeno se ha empleado por cientos de años para enfriar agua.

### **2.2. Carta o gráfica de humedad**

Un diagrama apropiado para mostrar las propiedades de las mezclas de un gas permanente y un vapor condensable es la gráfica de humedad. En una gráfica de humedad las temperaturas de bulbo seco se muestran sobre el eje horizontal y la humedad específica sobre el eje vertical. En el extremo izquierdo se observa una curva (llamada línea de saturación) en lugar de una línea recta. Todos los estados de aire saturado se localizan en esta curva. Por lo tanto, es también la curva de un 100 por ciento de humedad relativa. Otras curvas de humedad relativa constantes tienen la misma forma general.

Las líneas de temperatura de bulbo húmedo constante tienen una apariencia descendiente hacia la derecha. Las líneas de volumen específico constante parecen similares, excepto que son más inclinadas. Las líneas de entalpía constante están casi paralelas a las líneas de temperatura de bulbo húmedo constante. Por consiguiente, las líneas de temperatura de bulbo

húmedo constante en algunas gráficas se emplean como líneas de entalpía constante.

Para aire saturado, las temperaturas de bulbo seco, de bulbo húmedo y de punto de rocío son idénticas, por tanto, la temperatura de punto de rocío del aire atmosférico en cualquier punto sobre la gráfica se determina al dibujar una línea horizontal desde el punto hasta la curva saturada. El vapor de la temperatura en el punto de intersección es la temperatura de punto de rocío.

La carta psicrométrica es una valiosa ayuda en la visualización de los procesos de acondicionamiento de aire.

### **2.3. Temperatura de bulbo húmedo**

Las fuerzas impulsoras para la transferencia de materia y calor son las diferencias de concentración y temperatura, las cuales son predecibles utilizando una cantidad llamada temperatura de bulbo húmedo.

“La temperatura de bulbo húmedo es la temperatura de no equilibrio que en estado estacionario alcanza una pequeña masa de líquido cuando se encuentra sumergido, en condiciones adiabáticas, en una corriente de gas”<sup>2</sup>. Puesto que el flujo de gas es continuo, las propiedades de éste son constantes y por lo regular se evalúan en condiciones de entrada. Si el gas no está saturado, parte del líquido se evapora, enfriando el líquido restante hasta que la velocidad de transferencia de calor hacia el líquido balancea el calor necesario para la evaporación. La temperatura del líquido cuando se alcanza el estado estacionario es la temperatura de bulbo húmedo.

---

<sup>2</sup> Maccabe, W. Operaciones unitarias en ingeniería química. p. 656.

## **2.4. Torres de enfriamiento**

Cuando se pone en contacto un líquido caliente con un gas insaturado, parte del líquido se evapora y la temperatura del mismo desciende. Las torres de enfriamiento utilizan este principio, para disminuir la temperatura de agua recirculada que usan los condensadores e intercambiadores de calor en plantas químicas, plantas de energía, unidades de aire acondicionado. Las torres de enfriamiento son columnas de un gran diámetro con tipos de empaque especiales diseñados para ofrecer un buen contacto líquido-gas con una baja caída de presión.

El agua caliente se distribuye sobre el empaque por medio de boquillas aspersoras y el aire pasa a través del empaque por medio de ventiladores de tiro forzado o inducido, o en ciertos diseños es arrastrado por convección natural.

## **2.5. Tipos de torres de enfriamiento**

Las torres de enfriamiento se clasifican de acuerdo a la forma en la cual el aire es introducido en la torre. Los tipos de torre de enfriamiento existentes son: de tiro natural, tiro mecánico y doble flujo.

### **2.5.1. Torres de tiro natural**

La entrada del aire en este tipo de torre es de forma natural. La torre debe ubicarse de manera que las corrientes de aire entren perpendicularmente a las persianas de entrada.

### **2.5.1.1. Torres atmosféricas**

La idea de una torre de enfriamiento se inició con el estanque de rocío, donde el agua caliente es rociada en el aire y se enfría por medio de éste cuando cae en el estanque. Algunos estanques de rocío aún se utilizan en la actualidad. No obstante, requieren de 25 a 50 veces el área de una torre de enfriamiento, implican pérdidas considerables de agua debido al arrastre de aire, y carecen de protección contra el polvo y la polución<sup>3</sup>. También se podría descargar el calor de desecho en un estanque de enfriamiento, que es básicamente un gran lago abierto a la atmósfera. Aunque la transferencia de calor de la superficie del estanque a la atmósfera es muy lenta, y en este caso se necesitaría de casi 20 veces el área del estanque de rocío para producir el mismo enfriamiento.

### **2.5.1.2. Torres hiperbólicas**

Una torre natural de este tipo se asemeja a una gran chimenea y trabaja como una chimenea ordinaria. El aire en la torre tiene un alto contenido de vapor de agua, por lo que es más ligero que el aire exterior. En consecuencia, el aire ligero en la torre asciende y el aire exterior más pesado llena el espacio desocupado; de esta forma, se crea un flujo de aire del fondo de la torre hacia la parte superior. La tasa de flujo de aire es controlada por las condiciones del aire atmosférico.

Las torres de enfriamiento no necesitan ninguna fuente de potencia externa para inducir el aire, pero su construcción resulta un poco más costosa que la de las torres de enfriamiento de tiro forzado. El perfil de las torres de enfriamiento de tiro natural es hiperbólico. El objetivo del perfil hiperbólico es

---

<sup>3</sup> Cengel, Y. Termodinámica. p. 752.

tener una mayor resistencia estructural y no obedece a ninguna razón termodinámica.

## **2.5.2. Torres de tiro mecánico**

Las torres de tiro mecánico crean su propia corriente de aire por medio de ventiladores movido por motores. Esto es de gran valor en cualquier operación en la que se necesite un estricto control de la temperatura del agua. Este tipo de torres tienen la ventaja de pueden colocarse en espacios reducidos, la cabeza de bombeo es regularmente baja y existe un estricto control de temperatura de agua.

### **2.5.2.1. Torres de tiro forzado**

En este tipo de torres el ventilador se monta en la base y se hace entrar el aire para su descarga en la parte posterior. Esta disposición tiene la ventaja de ubicar el ventilador y el motor propulsor fuera de la torre, sitio muy conveniente para su inspección, mantenimiento y reparación. Puesto que el equipo queda fuera de la parte superior caliente y húmeda de la torre, el ventilador no está sometido a condiciones corrosivas; sin embargo, debido a la escasa velocidad del aire de salida, la torre está sujeta a una recirculación excesiva de vapores húmedos de salida creando una reducción en el buen desempeño al incrementarse la temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada<sup>4</sup>.

### **2.5.2.2. Torres de tiro inducido**

En las torres de tiro inducido el flujo de aire entra por un costado succionado por el ventilador y es guiado hacia la salida por el mismo efecto de

---

<sup>4</sup> García, H. Guía para el diseño de torres de enfriamiento. p. 15.

succión pasando por la sección de relleno. El agua caliente entra en la parte superior de la torre y se rocía en esta corriente de aire. El propósito del rociado es exponer una gran área superficial de agua al aire. Cuando las gotas de agua caen bajo la influencia de la gravedad, una pequeña fracción del agua (por lo común un pequeño porcentaje) se evapora y enfría el agua restante. La temperatura y el contenido de humedad del aire se incrementan durante este proceso.

Dependiendo de las direcciones relativas del flujo de agua y de aire pueden ser de flujo transversal y contraflujo. Desde el punto de vista termodinámico, la configuración a contraflujo es más eficaz, ya que el agua más fría entra en contacto con el aire más frío, obteniendo así un máximo potencial de entalpía. Mientras mayores son las gamas de enfriamiento y más difícil la diferencia útil de temperaturas, tanto más evidentes serán las ventajas del tipo de contraflujo.

Puede reducirse con eficacia la característica de torre a acercamientos muy bajos incrementando la cantidad de aire para proporcionar una razón de líquido/gas más baja. El aumento en el flujo de aire se logra alargando la torre para aumentar el área de corte transversal para el flujo de aire incrementando con ello el aprovechamiento de potencia del ventilador. La elección económica entre el sistema de contraflujo y el transversal se determina según la efectividad de llenado, las condiciones de diseño y los costos de construcción de la torre.

### **2.5.3. Torres de doble flujo**

Son conocidas también, como torres de flujo cruzado ya que son una combinación de tiro inducido solo que con dos cámaras. El flujo de aire entra horizontalmente en cada una de las cámaras y es succionado por un ventilador

que está centrado en la parte superior de la torre, estas torres tienen eliminadores de arrastre para dirigir el aire hacia la parte superior donde se encuentra el ventilador, además de evitar el arrastre del agua hacia el exterior.

## **2.6. Empaques y torres empacadas**

Una torre empacada es una torre equipada con una entrada de gas y un espacio de distribución en la parte inferior; una entrada de líquido y un distribuidor en la parte superior; salidas para el gas y el líquido por la parte superior e inferior, respectivamente; y una masa soportada de cuerpos sólidos inertes que recibe el nombre de torre empacada. El soporte de empaque consiste por lo general en una criba o tamiz corrugado, para darle fuerza, con una gran fracción de área libre de forma que no se produzca inundación en el soporte. El líquido entrante, se distribuye sobre la parte superior del empaque mediante un distribuidor y, en la operación ideal, moja de manera uniforme la superficie del empaque.

El gas, entra en el espacio de distribución situado debajo del empaque y asciende a través de los intersticios del empaque en contracorriente con el flujo del líquido. El empaque proporciona una gran área de contacto entre el líquido y el gas, favoreciendo así un íntimo contacto entre las fases.

Los empaques de las torres de enfriamiento se dividen en tres principales tipos: aquellos que son cargados de forma aleatoria en la torre, los que son colocados a mano, y aquellos que se conocen como empaques ordenados o estructurados. Los empaques aleatorios consisten en unidades de 6 a 75 milímetros en su dimensión mayor; los empaques inferiores a 25 milímetros se utilizan principalmente en columnas de laboratorio o de plantas piloto. “Las unidades de empaque ordenado son de tamaños comprendidos entre unidades

de 50 a 200 milímetros”<sup>5</sup>. Éstos se ocupan mucho menos que los empaques aleatorios.

La mayoría de los empaques aleatorios de las torres se construyen con materiales baratos e inertes, tales como arcilla, porcelana o diferentes plásticos. A veces se utilizan anillos metálicos de pared delgada, de acero o aluminio. Se alcanzan altos espacios vacíos y pasajes o pasos grandes para los fluidos haciendo las unidades de empaque irregulares o huecas, de forma que se entrelazan para dar lugar a estructuras abiertas con una porosidad de 60 a 90 por ciento.

Las monturas cerámicas Berl y los anillos Rasching son los tipos de empaque más antiguos y no son muy usados en la actualidad, aunque representaron una mejora importante respecto de las esferas de cerámica o la piedra triturada que se introdujeron primero. Las monturas Intalox son similares a las monturas Berl, pero la forma impide que las piezas queden demasiado juntas, y esto aumenta la porosidad del lecho. Las monturas de SuperIntalox tienen una pequeña variación con respecto al borde escalopado; se encuentran disponibles en plástico o en cerámica.

Los anillos Pall están hechos de metal delgado con porciones de la pared inclinada hacia dentro, o de plástico con ranuras en las paredes y costillas rígidas dentro. Los empaques Hy-pack metálicos y Flexirings son similares en forma y funcionamiento a los anillos metálicos Pall. Los lechos de anillos Pall tienen alrededor de 90 por ciento de fracción de huecos y una ligera caída de presión que otros empaques de tamaño nominal parecido.

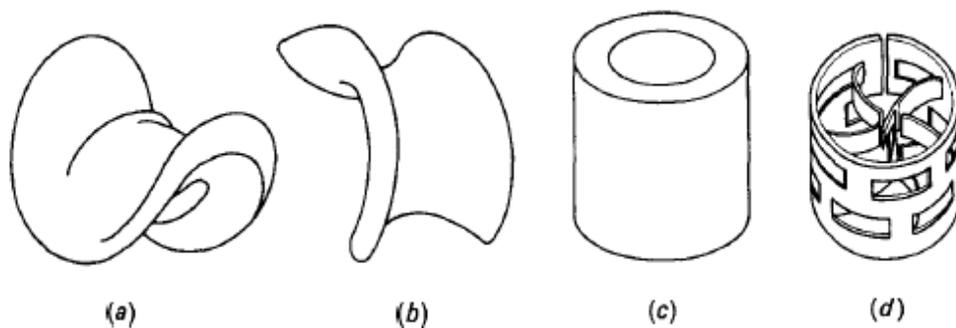
---

<sup>5</sup> Maccabe, W. Operaciones unitarias en ingeniería química. p. 594.

Los empaques estructurados con orden geométrico han evolucionado desde los empaques Stedman a finales de la década de 1930, pero se encontraron muy pocos usos industriales hasta que se desarrollaron los empaques de Sulzer alrededor de 1965. Los primeros empaques estructurados se fabricaron de gasa de alambre; los modelos más recientes están hechos de láminas perforadas de metal corrugado, con láminas adyacentes acomodadas de tal forma que el líquido se distribuye sobre sus superficies mientras que el vapor fluye a través de los canales formados por los corrugados.

Los canales están colocados en ángulo de 45 grados respecto a la horizontal; el ángulo se alterna en dirección en las capas sucesivas. Cada capa tiene unas cuantas pulgadas de espesor. Varios empaques patentados difieren en el tamaño y distribución de los corrugados y el tratamiento de las superficies del empaque.

Figura 1. **Empaques comunes en torres: (a) montura Berl; (b) montura Intalox; (c) anillos Rasching; (d) anillo plástico Pall**



Fuente: MCCABE, Warren. Operaciones unitarias en ingeniería química. p. 595.

## 2.7. Contacto entre líquido y el gas

Para el buen desempeño de una torre de enfriamiento el requisito más importante, es el buen contacto entre el líquido y el gas. Idealmente, el líquido, una vez distribuido en la parte superior del empaque, fluye en forma de una película delgada sobre la superficie del mismo durante todo el recorrido de descenso a través de la torre. En realidad, las películas tienden a aumentar de espesor en algunos lugares y a disminuir en otros, de forma que el líquido se agrupa en pequeñas corrientes y fluye a lo largo de trayectorias localizadas a través del empaque.

En especial cuando se registran bajas velocidades del líquido, una buena parte de la superficie del empaque puede estar seca, o con más frecuencia, recubierta por una película estacionaria de líquido. Este efecto se conoce con el nombre de canalización y es la principal razón del mal funcionamiento de las grandes torres empacadas.

La canalización es más grave en torres con empaque ordenado; por ello casi no se utilizan. La canalización es menos grave en empaques aleatorios. En torres de tamaño moderado, la canalización se minimiza si el diámetro de la torre es al menos ocho veces el diámetro del empaque. Si la relación entre el diámetro de la torre y el diámetro del empaque es inferior de 8 a 1, el líquido tiende a desplazarse hacia afuera del empaque y descender por la pared de la columna.

Sin embargo, aun en columnas pequeñas con empaques que cumplen esta condición, la distribución del líquido y la canalización tienen un efecto importante sobre el funcionamiento de la columna. En torres grandes, la distribución inicial es especialmente importante, pero aun con una adecuada

distribución inicial, por lo general se incluyen redistribuidores para el líquido cada 5 o 10 metros de la torre, sobre todo inmediatamente por encima de cada sección empacada. La mejora en la distribución de líquido ha hecho posible el uso efectivo de las torres empacadas con diámetros mayores de 9 metros.

## 2.8. Especificaciones técnicas de la torre de enfriamiento en tratamiento

La torre de enfriamiento en tratamiento, es de tiro inducido. La misma, ha sido diseñada para enfriar el agua de recuperación del proceso de lavado de envases. La tabla I muestra las especificaciones técnicas de la torre en estudio.

Tabla I. **Especificaciones técnicas de la torre de enfriamiento en tratamiento**

Marca	Bay Park
Modelo	BY-ALCL-03-03-1.5
Motor ventilador	1,5 HP, 440 V, 3f, 60 Hz
TAG	TA-01
Fecha instalación	Febrero 2010
Diámetro/No. Aspás	30"/6
Flujo de operación	200 lpm
Flujo de diseño	200 lpm
Temperatura agua caliente	40 °C
Temperatura agua fría	30 °C
Temperatura bulbo húmedo	27°C
Material de construcción	Acero galvanizado
Recubrimiento interior de depósitos de agua	Fibra de vidrio reforzado
Ancho de celda	0,9 m
Largo de celda	0,9 m
Altura de celda	2,895 m
No. Celdas	1
Peso de embarque	150 kg
Peso de operación	400 kg

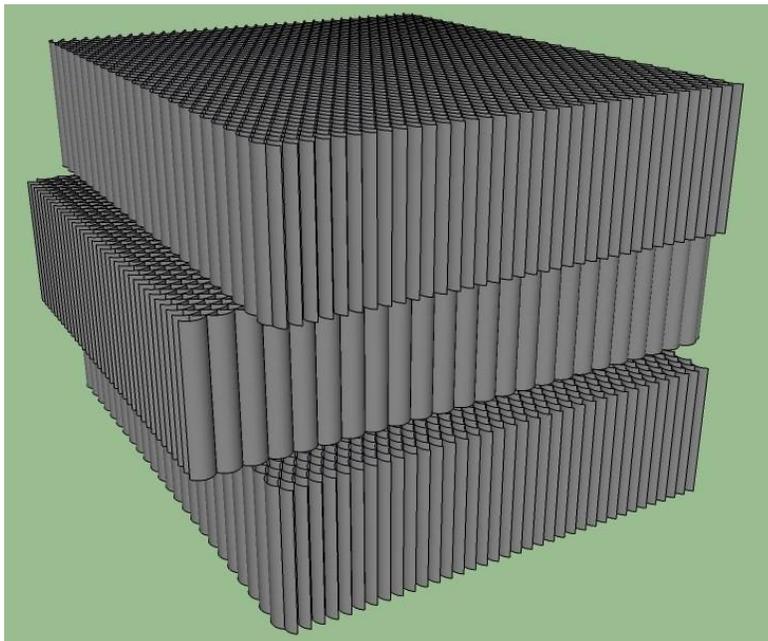
Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Especificaciones de empaque de torre de enfriamiento en tratamiento**

Material	Policloruro de vinilo
Forma	Laminillas onduladas
No. Laminillas por módulo	24
Largo de módulo	1,055 m
Ancho de módulo	0,300 m
Número de módulos	9
Área transferencia	136,728 m <sup>2</sup>

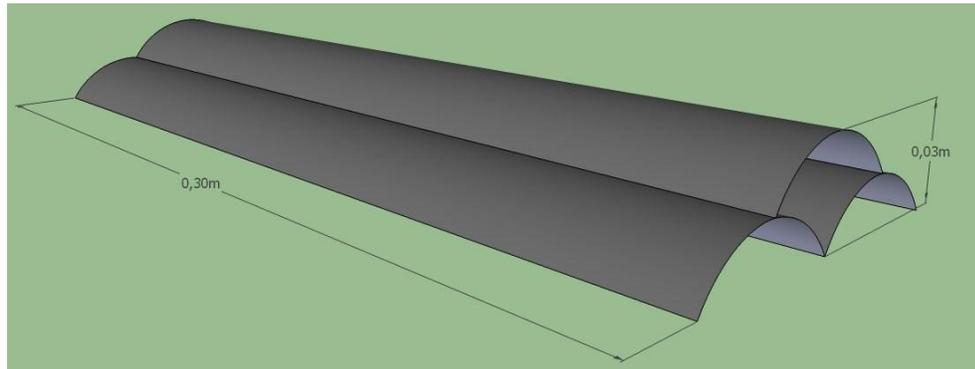
Fuente: elaboración propia.

Figura 2. **Empaque de torre de enfriamiento en tratamiento**



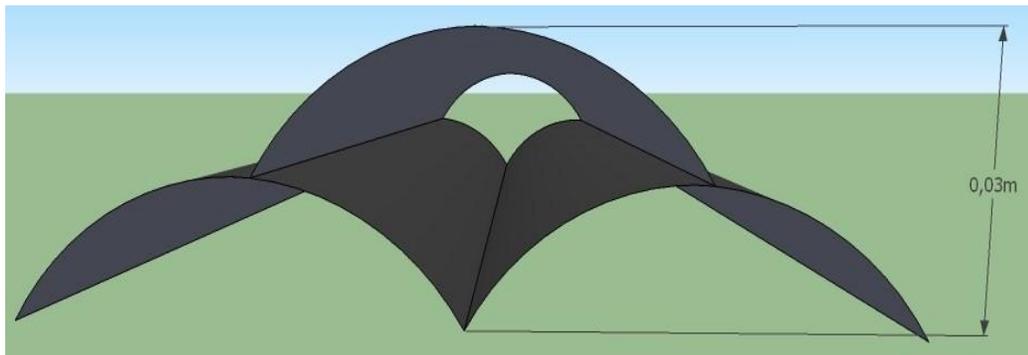
Fuente: elaboración propia, con programa de diseño *SketchUp Pro 8*

Figura 3. **Laminilla de empaque de torre de enfriamiento en tratamiento**



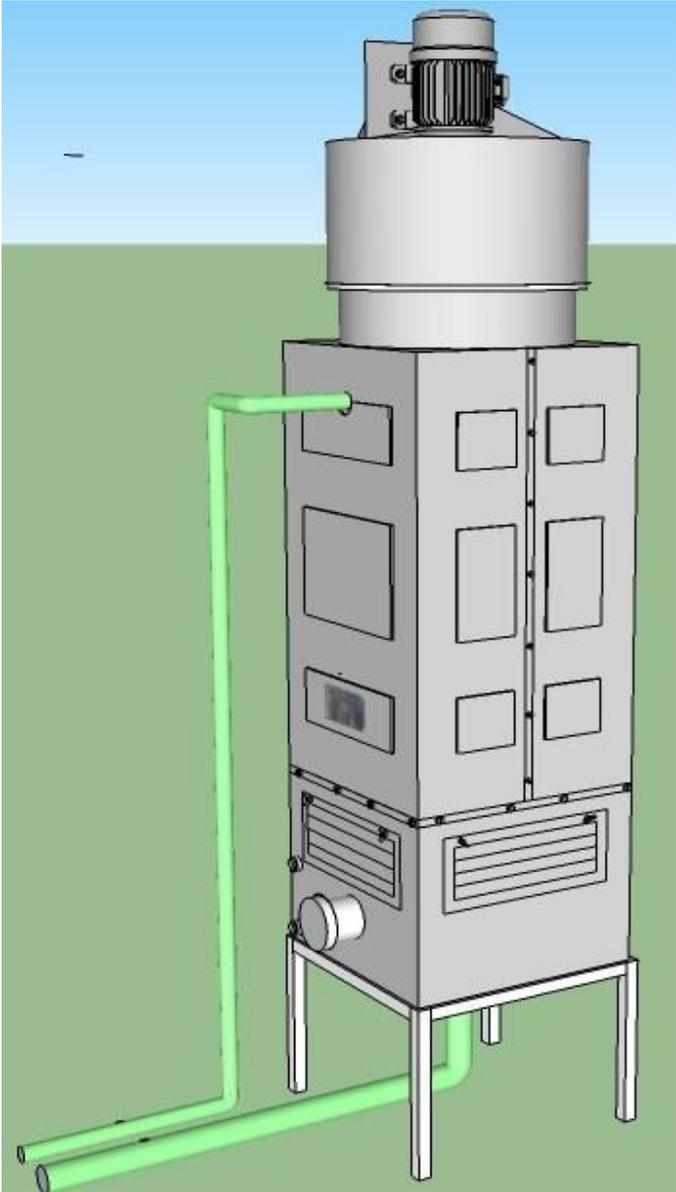
Fuente: elaboración propia, con programa de diseño *SketchUp Pro 8*

Figura 4. **Espacio vacío entre laminillas de empaque de torre de enfriamiento en tratamiento**



Fuente: elaboración propia, con programa de diseño *SketchUp Pro 8*

Figura 5. **Torre de enfriamiento del sistema de recuperación de agua de lavadoras en tratamiento**



Fuente: elaboración propia, con programa de diseño *SketchUp Pro 8*

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Variables

La descripción y clasificación de cada una de las variables experimentales cuantificadas, se detallan en la tabla III. Las variables descritas son las necesarias para describir el fenómeno.

Tabla III. Variables de medición

Variable	Unidad	Factor potencial de diseño		Factores perturbadores	
		Constante	Variable	Controlable	No Controlable
Temperatura entrada de agua	°C		X		
Temperatura salida de agua	°C		X		
Temperatura bulbo seco entrada	°C				X
Temperatura bulbo seco salida	°C				X
Temperatura bulbo húmedo entrada	°C				X
Temperatura bulbo húmedo salida	°C				X
Presión atmosférica	atm				X
Flujo de agua	m <sup>3</sup> /min		X		
Flujo de aire	m <sup>3</sup> /min	X			
Apertura válvulas				X	
Ancho de torre	m	X			
Largo de torre	m	X			
Altura de torre	m	X			

Fuente: elaboración propia.

### 3.2. Delimitación del campo de estudio

El campo de estudio se delimitó a la etapa de enfriamiento del sistema de recuperación de agua de lavadoras de envases, del área de tratamiento de agua.

Tabla IV. **Delimitación del campo de estudio**

Área	Tratamiento de agua
Proceso	Recuperación de agua de lavadoras de envases de vidrio
Etapa del proceso	Enfriamiento
Ubicación	Ciudad de Guatemala
Clima	La ciudad de Guatemala se encuentra a una humedad relativa promedio del 68% y aproximadamente 22°C

Fuente: elaboración propia.

### 3.3. Recursos humanos disponibles

El recurso humano lo constituyeron todas aquellas personas que realizaron aportes técnicos y de conocimiento para el desarrollo de la investigación.

- Investigador
- Asesor
- Colaboradores

### **3.4. Recursos materiales disponibles**

Los recursos materiales son los elementos necesarios para cumplir con las mediciones experimentales establecidas, para cumplir con el objetivo de investigación. Lo constituyeron el equipo, los instrumentos de laboratorio y los reactivos.

#### **3.4.1. Equipo**

El equipo lo constituyeron cada uno de los dispositivos necesarios para realizar cada una de las mediciones experimentales, indispensables para el cumplimiento de los objetivos de la investigación.

- Torre de enfriamiento
- Flujómetro ultrasónico
- Anemómetro

#### **3.4.2. Instrumentos de laboratorio**

Los instrumentos de laboratorio son las herramientas necesarias utilizadas para determinar la magnitud de una variable establecida. Los instrumentos de laboratorio utilizados fueron:

- Psicrómetro
- Termómetro de mercurio
- Termómetro digital
- Beacker 250 ml

### **3.4.3. Reactivos**

Los reactivos son aquellas sustancias que interactúan con otras en una reacción química, para la formación de productos. El compuesto utilizado en el desarrollo de la investigación fue:

- Agua destilada

### **3.5. Técnica cuantitativa**

El tipo de estudio que se realizó fue de carácter descriptivo debido a que integró las mediciones de cada una de las variables involucradas en el fenómeno para decir cómo es y cómo se manifiesta el mismo. El estudio descriptivo mide de manera más independiente los conceptos y variables con los que tiene que ver el fenómeno, para así describir lo que se investiga.

Para lograr el objetivo de la investigación se cuantificó cada una de las variables dependientes e independientes involucradas.

### **3.6. Recolección y ordenamiento de la información**

Se establecieron los valores de respuesta necesarios para 3 niveles de tratamiento distintos, variándose el flujo másico de agua por medio de una válvula de bola. Cada nivel de tratamiento se realizó bajo dos condiciones diferentes, trabajando únicamente la lavadora de línea 3 y trabajando la lavadora de línea 3 y de línea 1. Para cada nivel de tratamiento se realizaron 3 distintas corridas.

### 3.6.1. Diseño de observaciones

Las mediciones se realizaron variándose las relaciones de flujo másico agua/aire en la torre de enfriamiento en tratamiento, bajo 2 condiciones diferentes, trabajando una sola lavadora de envases (línea 3) y trabajando las 2 lavadoras de envases existentes (línea 3 y línea 1). Para cada tratamiento se realizaron 3 diferentes corridas. El orden de la toma de datos se realizó de acuerdo al programa de producción.

Tabla V. Orden cronológico de toma de datos

Agua/aire	Lavadora					
	Línea 3			Línea 3 + Línea 1		
A	1	2	3	10	11	12
B	4	5	6	13	14	15
C	7	8	9	16	17	18

Fuente: elaboración propia.

La relación de flujo agua/aire A fue igual a 0,753, la relación B fue igual a 0,805 y la relación C igual a 0,845. Cada tratamiento se realizó de 7:00 a 17:00 horas, llevándose a cabo las mediciones en intervalos de 30 minutos.

### 3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Cada una de las variables identificadas para describir el fenómeno, fueron medidas mediante el equipo de medición en buen estado y calibrado,

desarrollándose la metodología de medición correspondiente para cada variable.

### **3.7.1. Metodología para la medición de variables**

La metodología para la medición de variables, es cada uno de los procedimientos que fueron necesarios para determinar el valor de cada una de las variables definidas en la investigación. Cada procedimiento incluye el equipo y los instrumentos de laboratorio necesarios para realizar dicha medición.

#### **3.7.1.1. Flujo de agua a la entrada de torre de enfriamiento**

El flujo de agua a la entrada de la torre de enfriamiento, es la cantidad de agua por unidad de tiempo que ingresa a la misma. En sistemas de enfriamiento también es denominado flujo de recirculación.

- Equipo de medición: flujómetro portable ultrasónico.
- Procedimiento:
  - La medición se realizó en tramos verticales, alejados de accesorios y bombas (según instructivo de flujómetro).
  - La tubería de flujo a medir fue limpiada.
  - Se encendió el flujómetro, ingresándose el diámetro de la tubería de flujo a medir y estableciéndose como unidades de medida galones por minutos (sin que este marcara fuera de rango).
  - La superficie de contacto de los electrodos del flujómetro fue cubierta con gel.
  - La medición fue realizada, colocando los dos electrodos en la tubería en posición paralela uno del otro y asegurándose que el

indicador de señal se encontrara dentro del rango de aceptabilidad.

- Se anotó la lectura de flujo mostrada en la pantalla del flujómetro.
- El mismo procedimiento fue realizado para cada corrida.

### **3.7.1.2. Temperatura de bulbo húmedo**

La temperatura de bulbo húmedo es la temperatura de no equilibrio, que en estado estacionario alcanza una pequeña masa de líquido cuando se encuentra sumergido, en condiciones adiabáticas, en una corriente de gas.

- Instrumento de laboratorio: psicrómetro
- Procedimiento:
  - Una mecha de algodón se colocó en la parte inferior del termómetro, la cual fue humectada de forma que no existieran áreas secas que estuvieran en contacto con el aire.
  - A una distancia de 1,5 metros de la entrada de la torre de enfriamiento, se realizaron movimientos circulares con el psicrómetro por un período aproximado de tres minutos, a una velocidad mayor a 5 metros por segundo.
  - El mismo procedimiento fue llevado a cabo para las posteriores mediciones, asegurándose que la mecha de algodón permaneciera siempre humectada y que los movimientos circulares fueran sin interrupciones.

### **3.7.1.3. Temperatura de bulbo seco**

La temperatura de bulbo seco es la temperatura medida con un termómetro de mercurio cuyo bulbo se encuentra seco. Mide la temperatura del aire sin considerar factores ambientales como la radiación, humedad o el movimiento del aire.

- Instrumento de laboratorio: termómetro de mercurio.
- Procedimiento:
  - La temperatura de bulbo seco fue tomada a una distancia promedio de 1,5 metros a la entrada de la torre de enfriamiento, y también a la salida de la misma.
  - El mismo procedimiento se realizó para las posteriores mediciones.

### **3.7.1.4. Temperatura del agua a la entrada y salida de la torre de enfriamiento**

La temperatura del agua es una medida de la energía cinética que poseen las moléculas del agua. La temperatura es una propiedad que no depende de la cantidad de masa o de volumen que se considere.

- Instrumento de laboratorio: termómetro digital.
- Procedimiento:
  - Tomándose una muestra de agua a la entrada de la torre de enfriamiento, se introdujo el electrodo del termómetro digital a la muestra.
  - El botón de encendido fue presionado, esperándose que el valor de la lectura se estabilizara, para posteriormente anotar el mismo.

- Los pasos anteriores se repitieron para todas las mediciones de temperatura del agua a la salida de la torre de enfriamiento.

#### **3.7.1.5. Velocidad del aire**

La velocidad del aire es una magnitud física que expresa la distancia recorrida por el aire por unidad de tiempo. Se expresa generalmente en metros por segundo.

- Equipo de medición: anemómetro digital.
- Procedimiento:
  - El anemómetro fue encendido, estableciéndose como unidad de medida metros por segundo.
  - Se colocó el anemómetro en la corriente de aire a la salida de la torre de enfriamiento hasta que el valor de la lectura se estabilizara.
  - El valor promedio de la velocidad de salida del aire mostrada en la pantalla del anemómetro digital fue anotada.
  - El mismo procedimiento se realizó en diferentes puntos de salida del aire de la torre de enfriamiento en tratamiento, para los diferentes tratamientos.

#### **3.7.2. Muestra de cálculo**

Las magnitudes de cada una de las variables independientes de desempeño de la torre de enfriamiento en tratamiento, se obtuvieron a partir del procesamiento de las variables dependientes medidas mediante el uso de ecuaciones establecidas.

### 3.7.2.1. Rango de enfriamiento

El rango de enfriamiento es la diferencia que hay entre la temperatura de agua a la entrada de la torre de enfriamiento y la temperatura a la salida de la misma.

$$R = T_{ea} - T_{sa}$$

Donde:

R = Rango de enfriamiento (°C)

$T_{ea}$  = Temperatura de entrada del agua (°C)

$T_{sa}$  = Temperatura de salida del agua (°C)

### 3.7.2.2. Aproximación

La aproximación es la diferencia que hay entre la temperatura del agua a la salida de la torre de enfriamiento y la temperatura de bulbo húmedo a la entrada de la misma.

$$APROX = T_{sa} - T_{bhe}$$

Donde:

APROX = Aproximación (°C)

$T_{sa}$  = Temperatura de salida del agua (°C)

$T_{bhe}$  = Temperatura de bulbo húmedo a la entrada del aire (°C)

### 3.7.2.3. Eficiencia térmica de torre de enfriamiento

La eficiencia térmica de torre de enfriamiento es la relación entre el rango de enfriamiento real y el rango de enfriamiento ideal de la torre de enfriamiento en tratamiento.

$$ET = \frac{T_{ea} - T_{sa}}{T_{ea} - T_{bhe}} \times 100$$

Donde:

$T_{ea}$  = Temperatura de entrada del agua (°C)

$T_{sa}$  = Temperatura de salida del agua (°C)

$T_{bhe}$  = Temperatura de bulbo húmedo de aire a la entrada (°C)

ET = Eficiencia térmica (%)

### 3.7.2.4. Carga de enfriamiento

La carga de enfriamiento es el calor disipado en una torre de enfriamiento, igual al producto del flujo másico de circulación del agua por el rango de enfriamiento.

$$CE = M \times (H_{ea} - H_{sa})$$

Donde:

CE = Carga de enfriamiento (KJ/h)

M = Flujo másico de agua (kg/h)

$H_{ea}$  = Entalpía de agua a la entrada (KJ/kg)

$H_{sa}$  = Entalpía de agua a la salida (KJ/kg)

### 3.7.2.5. Coeficiente de transferencia de masa

El coeficiente de transferencia de masa es una medida de la cantidad de masa que se transfiere entre dos fases por unidad de tiempo, en un área determinada.

$$G \partial H_y = K_y a (H_y^* - H_y) \partial z \quad ^6$$

Despejando e integrando:

$$G \int_{H_{ye}}^{H_{ys}} \frac{\partial H_y}{H_y^* - H_y} \partial H_y = K_y a \int_0^z \partial z$$

Resolviendo se obtiene:

$$G \ln \left( \frac{H_y^* - H_{ye}}{H_y^* - H_{ys}} \right) = K_y a Z$$

Despejando:

$$K_y a = \frac{G}{Z} \ln \left( \frac{H_y^* - H_{ye}}{H_y^* - H_{ys}} \right)$$

Donde:

$K_y a$  = Coeficiente global de transferencia de masa (kg/mh)

$G$  = Flujo másico de aire (kg/h)

---

<sup>6</sup> Treybal, R. Operaciones de transferencia de masa. p. 276.

$H_{ye}$  = Entalpía del aire saturado a la entrada (KJ/kg)

$H_{ys}$  = Entalpía del aire saturado a la salida (KJ/kg)

$H_y^*$  = Entalpía de aire en equilibrio con el agua (KJ/kg)

Z= Altura de torre de enfriamiento (m)

### **3.7.2.6. Presión atmosférica**

Los valores promedios para la presión atmosférica fueron obtenidos de la red automática del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH). Se tomaron los datos registrados de la estación “La Aurora”, 7ª. Avenida 14-57 zona 13, Guatemala, estación más cercana al lugar donde se realizó la investigación.

### **3.7.2.7. Carta psicrométrica**

La carta psicrométrica para la obtención de los valores de la entalpía de aire-agua y los valores de humedad absoluta para la presión atmosférica determinada se obtuvo mediante la herramienta *CYTSoft Psychrometric Chart 2.2*.

### **3.7.2.8. Área transversal de torre de enfriamiento**

El área transversal de la torre de enfriamiento, es la medida de la sección de superficie que cruza en dirección perpendicular al lado longitudinal de la misma.

$$A_T = \frac{Q}{\rho_i}$$

Donde:

$Q$  = Flujo de agua a la entrada (gal/min)

$\rho_i$  = Densidad de irrigación (gal/minft<sup>2</sup>)

$A_T$  = Área transversal de torre (ft<sup>2</sup>)

### **3.7.2.9. Densidad de irrigación**

La densidad de irrigación se obtuvo mediante la gráfica 12-14 del Manual del Ingeniero Químico<sup>7</sup>, considerando la temperatura bulbo húmedo, la temperatura de entrada y salida del agua de la torre de enfriamiento en tratamiento.

## **3.8. Análisis estadístico**

El análisis estadístico integra los métodos, técnicas y procedimientos para el manejo, análisis e interpretación de los datos obtenidos. Es una herramienta muy valiosa para determinar si las hipótesis estadísticas planteadas se aceptan o rechazan.

### **3.8.1. Hipótesis estadísticas**

En la investigación se plantearon hipótesis estadísticas de tipo correlacional, de comparación de grupos y descriptivo. Cada una de ellas ayuda a descartar o aceptar la hipótesis general planteada.

---

<sup>7</sup>Perry, R. Manual del Ingeniero Químico. p. 12-16.

Tabla VI. **Hipótesis estadísticas**

<b>No</b>	<b>Hipótesis nula</b>	<b>Hipótesis Alternativa</b>
1	No existe ningún tipo de relación significativa entre la eficiencia térmica de la torre de enfriamiento y la relación agua/aire.	Existe una relación significativa entre la eficiencia térmica de la torre de enfriamiento y la relación agua/aire.
2	No existe ningún tipo de relación significativa entre el coeficiente de transferencia de masa y la relación agua/aire.	Existe una relación significativa entre el coeficiente de transferencia de masa y la relación agua/aire.
3	No existe ningún tipo de relación significativa entre la carga de enfriamiento y la relación agua/aire.	Existe una relación significativa entre la carga de enfriamiento y la relación agua/aire.
4	La eficiencia térmica de la torre de enfriamiento será igual antes y después del mantenimiento de la misma.	La eficiencia térmica de la torre de enfriamiento no será igual antes y después del mantenimiento de la misma.
5	La eficiencia térmica de la torre de enfriamiento será igual trabajando una sola lavadora de envase que trabajando las dos lavadoras de envase.	La eficiencia térmica de la torre de enfriamiento no será igual trabajando una sola lavadora de envase que trabajando las dos lavadoras de envase.

Fuente: elaboración propia.

### **3.8.2. Hipótesis descriptiva**

Para determinar si el incumplimiento de la torre de enfriamiento con los requerimientos de temperatura de planta se debe al mal diseño de la misma, se planteó una hipótesis de carácter descriptivo en función del área transversal de la torre de enfriamiento.

Hipótesis descriptiva: el área transversal real de la torre de enfriamiento está en un rango del  $\pm 30$  por ciento del área transversal calculada para las condiciones de operación.

### **3.8.3. Análisis de hipótesis correlacionales**

Para aceptar o descartar las hipótesis estadísticas correlacionales, se procedió a un estudio de correlación del comportamiento de las variables involucradas.

El análisis de las correlaciones se obtuvieron mediante coeficientes  $r$  de Pearson los cuales pueden variar de  $-1,00$  a  $+1,00$ , donde:

- $-1,00$  = Correlación negativa perfecta
- $-0,90$  = Correlación negativa muy fuerte
- $-0,75$  = Correlación negativa considerable
- $-0,50$  = Correlación negativa media
- $-0,10$  = Correlación negativa débil
- $0,00$  = No existe correlación alguna entre las variables
- $+0,10$  = Correlación positiva débil
- $+0,50$  = Correlación positiva media
- $+0,75$  = Correlación positiva considerable

- +0,90 = Correlación positiva muy fuerte
- +1,00 = Correlación positiva perfecta

Los valores de los coeficientes de Pearson se obtuvieron mediante el software computacional Microsoft Excel, graficando cada una de las variables involucradas.

Para aceptar o rechazar la hipótesis nula se tomó como criterio un nivel de confianza del 95 por ciento (significancia,  $\alpha=0,05$ ), considerando un error del 5 por ciento atribuible a las siguientes causas:

- Error del equipo de medición
- Error instrumental
- Error del operador

Si el valor  $P$  obtenido fue menor o igual a 0,05, la hipótesis nula se rechaza, mientras que si el valor  $P$  obtenido fue mayor a 0,05 la hipótesis nula se acepta.

$P \leq 0,05 \rightarrow$  se rechaza

$P > 0,05 \rightarrow$  se acepta

#### **3.8.4. Análisis de hipótesis de comparación de grupos**

Para aceptar o rechazar la hipótesis comparativa de si la eficiencia térmica de la torre de enfriamiento será igual trabajando una sola lavadora de envase que trabajando las dos lavadoras de envase, se procederá a la prueba estadística *t student*.

El valor “t” se obtuvo mediante la fórmula:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{N_1} + \frac{S_2^2}{N_2}}}$$

Donde:

t = variable t *student*

$\bar{X}_1$  = media del primer grupo

$\bar{X}_2$  = media del segundo grupo

S<sub>1</sub> = desviación estándar del primer grupo

S<sub>2</sub> = desviación estándar del segundo grupo

N<sub>1</sub> = tamaño de la muestra del primer grupo

N<sub>2</sub> = tamaño de la muestra del primer grupo

Para determinar si el valor de t es significativo, se aplicó la fórmula y se calcularon los grados de libertad (número de maneras como los datos pueden variar libremente). Los grados de libertad se calcularon de la siguiente manera:

$$gl = (N_1 + N_2) - 2$$

Donde:

gl = grados de libertad

N<sub>1</sub> = tamaño de la muestra del primer grupo

N<sub>2</sub> = tamaño de la muestra del primer grupo

Una vez calculados los grados de libertad y el valor de t, y eligiendo un valor de significancia de 0,05 se comparó el valor de t obtenido contra el valor que le corresponde en la tabla de la distribución t de *student*.

Para aceptar o rechazar la hipótesis nula se tomó el siguiente criterio:

$t_{\text{calculada}} > t_{\text{tabla}} \rightarrow$  Se rechaza

$t_{\text{calculada}} \leq t_{\text{tabla}} \rightarrow$  Se acepta

Si el valor de t calculado fue igual o mayor al que aparece en la tabla, se rechaza la hipótesis nula. Pero si el valor obtenido de t fue menor al que aparece en dicha tabla se acepta.



## 4. RESULTADOS

A partir de las variables medidas, el procesamiento de los datos obtenidos y el análisis estadístico, se obtuvieron los siguientes resultados del desempeño de la torre de enfriamiento en tratamiento.

Tabla VII. **Eficiencia térmica promedio obtenida de torre de enfriamiento trabajando la lavadora de envase de línea 3 para cada relación de flujo agua/aire**

Agua/Aire	Eficiencia térmica (%)				
	Corrida			Promedio	Desviación estándar
1	2	3			
0,75	55,12	51,16	55,95	54,07	2,56
0,81	44,19	47,01	47,26	46,16	1,71
0,85	39,47	43,95	47,47	43,63	4,01

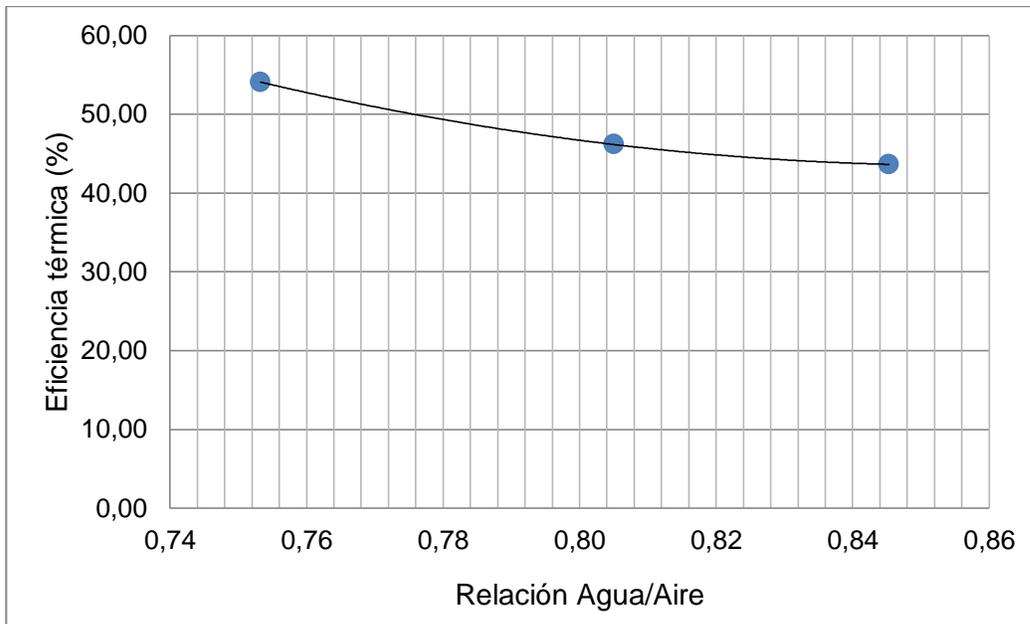
Fuente: elaboración propia, con base en el apéndice 1 del presente trabajo.

Tabla VIII. **Eficiencia térmica promedio obtenida de torre de enfriamiento trabajando las lavadoras de envase de línea 3 y línea 1 para cada relación de flujo agua/aire**

Agua/Aire	Eficiencia térmica (%)				
	Corrida			Promedio	Desviación estándar
1	2	3			
0,75	51,22	46,37	45,64	47,74	3,03
0,81	45,65	48,14	48,67	47,49	1,61
0,85	39,89	39,61	44,09	41,20	2,51

Fuente: elaboración propia, con base en el apéndice 1 del presente trabajo.

Figura 6. **Curva de eficiencia térmica promedio de torre de enfriamiento trabajando la lavadora de envase de línea 3 para cada relación de flujo agua/aire**



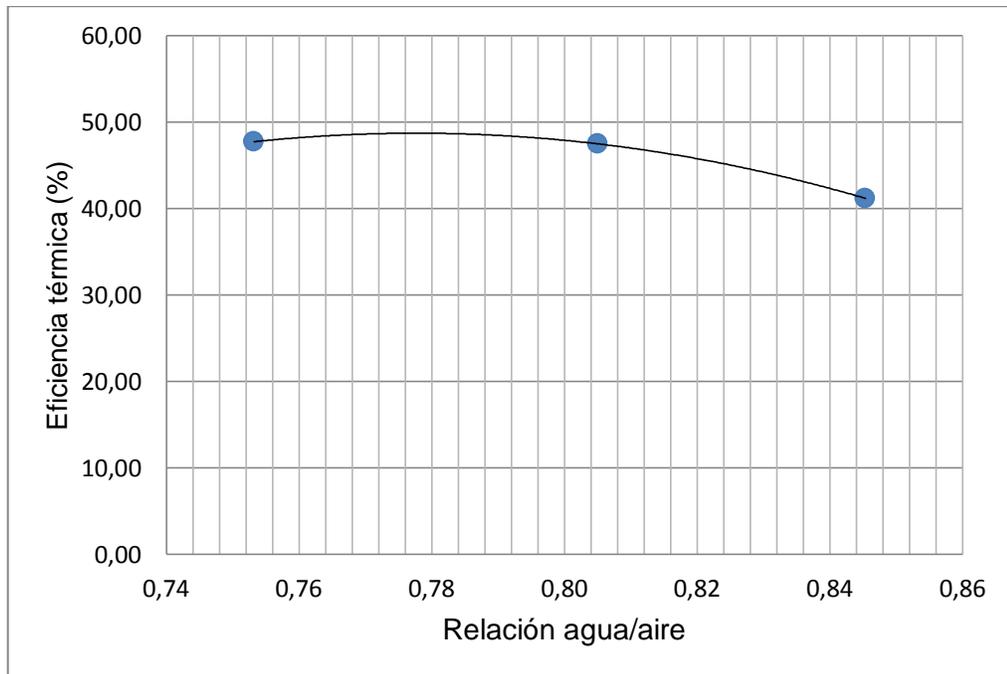
Fuente: elaboración propia, con base en el apéndice 1 del presente trabajo.

Tabla IX. **Parámetros estadísticos de la curva de eficiencia térmica de torre de enfriamiento trabajando la lavadora de línea 3 respecto la relación de flujo agua/aire**

Tipo de regresión	Ecuación	Coefficiente determinación	Coefficiente correlación
Polinómica	$y = 981,30 x^2 - 1 682,00 x + 764,30$	1,00	-0,98

Fuente: elaboración propia, con base en el apéndice 1 del presente trabajo.

Figura 7. **Curva de eficiencia térmica promedio de torre de enfriamiento trabajando las lavadoras de envase de línea 3 y línea 1 para cada relación de flujo agua/aire**



Fuente: elaboración propia, con base en el apéndice 1 del presente trabajo.

Tabla X. **Parámetros estadísticos de la curva de eficiencia térmica de torre de enfriamiento trabajando la lavadora de línea 3 y línea 1 respecto la relación de flujo agua/aire**

<b>Tipo de regresión</b>	<b>Ecuación</b>	<b>Coefficiente de determinación</b>	<b>Coefficiente de correlación</b>
Polinómica	$y = -1\,642,00 x^2 + 2\,554 x - 944,6$	1,00	-0,85

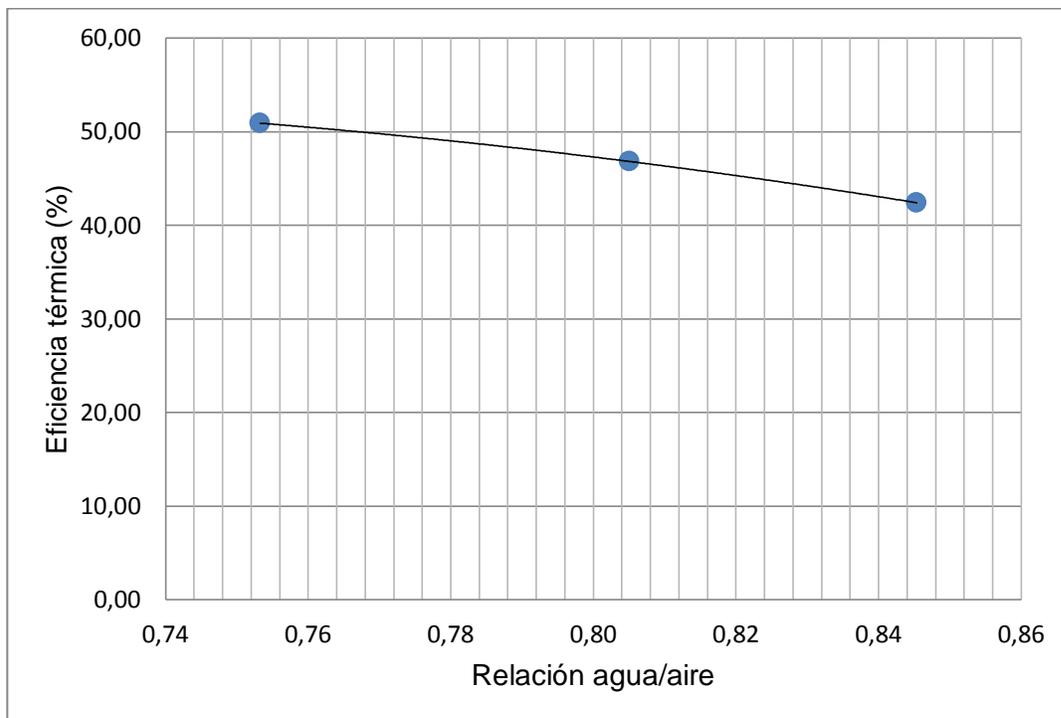
Fuente: elaboración propia, con base en el apéndice 1 del presente trabajo.

Tabla XI. **Eficiencia térmica global de torre de enfriamiento para cada relación de flujo agua/aire**

Agua/Aire	Eficiencia térmica global	
	ET (%)	± ET(%)
0,75	50,91	4,19
0,81	46,82	3,84
0,85	42,42	3,28

Fuente: elaboración propia, con base en el apéndice 1 del presente trabajo.

Figura 8. **Curva de eficiencia térmica global de torre de enfriamiento para cada relación de flujo agua/aire**



Fuente: elaboración propia, con base en el apéndice 1 del presente trabajo.

Tabla XII. **Parámetros estadísticos de la curva de eficiencia térmica global de torre de enfriamiento para cada relación de flujo agua/aire**

Tipo de regresión	Ecuación	Coefficiente de determinación	Coefficiente correlación	Valor P
Polinómica	$y = - 330,50 x^2 + 436,20 x - 90,10$	1,00	-0,996	0,06

Fuente: elaboración propia, con base en el apéndice 1 del presente trabajo.

Tabla XIII. **Eficiencia térmica obtenida de torre de enfriamiento para cada relación de flujo agua/aire y los resultados de los parámetros estadísticos**

Agua/Aire	Corrida	Eficiencia térmica (%)	
		L3	L1 + L3
0,75	1	55,12	51,22
	2	51,16	46,37
	3	55,95	45,64
0,81	1	44,19	45,65
	2	47,01	48,14
	3	47,26	48,67
0,85	1	39,47	39,89
	2	43,95	39,61
	3	47,47	44,09
Promedio		47,95	45,48
Desviación Estándar		5,35	3,63
t calculada		1,13	
t crítica		2,12	

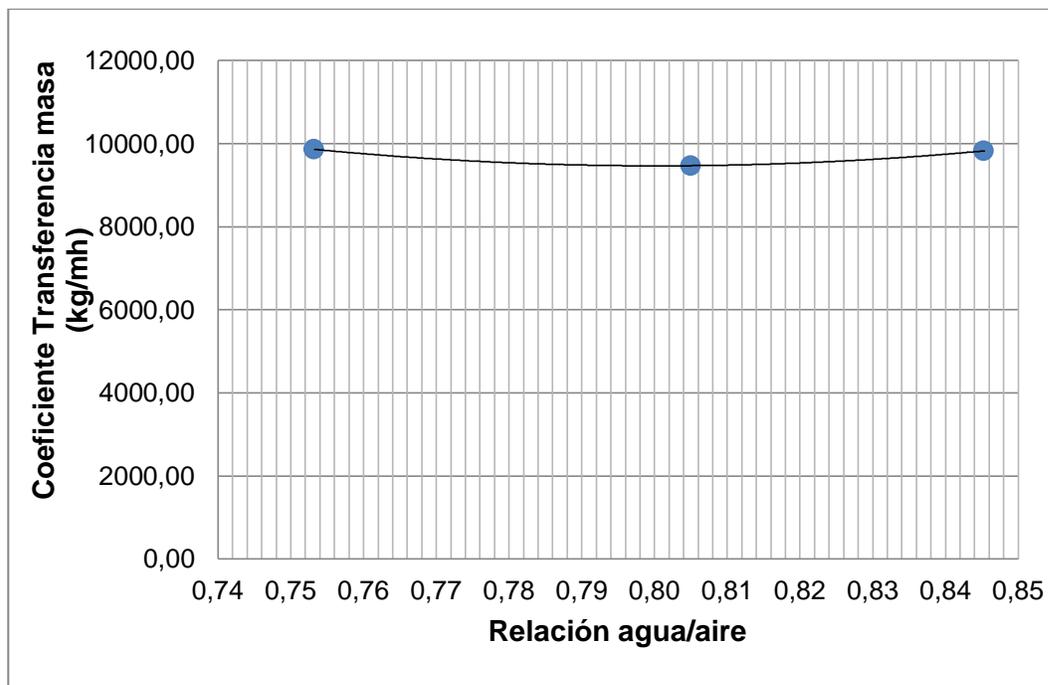
Fuente: elaboración propia, con base en el apéndice 1 del presente trabajo.

Tabla XIV. **Coefficiente de transferencia de masa de torre de enfriamiento obtenido para cada relación de flujo agua/aire**

AGUA/AIRE	Coefficiente de transferencia de masa (kg/mh)					
	L3		L1+L3		Promedio	
	$K_{ya}$	$\pm K_{ya}$	$K_{ya}$	$\pm K_{ya}$	$K_{ya}$	$\pm K_{ya}$
0,75	11214,98	108,25	8510,79	113,13	9862,88	110,69
0,81	10042,89	113,13	8898,53	111,15	9470,71	112,14
0,85	7999,01	113,13	11654,52	113,13	9826,76	113,13

Fuente: elaboración propia, con base en el apéndice 1 del presente trabajo.

Figura 9. **Curva de coeficiente de transferencia de masa de torre de enfriamiento obtenido para cada relación de flujo agua/aire**



Fuente: elaboración propia, con base en el apéndice 1 del presente trabajo.

Tabla XV. **Parámetros estadísticos de la curva de coeficiente de transferencia de masa de torre de enfriamiento para cada relación de flujo agua/aire**

Tipo de regresión	Ecuación	Coefficiente de determinación	Coefficiente de correlación	Valor P
Polinómica	$y = 17\,824 x^2 - 28\,532 x + 12365$	1,00	-0,16	0,56

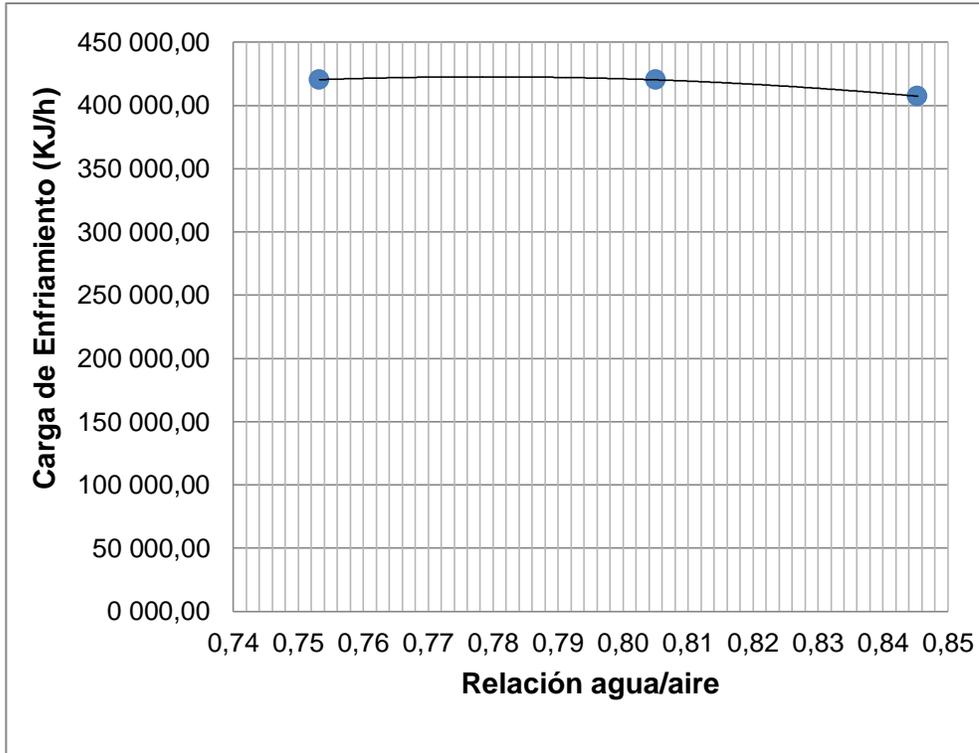
Fuente: elaboración propia, con base en el apéndice 1 del presente trabajo.

Tabla XVI. **Carga de enfriamiento de torre de enfriamiento para cada relación de flujo agua/aire**

AGUA/AIRE	Carga de enfriamiento (KJ/h)					
	L3		L1+L3		Promedio	
	CE	±CE	CE	±CE	CE	±CE
0,75	478 292,03	4782,92	362 524,29	3625,24	420 408,16	4204,08
0,81	409 096,59	4090,97	431 468,96	4314,69	420 282,77	4202,83
0,85	393 283,69	3932,84	421 345,15	4213,45	407 314,42	4073,14

Fuente: elaboración propia, con base en el apéndice 1 del presente trabajo.

Figura 10. **Curva de carga de enfriamiento de torre de enfriamiento para cada relación de flujo agua/aire**



Fuente: elaboración propia, con base en el apéndice 1 del presente trabajo.

Tabla XVII. **Parámetros estadísticos de la curva de carga de enfriamiento de torre de enfriamiento para cada relación de flujo agua/aire**

Tipo de regresión	Ecuación	Coefficiente de determinación	Coefficiente de Correlación	Valor P
Polinómica	$y = -3,00E6 x^2 + 5,00E6 x - 2,00E6$	1,00	-0,83	0,23

Fuente: elaboración propia, con base en el apéndice 1 del presente trabajo.

Tabla XVIII. **Eficiencia térmica de torre de enfriamiento antes y después de mantenimiento**

Corrida	Eficiencia térmica (%)	
	Antes Mantenimiento	Después de Mantenimiento
1	51,22	55,95
2	47,26	51,16
3		55,12
4		45,64
5		46,37
6		47,01
7		44,19
8		48,67
9		48,14
10		45,65
Promedio	49,24	48,79
Desviación Estándar	2,80	4,05
t calculada	0,19	
t crítica	2,23	

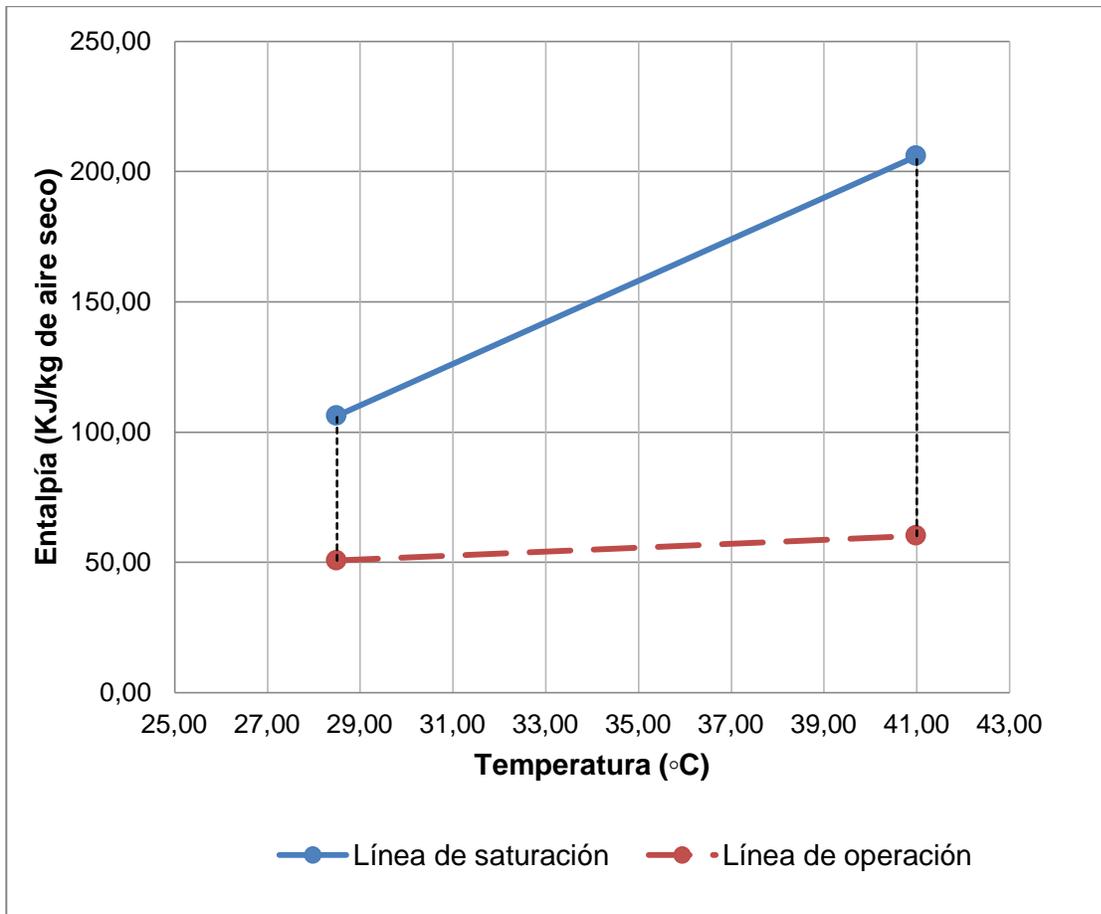
Fuente: elaboración propia, con base en el apéndice 1 del presente trabajo.

Tabla XIX. **Área transversal óptima y área transversal real de torre de enfriamiento para cada flujo de agua a la entrada de la misma**

No.	Flujo de agua	Densidad de irrigación	Área transversal óptima				Área real A <sub>T</sub>
			A <sub>o</sub>		A <sub>o</sub> + 30%		
	gal/min	gal/minft <sup>2</sup>	ft <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	ft <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>
1	42,70	2,50	17,08	1,59	22,20	2,06	0,81
2	45,63	2,50	18,25	1,70	23,73	2,20	0,81
3	47,91	2,50	19,17	1,78	24,92	2,31	0,81
4	52,83	2,50	21,13	1,96	27,47	2,55	0,81

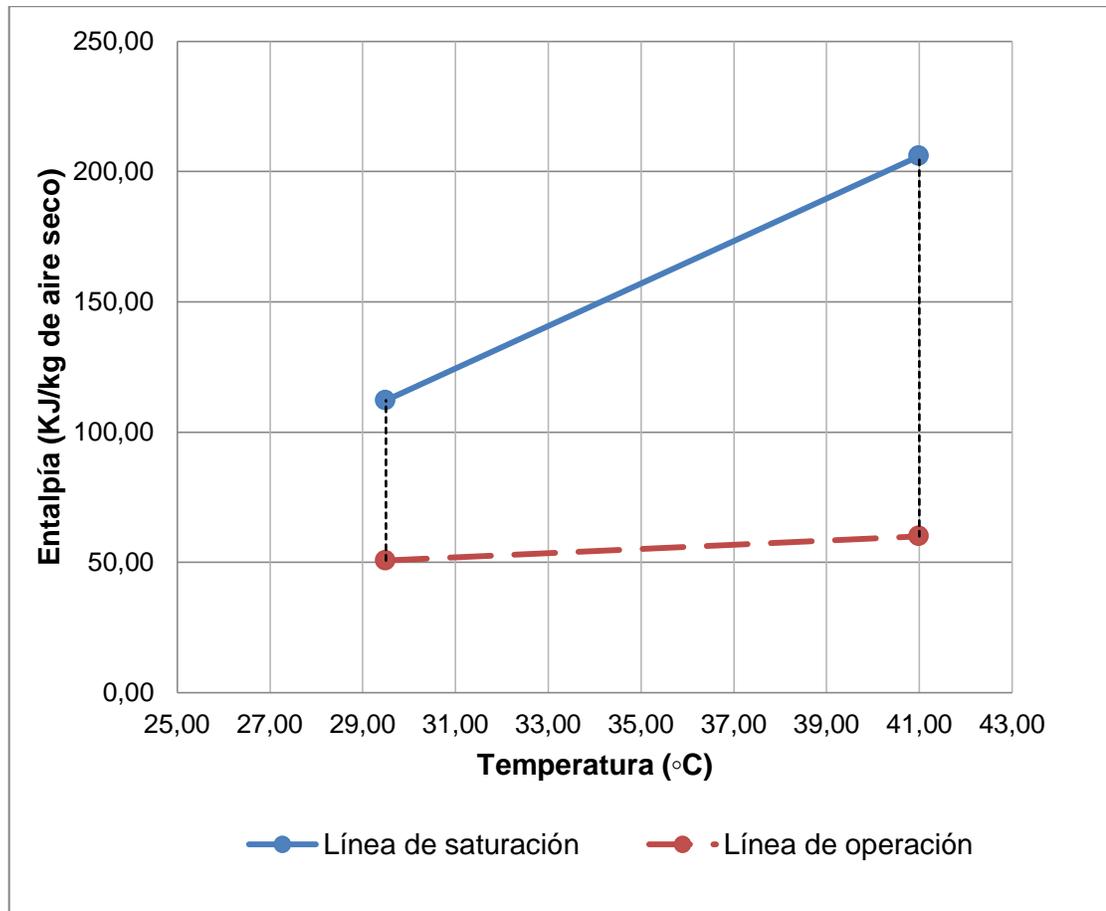
Fuente: elaboración propia, con base en el apéndice 1 del presente trabajo.

Figura 11. **Línea de saturación y línea de operación de torre de enfriamiento para la relación de flujo agua/aire de 0,75 a una presión atmosférica promedio de 0,83 atmósferas**



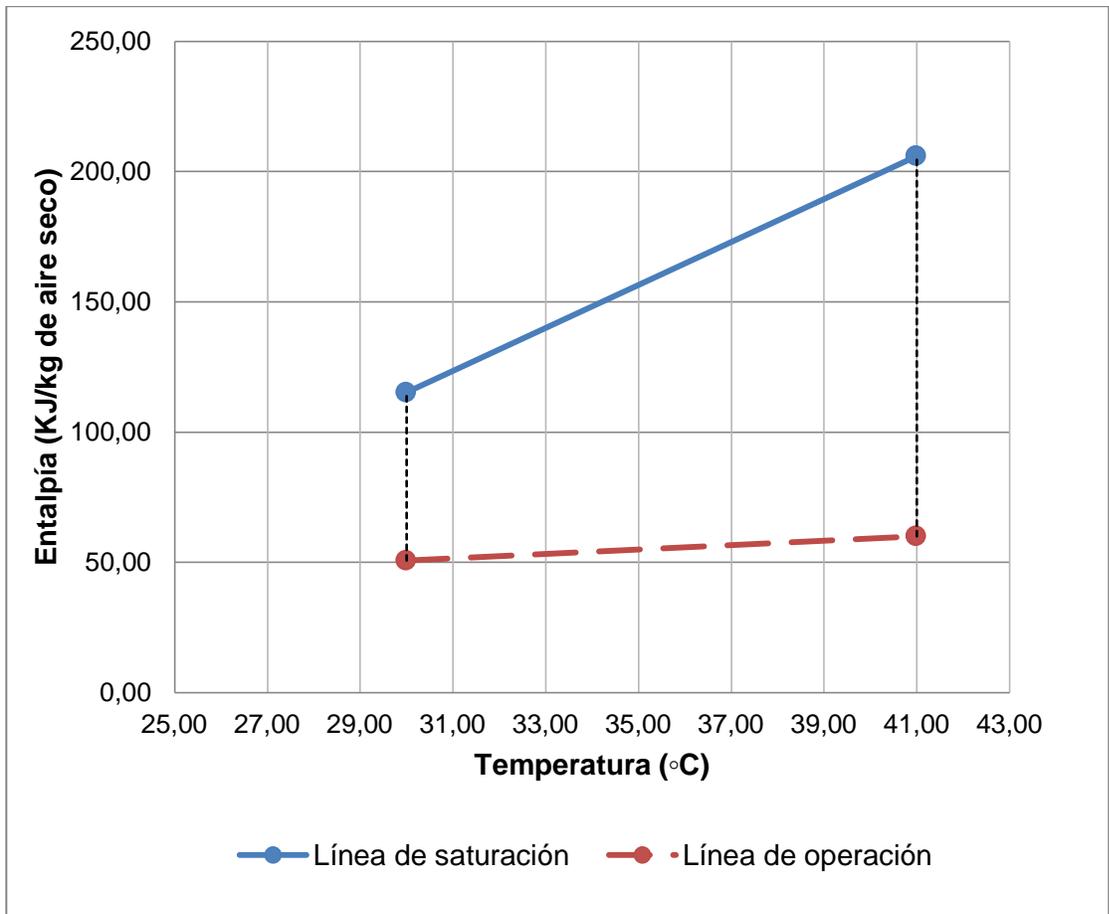
Fuente: elaboración propia, con base en el apéndice 1 del presente trabajo.

Figura 12. Línea de saturación y línea de operación de torre de enfriamiento para la relación de flujo agua/aire de 0,81 a una presión atmosférica promedio de 0,83 atmósferas



Fuente: elaboración propia, con base en el apéndice 1 del presente trabajo.

Figura 13. **Línea de saturación y línea de operación de torre de enfriamiento para la relación de flujo agua/aire de 0,85 a una presión atmosférica promedio de 0,83 atmósferas**



Fuente: elaboración propia, con base en el apéndice 1 del presente trabajo.

## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En un sistema de recuperación de agua de lavadoras, el subproceso de enfriamiento es de vital importancia, debido a que la temperatura del agua es una de las variables críticas en el proceso de lavado de envase; y más aún cuando las demandas técnicas y sanitarias para el agua de lavado son cada vez más exigentes; por lo que el diseño, control y mantenimiento de estos sistemas de enfriamiento ha tenido que adaptarse a estas variantes.

Cuando la temperatura del agua no cumple con los requerimientos de planta, es necesaria la evaluación del desempeño del sistema de enfriamiento, antes de tomar algún tipo de corrección en el sistema de recuperación de agua de lavadoras. Por lo tanto, la presente investigación se inició evaluando la eficiencia térmica de la torre de enfriamiento variando las relaciones de flujo de agua/aire.

De acuerdo a la tabla VII y a la tabla VIII, donde se muestran los valores de la eficiencia térmica obtenidos de la torre de enfriamiento en tratamiento trabajando una sola lavadora de envases (línea 3) y trabajando las dos lavadores de envases (línea 3 y línea 1) respectivamente, se observa un incremento en la eficiencia térmica al disminuir la relación la relación de flujos agua/aire. Ambos comportamientos se ajustan perfectamente a una ecuación polinómica de grado dos, tal como lo muestra la tabla IX y la tabla X.

Los comportamientos anteriores influyen en la eficiencia térmica global de la torre de enfriamiento respecto a la relación de flujos agua/aire, donde de igual forma la eficiencia térmica global aumenta al disminuir la relación de flujos.

(tabla XI y figura VIII). Este comportamiento se ajusta perfectamente a una ecuación polinómica de grado dos (tabla XII).

El coeficiente de correlación de Pearson obtenido fue de  $-0,996$ , lo cual indica que existe una correlación negativa muy fuerte<sup>8</sup> entre la eficiencia térmica de la torre de enfriamiento y la relación de flujo agua/aire. Esta correlación negativa muy fuerte resulta ser no significativa, debido a que el valor obtenido de significancia o valor P ( $0,06$ ), es mayor al valor de significancia establecido para la aprobación de esta correlación, es decir,  $0,05$ .

El aumento de la eficiencia térmica al disminuir la relación de flujo agua/aire, se justifica por el hecho de que al reducir la cantidad de agua que ingresa a la torre, manteniendo el flujo de aire constante, el tiempo de contacto entre el aire y el agua es mayor, permitiendo así una mayor transferencia de masa de agua a aire y mayor pérdida de energía producto de la transferencia de calor.

Al disminuir el flujo de agua a la entrada de la torre de enfriamiento la eficiencia térmica aumenta y existe un pequeño descenso en la temperatura de salida del agua (respecto a la temperatura de salida del agua a mayores cargas de flujo de agua). A pesar, que el flujo de agua a la entrada de la torre de enfriamiento se redujo al flujo mínimo de operación del sistema de recuperación de agua de lavadoras, el cual es  $161,62$  litros por minuto ( $38,38$  litros por minuto menos que el flujo de agua de diseño), la temperatura de salida del agua no cumple con las especificaciones de temperatura de planta, tal como lo muestran las tablas XX al XXVIII.

---

<sup>8</sup>Sampieri, R. Metodología de la investigación. p. 384.

Por tanto, bajo ninguna variación de flujo de agua establecida dentro de los límites de operación del sistema, se obtuvo el cumplimiento de la temperatura de salida del agua con los requerimientos de temperatura de planta.

Para determinar, si la eficiencia térmica de la torre de enfriamiento es igual trabajando una sola lavadora de envase que trabajando las dos lavadoras de envase, se realizó mediante la prueba estadística de *t* de *Student*. El valor de *t* de *Student* calculado fue de 1,13, el cual es menor al valor de *t* *Student* crítico o de tabla, 2,12, tal como lo muestra la tabla XIII. Como el valor de *t* de *Student* calculado es menor al valor de *t* de *Student* crítico, la hipótesis nula que plantea que la eficiencia térmica de la torre de enfriamiento es igual trabajando una sola lavadora de envase que trabajando las dos lavadoras de envase, se acepta. Por lo tanto, el desempeño de la torre de enfriamiento no se ve afectado por el número de lavadoras de envases que se encuentren trabajando.

Otras de las variables de desempeño analizadas fue el coeficiente global de transferencia de masa, el cual de acuerdo con la tabla XIV, no presenta variación marcada al variar la relación de flujo agua/aire. El comportamiento del coeficiente de transferencia de masa respecto la relación de flujo agua/aire se ajusta perfectamente a una ecuación polinómica de grado dos (tabla XV).

El coeficiente de correlación de Pearson obtenido fue de  $-0,16$ , lo cual indica que existe una correlación negativa débil<sup>9</sup> entre estas dos variables. Esta correlación negativa débil resulta ser no significativa, debido a que el valor obtenido de significancia o valor *P*, 0,56, es mayor al valor de significancia establecido para la aprobación de esta correlación (0,05). Por lo tanto, no existe

---

<sup>9</sup>Sampieri, R. Metodología de la investigación. p. 384.

relación significativa entre el coeficiente de transferencia de masa y la relación de flujo agua/aire.

Los valores de la carga de enfriamiento para cada relación de flujo se presentan en la tabla XVI, en la cual se nota un descenso en el valor de la carga de enfriamiento al aumentar la relación de flujos. Este comportamiento se ajusta perfectamente a una ecuación polinómica de grados dos (tabla XVII). El coeficiente de correlación de Pearson obtenido fue de -0,83, lo cual indica que existe una relación negativa considerable, pero no significativa entre la carga de enfriamiento y la relación de flujo agua/aire.

Esta relación no es significativa, debido a que el valor obtenido de significancia (0,23) es mayor al nivel de significancia establecido para la aprobación de esta relación (0,05). Por lo tanto, no existe relación significativa entre la carga de enfriamiento y la relación de flujo agua/aire.

La tabla XVIII, muestra los valores de la eficiencia térmica de la torre de enfriamiento antes y después del mantenimiento de la misma. Asimismo, muestra el valor estadístico de *t student* calculado, el cual es igual a 0,19, y el valor estadístico de *t student* crítico o de tabla, el es cual igual a 2,23. Como el valor de *t student* calculado es menor al valor de *t student* crítico, la hipótesis nula que plantea que la eficiencia térmica de la torre de enfriamiento será igual antes y después del mantenimiento de la misma, se acepta. Por tanto, el incumplimiento de la torre de enfriamiento con los requerimientos de temperatura de planta no se debe a la falta de mantenimiento de la torre de enfriamiento en tratamiento.

Al considerar los valores del área transversal real de la torre de enfriamiento y del área óptima o ideal calculada, que se encuentran en la tabla

XIX, se observa que al aumentar el valor del flujo de entrada de agua a la torre de enfriamiento, el valor del área transversal óptima o ideal, aumenta. Para el flujo de agua a la entrada de la torre de enfriamiento para la cual fue diseñada (200 L/min), se necesita una torre de enfriamiento de entre 1,96 metros cuadrados y 2,55 metros cuadrados de área transversal para cumplir con los requerimientos de temperatura de planta, tomando en consideración las condiciones ambientales del lugar donde se encuentra. El valor de 2,55 metros cuadrados, corresponde al área transversal óptima de la torre de enfriamiento considerando un 30 por ciento de factor de diseño.

Considerando de igual manera el flujo de agua de diseño a la entrada de la torre de enfriamiento, el área transversal real es igual a 0,81 metros cuadrados, la cual es aproximadamente 1/3 del valor óptimo de área transversal teórico. Por lo tanto, el área transversal real de la torre de enfriamiento en tratamiento es insuficiente para enfriar el agua de entrada a la temperatura de planta requerida. El área debe aumentarse en un 214,81 por ciento para lograr enfriar el agua de entrada de la torre de enfriamiento a la temperatura requerida.

Considerando lo anterior, el incumplimiento de la torre de enfriamiento con los requerimientos de temperatura de planta se debe al diseño de la misma.

El hecho de tener un área transversal de torre de enfriamiento insuficiente para la cantidad de flujo de entrada, limita el contacto entre el flujo de agua y el aire ocasionando el enfriamiento no deseado<sup>10</sup>.

En las figuras 11, 12 y 13, se muestran los diagramas de entalpía en función de la temperatura del agua, en los cuales se representan las líneas de

---

<sup>10</sup> Perry, R. Manual del Ingeniero Químico. p. 12-16.

operación y de saturación para cada relación de flujo agua/aire. “El área entre la curva de saturación y la línea de operación es una indicación del potencial que promueve la transferencia total de calor”<sup>11</sup>. A medida que la relación de flujos agua/aire aumenta, la pendiente de la línea de operación del aire se incrementa, reduciendo así el área entre las curvas. Una menor área, significa que más unidades de difusión y mayor altura se requieren para que la torre de enfriamiento logre el rango de enfriamiento deseado.

---

<sup>11</sup> Kern. Procesos de transferencia de calor. p. 678.

## CONCLUSIONES

1. El incumplimiento de la torre de enfriamiento del sistema de recuperación de agua de lavadoras con los requerimientos de temperatura de planta, no se debe a condiciones operacionales inadecuadas.
2. El incumplimiento de la torre de enfriamiento del sistema de recuperación de agua de lavadoras con los requerimientos de temperatura de planta, no se debe a la falta de mantenimiento de la misma.
3. El incumplimiento de la torre de enfriamiento del sistema de recuperación de agua de lavadoras con los requerimientos de temperatura de planta se debe a un mal diseño de la misma.
4. El área transversal real de la torre de enfriamiento del sistema de recuperación de agua de lavadoras es insuficiente para enfriar la cantidad de flujo de agua a la entrada de la torre de enfriamiento.
5. La eficiencia térmica de la torre de enfriamiento del sistema de recuperación de agua de lavadoras es igual trabajando una sola lavadora de envases, que trabajando las dos lavadoras de envases existentes.

6. No existe una relación significativa entre la eficiencia térmica de la torre de enfriamiento del sistema de recuperación de agua de lavadoras y la relación de flujos agua/aire.
7. No existe una relación significativa entre el coeficiente de transferencia de masa obtenido de la torre de enfriamiento del sistema de recuperación de agua de lavadoras y la relación de flujos agua/aire.
8. No existe una relación significativa entre la carga de enfriamiento de la torre de enfriamiento del sistema de recuperación de agua de lavadoras y la relación de flujos agua/aire.

## RECOMENDACIONES

1. Instalar una torre de enfriamiento de tiro inducido con un área transversal entre 1,96 metros cuadrados y 2,55 metros cuadrados.
2. Controlar en el proceso de lavado la temperatura de salida del agua recuperada (temperatura de entrada de la torre de enfriamiento), para mantener dicha temperatura dentro de los límites establecidos de diseño de la torre de enfriamiento.
3. Al diseñar la torre de enfriamiento para el sistema de recuperación de agua de lavadora, debe hacerse de tal forma que pueda ampliarse su capacidad de enfriamiento, tomando en cuenta los incrementos de temperatura en el proceso de lavado y las variantes en las condiciones climáticas.
4. Consultar la norma Standard ATC 105 y la norma CTI Standard 201, la cuales señalan mayor detalle sobre las pruebas que deben efectuarse a las torres de enfriamiento y el procedimiento para certificar el rendimiento de la mismas de acuerdo al Instituto de Torres de Enfriamiento.



## BIBLIOGRAFÍA

1. CENGEL, Y. *Termodinámica*. 5ª ed. México: McGraw-Hill, 2006. 988 p.
2. GARCÍA, H. *Guía para el diseño de torres de enfriamiento*. Guatemala. Trabajo de graduación de Ing. Mecánico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1998. 129 p.
3. INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. *Compendio estadístico ambiental 2010* [en línea]. [ref. 11 de abril de 2013]. Disponible en Web: <<http://www.infoiarna.org.gt/red%20iarna/2012/Red%20Informa%203/adjuntos/Compendio%20Estadistico%20Ambiental%202010.pdf>>.
4. KERN, D. *Procesos de transferencia de calor*. México: McGraw-Hill, 1998. 980 p.
5. MCCABE, W. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. 7ª ed. México: McGraw-Hill, 2007. 1189 p.
6. MCQUISTON, F. *Calefacción, ventilación y aire acondicionado*. México: LIMUSA, 2003. 622 p.
7. MOTT, R. *Mecánica de fluidos*. 6ª ed. México: Prentice Hall, 2006. 628 p.

8. PERRY, R., et al. *Manual del Ingeniero Químico*. 6<sup>a</sup> ed. México: McGraw-Hill, 1997. vol 3-63 p.
9. SAMPIERI, R. *Metodología de la investigación*. México: McGraw-Hill, 1991. 505 p.
10. TREYBAL, R. *Operaciones de transferencia de masa*. 2<sup>a</sup> ed. México: McGraw-Hill, 1970. 862 p.

## **APÉNDICE**



## APÉNDICE 1

Tabla XX. **Rango de enfriamiento y aproximación calculados para la relación de flujo de 0,753**

Temperatura agua (°C)		Temperatura aire entrada (°C)		Rango enfriamiento (°C)	Aproximación (°C)
Entrada	Salida	Bulbo seco	Bulbo húmedo		
31,60	22,50	16,00	14,00	9,10	8,50
34,00	22,60	17,00	14,00	11,40	8,60
34,90	23,90	16,00	14,00	11,00	9,90
36,10	24,20	19,00	15,00	11,90	9,20
37,50	25,00	20,00	16,00	12,50	9,00
38,00	26,70	22,00	16,00	11,30	10,70
39,40	26,70	22,00	16,00	12,70	10,70
39,80	26,60	23,00	16,00	13,20	10,60
39,80	27,00	24,00	16,00	12,80	11,00
40,00	27,10	25,00	16,00	12,90	11,10
40,50	27,00	25,00	17,00	13,50	10,00
40,80	28,10	26,00	18,00	12,70	10,10
41,00	27,50	25,00	18,00	13,50	9,50
41,80	28,10	24,00	18,00	13,70	10,10
42,00	28,00	25,00	19,00	14,00	9,00
41,10	28,00	25,00	18,00	13,10	10,00
42,00	27,80	23,00	17,00	14,20	10,80
41,50	27,10	23,00	17,00	14,40	10,10
36,10	25,30	17,00	15,00	10,80	10,30
36,10	25,10	17,00	15,00	11,00	10,10
37,10	25,00	18,00	15,00	12,10	10,00
38,00	27,50	20,00	16,00	10,50	11,50
39,90	28,00	20,00	16,00	11,90	12,00
41,70	28,50	21,00	16,00	13,20	12,50

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Continuación de valores de rango de enfriamiento y aproximación calculados para la relación de flujo de 0,753**

Temperatura agua (°C)		Temperatura aire entrada (°C)		Rango enfriamiento (°C)	Aproximación (°C)
Entrada	Salida	Bulbo seco	Bulbo húmedo		
36,00	24,60	20,00	15,00	11,40	9,60
36,50	25,20	20,00	15,00	11,30	10,20
37,00	25,80	21,00	16,00	11,20	9,80
38,10	27,10	22,00	16,00	11,00	11,10
39,20	28,30	22,00	17,00	10,90	11,30
40,20	26,00	23,00	17,00	14,20	9,00
40,50	26,20	23,00	17,00	14,30	9,20
40,80	27,00	23,00	17,00	13,80	10,00
40,00	25,00	22,00	17,00	15,00	8,00
40,00	27,20	22,00	17,00	12,80	10,20
40,10	29,40	23,00	17,00	10,70	12,40
32,70	24,50	17,00	14,00	8,20	10,50
34,10	23,90	18,00	14,00	10,20	9,90
36,90	26,90	19,00	14,00	10,00	12,90
35,90	25,50	18,00	14,00	10,40	11,50
38,00	27,00	19,00	14,00	11,00	13,00
37,20	27,20	20,00	14,00	10,00	13,20
38,00	27,70	22,00	15,00	10,30	12,70
28,50	22,30	16,00	14,00	6,20	8,30
32,90	25,20	17,00	14,00	7,70	11,20
34,80	24,70	17,00	15,00	10,10	9,70
34,80	25,80	16,00	14,00	9,00	11,80
37,10	26,70	19,00	15,00	10,40	11,70
37,60	27,30	19,00	15,00	10,30	12,30
37,00	27,00	19,00	15,00	10,00	12,00
37,10	26,10	20,00	15,00	11,00	11,10
38,00	27,10	21,00	16,00	10,90	11,10
39,30	28,00	21,00	16,00	11,30	12,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Continuación de valores de rango de enfriamiento y aproximación calculados para la relación de flujo de 0,753**

Temperatura agua (°C)		Temperatura aire entrada (°C)		Rango enfriamiento (°C)	Aproximación (°C)
Entrada	Salida	Bulbo seco	Bulbo húmedo		
30,00	23,00	20,00	18,00	7,00	5,00
32,20	23,10	21,00	18,00	9,10	5,10
31,10	23,30	21,00	18,00	7,80	5,30
31,50	23,00	22,00	19,00	8,50	4,00
31,20	24,10	22,00	19,00	7,10	5,10
31,00	25,00	23,00	19,00	6,00	6,00
31,60	25,60	24,00	20,00	6,00	5,60
32,90	26,00	25,00	20,00	6,90	6,00
33,00	27,20	26,00	20,00	5,80	7,20
35,00	28,10	27,00	20,00	6,90	8,10
35,50	28,10	27,00	19,00	7,40	9,10
36,40	29,80	28,00	19,00	6,60	10,80
37,00	30,40	25,00	20,00	6,60	10,40
38,10	29,60	25,00	19,00	8,50	10,60
38,30	29,00	24,00	19,00	9,30	10,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Rango de enfriamiento y aproximación calculados para la relación de flujo de 0,805**

Temperatura agua (°C)		Temperatura aire en entrada (°C)		Rango enfriamiento (°C)	Aproximación (°C)
Entrada	Salida	Bulbo seco	Bulbo húmedo		
33,00	25,20	20,00	18,00	7,80	7,20
35,00	27,20	20,00	18,00	7,80	9,20
36,00	28,00	20,00	18,00	8,00	10,00
38,20	28,00	23,00	18,00	10,20	10,00
39,90	29,20	23,00	19,00	10,70	10,20
41,00	31,90	23,00	18,00	9,10	13,90
29,00	22,80	18,00	13,00	6,20	9,80
30,40	22,10	19,00	13,00	8,30	9,10
32,10	22,80	19,00	13,00	9,30	9,80
32,50	22,90	19,00	13,00	9,60	9,90
33,80	24,30	20,00	13,00	9,50	11,30
35,10	24,70	20,00	14,00	10,40	10,70
36,20	25,10	22,00	14,00	11,10	11,10
37,10	25,80	23,00	14,00	11,30	11,80
38,20	27,00	23,00	14,00	11,20	13,00
39,00	27,60	23,00	14,00	11,40	13,60
32,10	24,90	16,00	14,00	7,20	10,90
33,70	25,10	17,00	14,00	8,60	11,10
35,90	26,20	18,00	14,00	9,70	12,20
37,10	26,90	19,00	14,00	10,20	12,90
39,20	28,00	19,00	15,00	11,20	13,00
39,70	28,10	21,00	15,00	11,60	13,10

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Continuación de valores de rango de enfriamiento y aproximación calculados para la relación de flujo de 0,805**

Temperatura agua (°C)		Temperatura aire en entrada (°C)		Rango enfriamiento (°C)	Aproximación (°C)
Entrada	Salida	Bulbo seco	Bulbo húmedo		
31,20	24,90	17,00	15,00	6,30	9,90
33,30	24,70	18,00	15,00	8,60	9,70
33,90	25,00	18,00	15,00	8,90	10,00
35,00	25,90	20,00	16,00	9,10	9,90
36,20	26,10	20,00	17,00	10,10	9,10
38,30	28,40	21,00	17,00	9,90	11,40
38,50	27,50	25,00	17,00	11,00	10,50
38,20	29,10	25,00	17,00	9,10	12,10
40,00	29,00	25,00	17,00	11,00	12,00
40,70	29,50	25,00	17,00	11,20	12,50
39,90	27,00	24,00	17,00	12,90	10,00
39,60	26,10	26,00	17,00	13,50	9,10
33,40	23,50	18,00	15,00	9,90	8,50
33,00	23,50	19,00	15,00	9,50	8,50
34,20	23,50	19,00	15,00	10,70	8,50
35,00	23,50	19,00	15,00	11,50	8,50
34,20	26,00	21,00	16,00	8,20	10,00
37,40	27,10	22,00	16,00	10,30	11,10
37,20	28,00	23,00	16,00	9,20	12,00
37,00	24,90	24,00	17,00	12,10	7,90
34,50	25,10	26,00	17,00	9,40	8,10
35,00	26,90	27,00	17,00	8,10	9,90
37,10	28,50	26,00	18,00	8,60	10,50
39,10	29,20	25,00	18,00	9,90	11,20
38,20	30,00	25,00	18,00	8,20	12,00
38,00	29,00	25,00	17,00	9,00	12,00
39,30	30,00	26,00	17,00	9,30	13,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Continuación de valores de rango de enfriamiento y aproximación calculados para la relación de flujo de 0,805**

Temperatura agua (°C)		Temperatura aire en entrada (°C)		Rango enfriamiento (°C)	Aproximación (°C)
Entrada	Salida	Bulbo seco	Bulbo húmedo		
39,90	30,10	26,00	18,00	9,80	12,10
39,50	30,00	23,00	18,00	9,50	12,00
39,80	30,00	23,00	18,00	9,80	12,00
30,40	22,00	16,00	12,00	8,40	10,00
31,00	22,80	16,00	12,00	8,20	10,80
32,90	23,30	17,00	13,00	9,60	10,30
34,30	25,20	18,00	14,00	9,10	11,20
36,00	26,30	19,00	14,00	9,70	12,30
38,00	26,40	19,00	14,00	11,60	12,40
38,10	26,50	20,00	14,00	11,60	12,50
38,60	27,90	20,00	15,00	10,70	12,90
40,00	28,90	21,00	15,00	11,10	13,90
40,90	29,10	21,00	15,00	11,80	14,10
41,00	30,20	22,00	16,00	10,80	14,20
40,20	29,00	22,00	16,00	11,20	13,00
40,00	28,90	22,00	16,00	11,10	12,90

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Rango de enfriamiento y aproximación calculados para la relación de flujo de 0,845**

Temperatura agua (°C)		Temperatura aire en entrada (°C)		Rango enfriamiento (°C)	Aproximación (°C)
Entrada	Salida	Bulbo seco	Bulbo húmedo		
31,00	25,10	23,00	19,00	5,90	6,10
31,10	26,00	23,00	19,00	5,10	7,00
33,00	27,10	24,00	19,00	5,90	8,10
34,00	28,00	26,00	20,00	6,00	8,00
35,50	27,50	27,00	20,00	8,00	7,50
35,50	28,20	26,00	20,00	7,30	8,20
38,20	30,00	29,00	20,00	8,20	10,00
39,10	31,00	28,00	21,00	8,10	10,00
39,30	30,00	29,00	21,00	9,30	9,00
40,00	30,50	28,00	21,00	9,50	9,50
41,00	31,00	29,00	21,00	10,00	10,00
41,80	31,10	30,00	22,00	10,70	9,10
31,50	26,00	19,00	16,00	5,50	10,00
32,60	25,50	19,00	16,00	7,10	9,50
35,10	27,10	19,00	17,00	8,00	10,10
37,70	28,10	22,00	17,00	9,60	11,10
40,50	29,70	22,00	17,00	10,80	12,70
41,50	30,00	25,00	18,00	11,50	12,00
30,00	21,20	12,00	9,00	8,80	12,20
31,00	22,80	14,00	9,00	8,20	13,80
31,00	22,90	15,00	9,00	8,10	13,90
31,00	23,00	17,00	10,00	8,00	13,00
31,20	23,30	17,00	10,00	7,90	13,30
34,10	24,10	18,00	11,00	10,00	13,10
37,30	27,10	18,00	11,00	10,20	16,10
37,50	27,00	18,00	12,00	10,50	15,00
37,50	27,00	18,00	12,00	10,50	15,00
38,10	27,90	19,00	12,00	10,20	15,90
39,10	28,60	21,00	13,00	10,50	15,60
39,20	28,90	21,00	13,00	10,30	15,90

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Continuación de valores de rango de enfriamiento y aproximación calculados para la relación de flujo de 0,845**

Temperatura agua (°C)		Temperatura aire en entrada (°C)		Rango enfriamiento (°C)	Aproximación (°C)
Entrada	Salida	Bulbo seco	Bulbo húmedo		
33,10	25,90	18,00	16,00	7,20	9,90
34,00	26,10	19,00	16,00	7,90	10,10
36,80	28,80	22,00	16,00	8,00	12,80
38,90	29,00	23,00	17,00	9,90	12,00
41,00	30,10	23,00	17,00	10,90	13,10
41,10	30,00	23,00	17,00	11,10	13,00
41,10	30,10	25,00	17,00	11,00	13,10
42,80	31,40	24,00	18,00	11,40	13,40
29,40	23,50	16,00	12,00	5,90	11,50
30,90	23,80	17,00	12,00	7,10	11,80
31,70	24,80	18,00	13,00	6,90	11,80
32,10	24,90	17,00	13,00	7,20	11,90
33,00	25,00	19,00	14,00	8,00	11,00
33,00	25,70	20,00	14,00	7,30	11,70
34,00	26,00	20,00	15,00	8,00	11,00
35,00	26,50	23,00	15,00	8,50	11,50
35,40	27,00	23,00	15,00	8,40	12,00
36,00	27,80	24,00	15,00	8,20	12,80
37,00	28,00	24,00	15,00	9,00	13,00
37,10	29,00	24,00	16,00	8,10	13,00
38,00	29,50	25,00	17,00	8,50	12,50
39,10	29,10	24,00	16,00	10,00	13,10
26,20	21,10	15,00	12,00	5,10	9,10
29,50	22,30	15,00	12,00	7,20	10,30
32,30	23,40	16,00	12,00	8,90	11,40
33,50	24,50	16,00	13,00	9,00	11,50
34,00	25,20	17,00	13,00	8,80	12,20
34,70	25,70	17,00	13,00	9,00	12,70

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Rango de enfriamiento y aproximación calculados para la relación de flujo de 0,845**

Temperatura agua (°C)		Temperatura aire en entrada (°C)		Rango enfriamiento (°C)	Aproximación (°C)
Entrada	Salida	Bulbo seco	Bulbo húmedo		
34,70	25,70	17,00	13,00	9,00	12,70
35,10	26,10	17,00	13,00	9,00	13,10
35,50	26,90	18,00	13,00	8,60	13,90
36,20	27,00	19,00	14,00	9,20	13,00
37,00	28,00	19,00	14,00	9,00	14,00
37,70	28,60	20,00	14,00	9,10	14,60
38,20	29,60	20,00	14,00	8,60	15,60
39,50	29,70	21,00	14,00	9,80	15,70
40,80	30,50	21,00	14,00	10,30	16,50

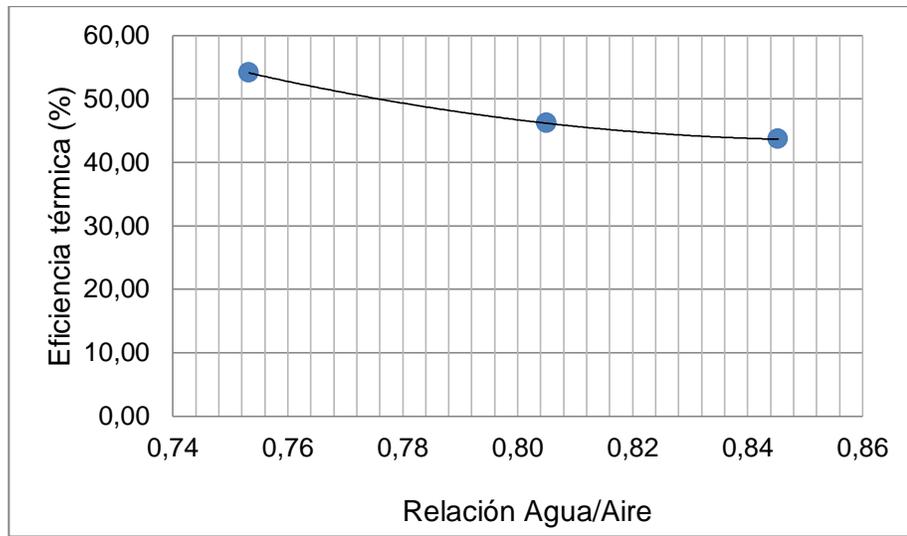
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Eficiencia térmica promedio obtenida de torre de enfriamiento trabajando la lavadora de envase de línea 3 para cada relación de flujo agua/aire**

Agua/Aire	Eficiencia térmica (%)				
	Corrida			Promedio	Desviación estándar
1	2	3			
0,75	55,12	51,16	55,95	54,07	2,56
0,81	44,19	47,01	47,26	46,16	1,71
0,85	39,47	43,95	47,47	43,63	4,01

Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **Curva de eficiencia térmica promedio de torre de enfriamiento trabajando la lavadora de envase de línea 3 para cada relación de flujo agua/aire**



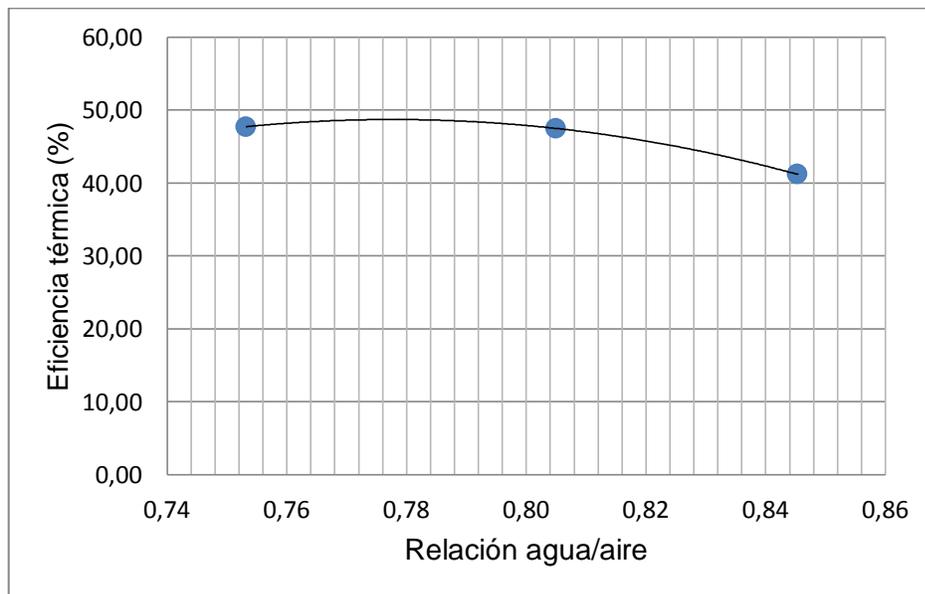
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Eficiencia térmica promedio obtenida de torre de enfriamiento trabajando las lavadoras de envase de línea 3 y línea 1 para cada relación de flujo agua/aire**

Agua/Aire	Eficiencia térmica (%)				
	Corrida			Promedio	Desviación estándar
1	2	3			
0,75	51,22	46,37	45,64	47,74	3,03
0,81	45,65	48,14	48,67	47,49	1,61
0,85	39,89	39,61	44,09	41,20	2,51

Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Curva de eficiencia térmica promedio de torre de enfriamiento trabajando las lavadoras de envase de línea 3 y línea 1 para cada relación de flujo agua/aire**



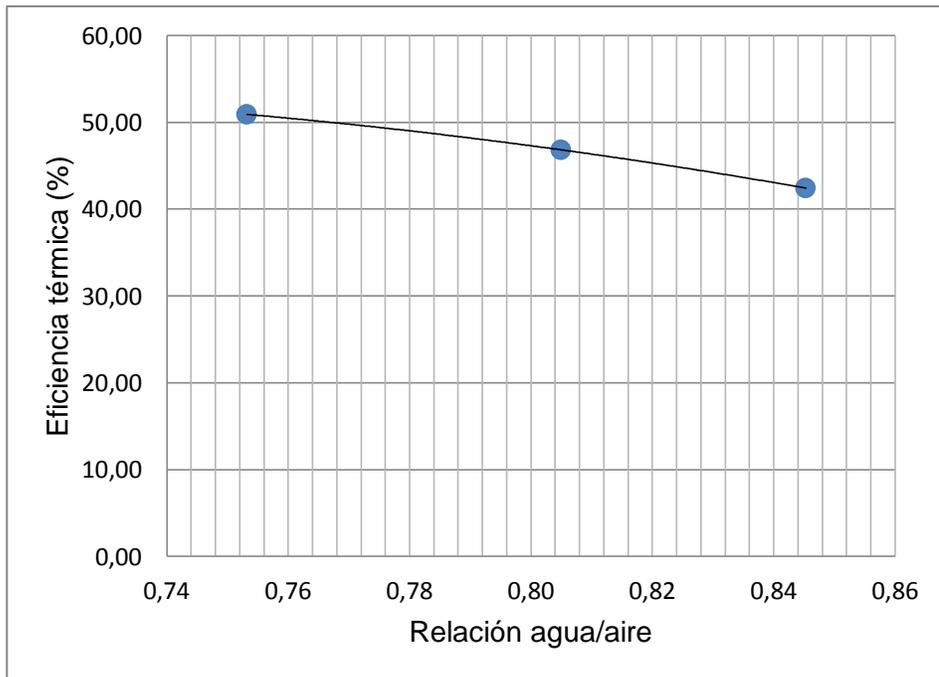
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Eficiencia térmica global de torre de enfriamiento para cada relación de flujo agua/aire**

Agua/Aire	Eficiencia térmica global	
	ET (%)	± ET(%)
0,75	50,91	4,19
0,81	46,82	3,84
0,85	42,42	3,28

Fuente: elaboración propia

Figura 16. **Curva de eficiencia térmica global de torre de enfriamiento para cada relación de flujo agua/aire**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. **Coefficiente de transferencia de masa de torre de enfriamiento obtenido para cada relación de flujo agua/aire**

AGUA/AIRE	Coeficiente de transferencia de masa (kg/mh)					
	L3		L1+L3		Promedio	
	$K_{ya}$	$\pm K_{ya}$	$K_{ya}$	$\pm K_{ya}$	$K_{ya}$	$\pm K_{ya}$
0,75	11214,98	108,25	8510,79	113,13	9862,88	110,69
0,81	10042,89	113,13	8898,53	111,15	9470,71	112,14
0,85	7999,01	113,13	11654,52	113,13	9826,76	113,13

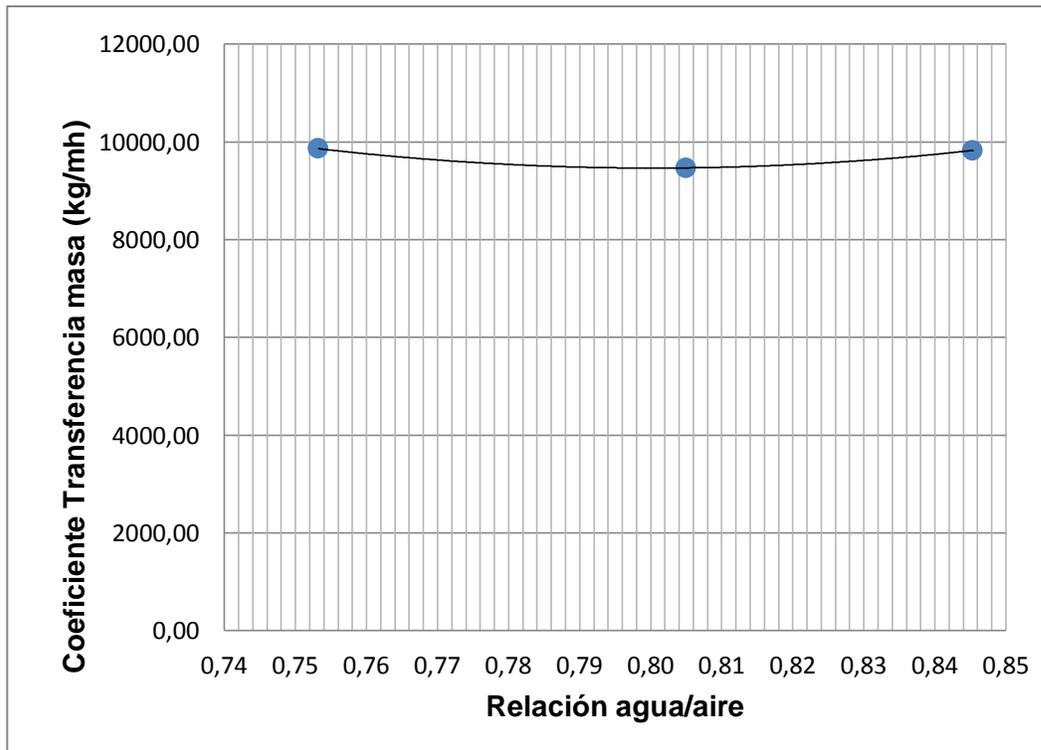
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Eficiencia térmica obtenida de torre de enfriamiento para cada relación de flujo agua/aire y los resultados de los parámetros estadísticos**

Agua/Aire	Corrida	Eficiencia térmica (%)	
		L3	L1 + L3
0,75	1	55,12	51,22
	2	51,16	46,37
	3	55,95	45,64
0,81	1	44,19	45,65
	2	47,01	48,14
	3	47,26	48,67
0,85	1	39,47	39,89
	2	43,95	39,61
	3	47,47	44,09
Promedio		47,95	45,48
Desviación Estándar		5,35	3,63
t calculada		1,13	
t crítica		2,12	

Fuente: elaboración propia

Figura 17. **Curva de coeficiente de transferencia de masa de torre de enfriamiento obtenido para cada relación de flujo agua/aire**



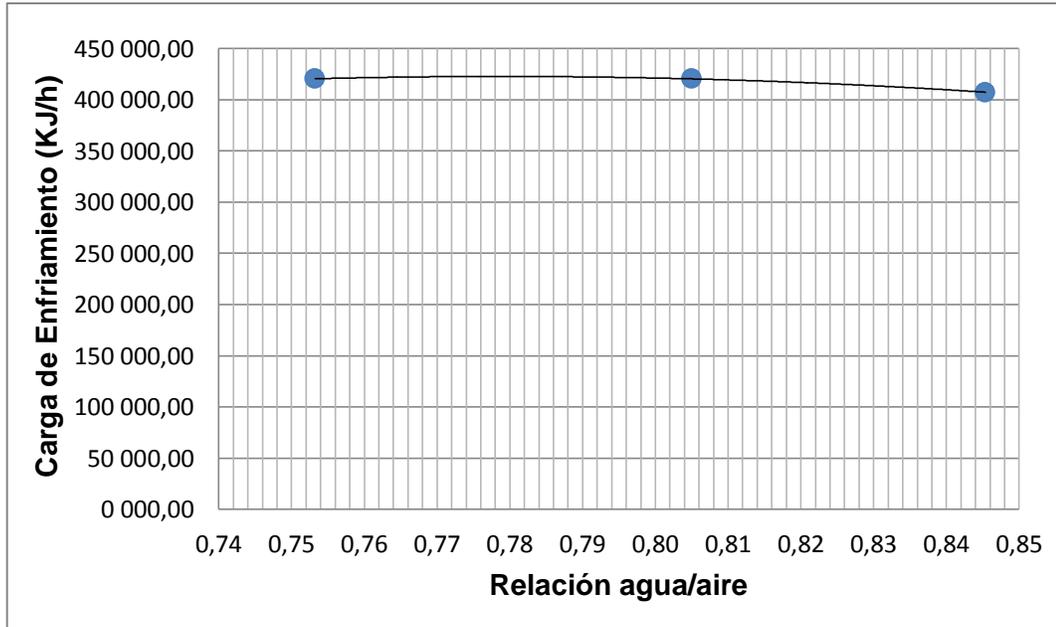
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. **Carga de enfriamiento de torre de enfriamiento para cada relación de flujo agua/aire**

AGUA/AIRE	Carga de enfriamiento (KJ/h)					
	L3		L1+L3		Promedio	
	CE	±CE	CE	±CE	CE	±CE
0,75	478 292,03	4782,92	362 524,29	3625,24	420 408,16	4204,08
0,81	409 096,59	4090,97	431 468,96	4314,69	420 282,77	4202,83
0,85	393 283,69	3932,84	421 345,15	4213,45	407 314,42	4073,14

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Curva de carga de enfriamiento de torre de enfriamiento para cada relación de flujo agua/aire**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. **Eficiencia térmica de torre de enfriamiento antes y después mantenimiento**

Corrida	Eficiencia térmica (%)	
	Antes Mantenimiento	Después de Mantenimiento
1	51,22	55,95
2	47,26	51,16
3		55,12
4		45,64
5		46,37
6		47,01
7		44,19
8		48,67
9		48,14
10		45,65
Promedio	49,24	48,79
Desviación Estándar	2,80	4,05
t calculada		0,19
t crítica		2,23

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. **Área transversal óptima y área transversal real de torre de enfriamiento para cada flujo de agua a la entrada de la misma**

No.	Flujo de agua	Densidad de irrigación	Área transversal óptima				Área real
			A <sub>o</sub>		A <sub>o</sub> + 30%		
	gal/min	gal/minft <sup>2</sup>	ft <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	ft <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>
1	42,70	2,50	17,08	1,59	22,20	2,06	0,81
2	45,63	2,50	18,25	1,70	23,73	2,20	0,81
3	47,91	2,50	19,17	1,78	24,92	2,31	0,81
4	52,83	2,50	21,13	1,96	27,47	2,55	0,81

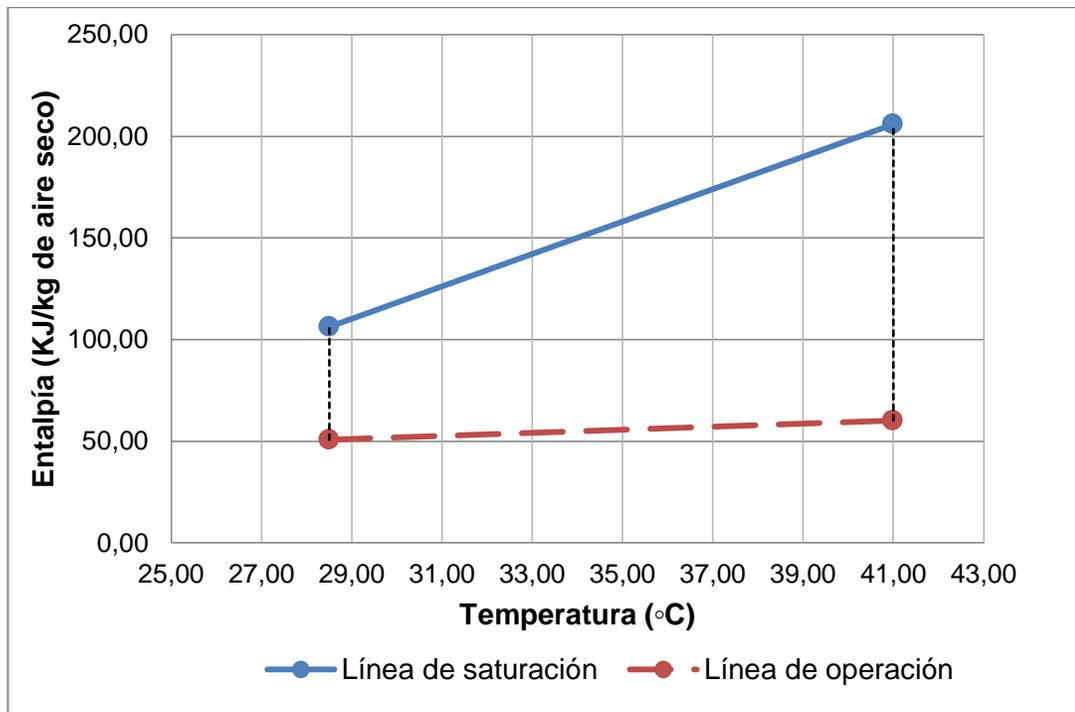
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVII. **Densidad de irrigación calculada para las condiciones de temperatura de trabajo de la torre de enfriamiento en tratamiento**

Temperatura entrada	Temperatura salida	Temperatura de bulbo húmedo	Densidad de irrigación
°F	°F	°F	gal/minft <sup>2</sup>
113,00	80,60	65,30	2,50

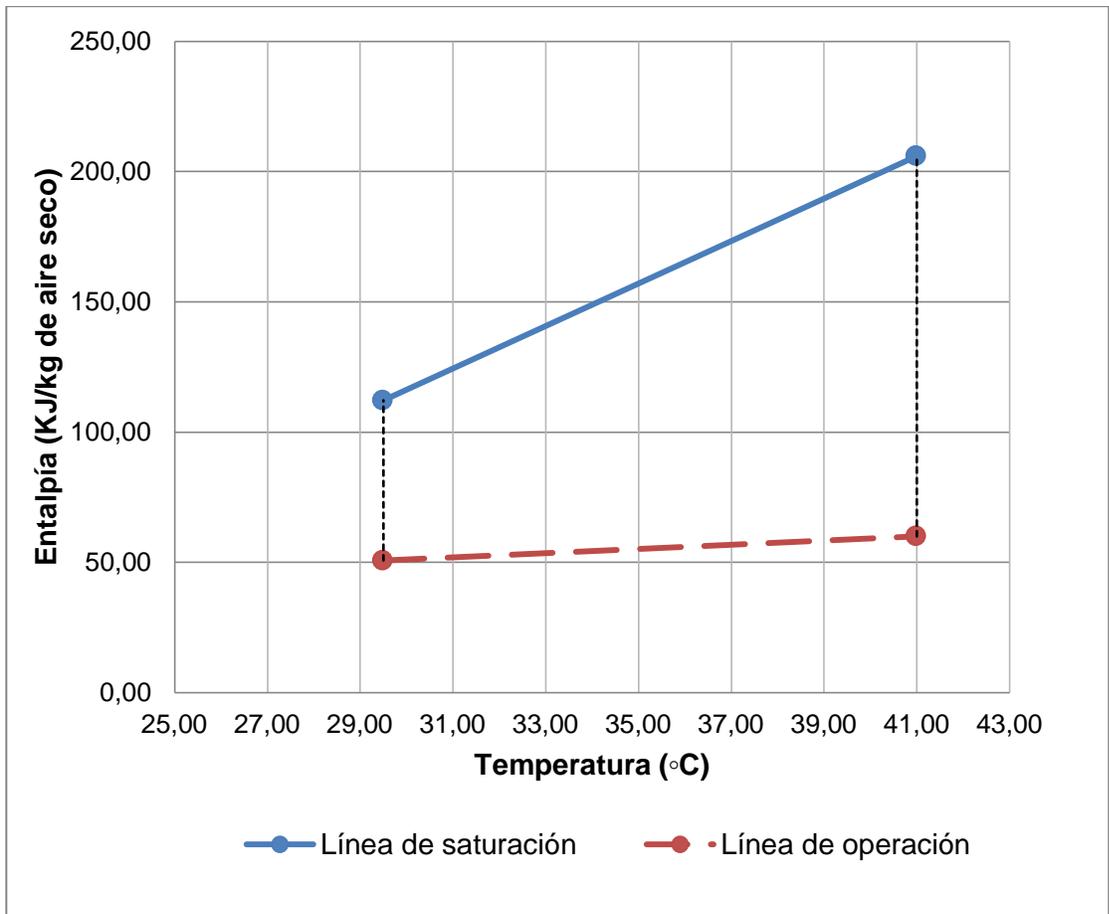
Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Línea de saturación y línea de operación de torre de enfriamiento para la relación de flujo agua/aire de 0,75 a una presión atmosférica promedio de 0,83 atmósferas**



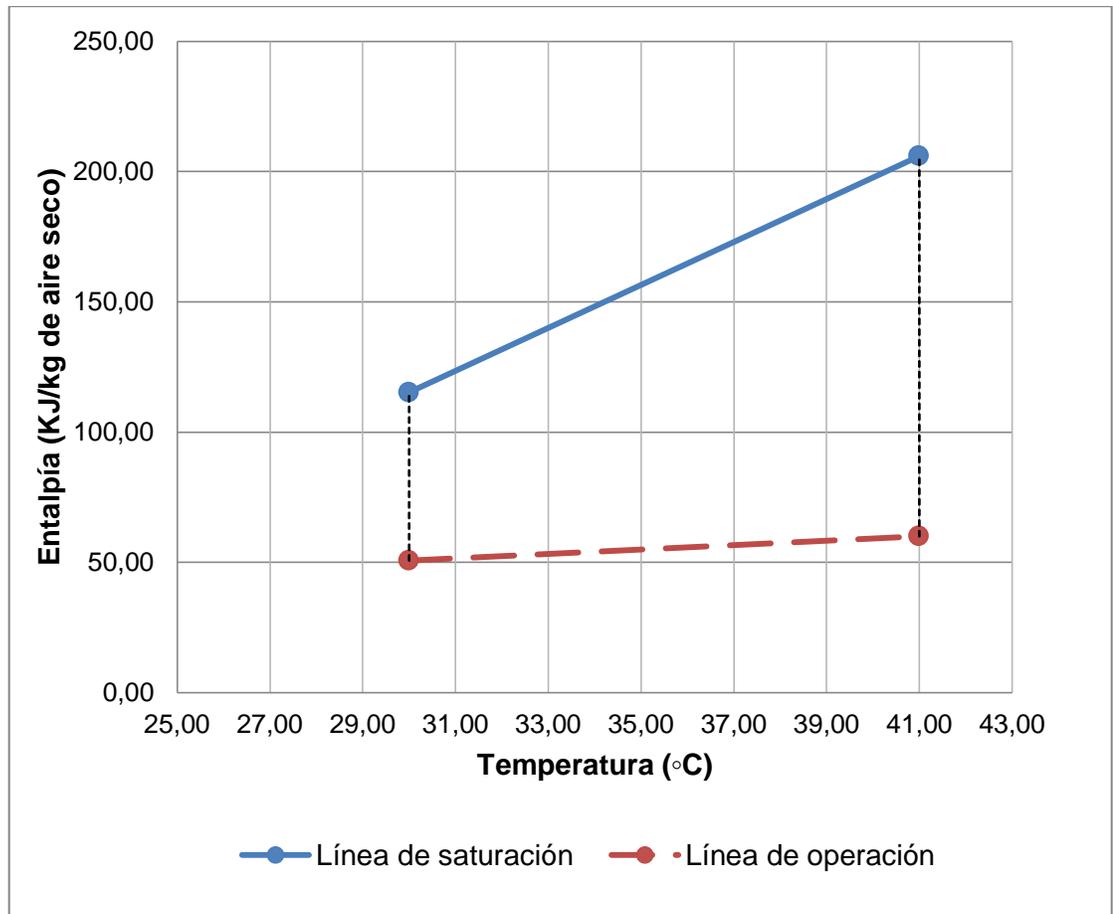
Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Línea de saturación y línea de operación de torre de enfriamiento para la relación de flujo de 0,81 a una presión atmosférica promedio de 0,83 atmósferas**



Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Línea de saturación y línea de operación de torre de enfriamiento para la relación de flujo de 0,85 a una presión atmosférica promedio de 0,83 atmósferas**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Eficiencia térmica, coeficiente de transferencia de masa y carga de enfriamiento obtenidos para la relación de flujos agua/aire de 0,75, trabajando la lavadora de envase de línea 3**

L3	Eficiencia térmica		Coeficiente transferencia de masa		Carga enfriamiento	
	%	± %	kg/mh	± kg/mh	KJ/h	± KJ/h
Corrida						
1	55,95	5,20	6617,83	107,18	509914,65	5099,15
2	51,16	4,66	15264,94	113,13	466508,13	4665,08
3	55,12	4,66	11762,17	104,43	458453,32	4584,53
Promedio	54,07	4,84	11214,98	108,25	478292,03	4782,92
Desviación Estándar	2,56		4349,45		27680,54	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIX. **Eficiencia térmica, coeficiente de transferencia de masa y carga de enfriamiento obtenidos para la relación de flujos agua/aire de 0,75, trabajando la lavadora de envase de línea 3 y de línea 1**

L1+L3	Eficiencia térmica		Coeficiente transferencia de masa		Carga enfriamiento	
	%	± %	kg/mh	± kg/mh	KJ/h	± KJ/h
Corrida						
1	45,64	3,91	9699,40	113,13	403316,18	4033,16
2	46,37	3,80	11069,06	113,13	390255,87	3902,56
3	51,22	2,92	4763,89	113,13	294000,81	2940,01
Promedio	47,74	3,55	8510,79	113,13	362524,29	3625,24
Desviación Estándar	3,03		3316,39		59701,28	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XL. **Eficiencia térmica, coeficiente de transferencia de masa y carga de enfriamiento obtenidos para la relación de flujos agua/aire de 0,81, trabajando la lavadora de envase de línea 3**

L3	Eficiencia térmica		Coeficiente transferencia de masa		Carga enfriamiento		
	Corrida	%	± %	kg/mh	± kg/mh	KJ/h	± KJ/h
1		47,26	3,52	7762,83	113,13	384514,44	3845,14
2		47,01	3,87	9949,14	113,13	423109,36	4231,09
3		44,19	3,78	12416,70	113,13	419665,95	4196,66
Promedio		46,16	3,72	10042,89	113,13	409096,59	4090,97
Desviación Estándar		1,71		2328,35		21358,27	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLI. **Eficiencia térmica, coeficiente de transferencia de masa y carga de enfriamiento obtenidos para la relación de flujos agua/aire de 0,81, trabajando la lavadora de envase de línea 3 y de línea 1**

L1+L3	Eficiencia térmica		Coeficiente transferencia de masa		Carga enfriamiento		
	Corrida	%	± %	kg/mh	± kg/mh	KJ/h	± KJ/h
1		48,67	4,01	9578,41	113,13	434068,69	4340,69
2		48,14	3,80	10173,83	107,18	413687,80	4136,88
3		45,65	4,05	6943,35	113,13	446650,39	4466,50
Promedio		47,49	3,96	8898,53	111,15	431468,96	4314,69
Desviación Estándar		1,61		1719,21		16634,36	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLII. **Eficiencia térmica, coeficiente de transferencia de masa y carga de enfriamiento obtenidos para la relación de flujos agua/aire de 0,85, trabajando la lavadora de envase de línea 3**

L3	Eficiencia térmica		Coeficiente transferencia de masa		Carga enfriamiento		
	Corrida	%	± %	kg/mh	± kg/mh	KJ/h	± KJ/h
1		47,47	3,10	9921,09	113,13	354041,41	3540,41
2		43,95	3,39	5914,74	113,13	395471,79	3954,72
3		39,47	3,56	8161,20	113,13	430337,87	4303,38
Promedio		43,63	3,35	7999,01	113,13	393283,69	3932,84
Desviación Estándar		4,01		2008,09		38195,27	

Fuente: elaboración propia.

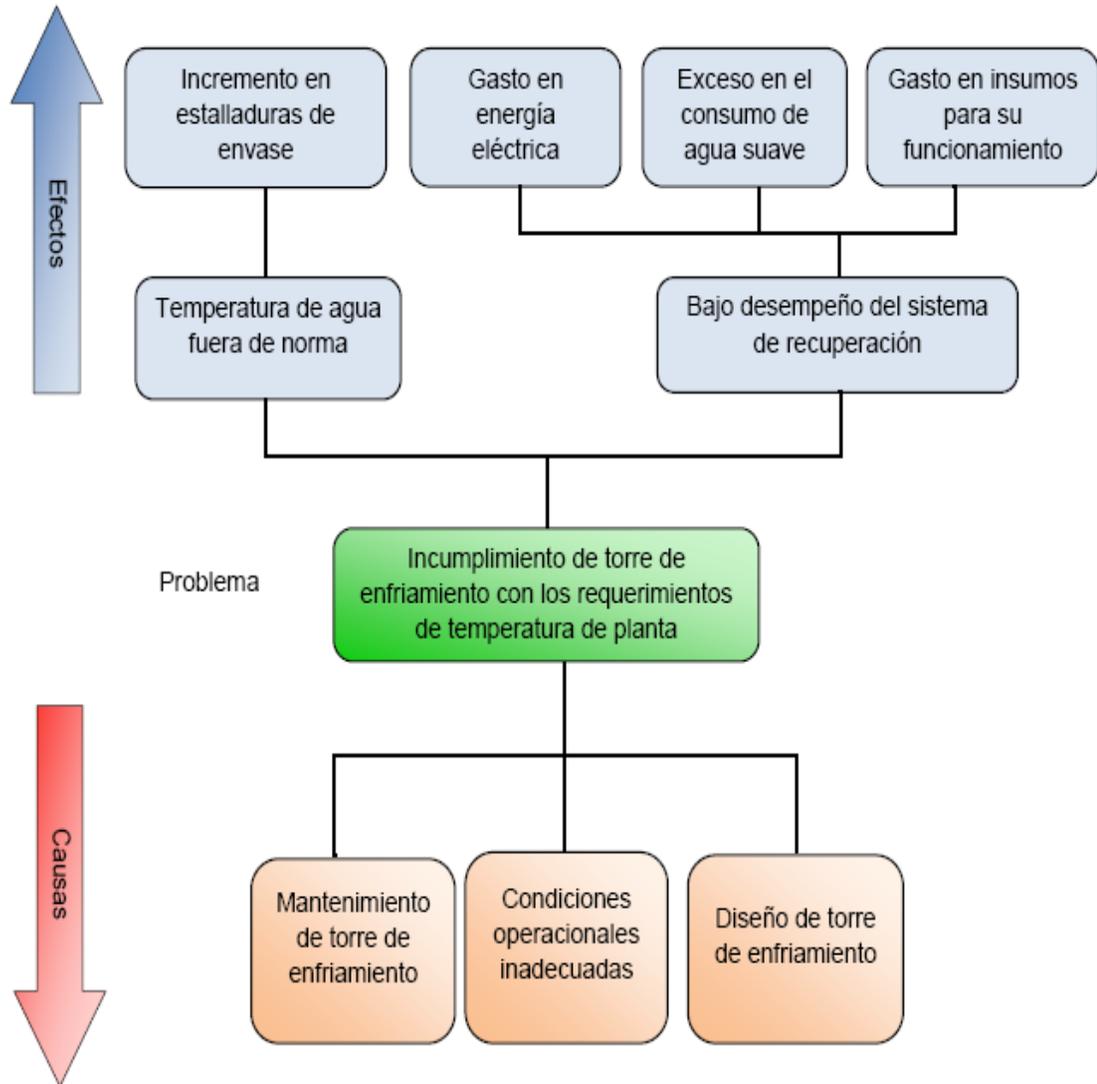
Tabla XLIII. **Eficiencia térmica, coeficiente de transferencia de masa y carga de enfriamiento obtenidos para la relación de flujos agua/aire de 0,85, trabajando la lavadora de envase de línea 3 y de línea 1**

L1+L3	Eficiencia térmica		Coeficiente transferencia de masa		Carga enfriamiento		
	Corrida	%	± %	kg/mh	± kg/mh	KJ/h	± KJ/h
1		44,09	3,75	11295,88	113,13	437278,80	4372,79
2		39,61	2,66	12298,09	113,13	434190,36	4341,90
3		39,89	3,25	11369,59	113,13	392566,28	3925,66
Promedio		41,20	3,22	11654,52	113,13	421345,15	4213,45
Desviación Estándar		2,51		558,56		24971,02	

Fuente: elaboración propia.

## APÉNDICE 2

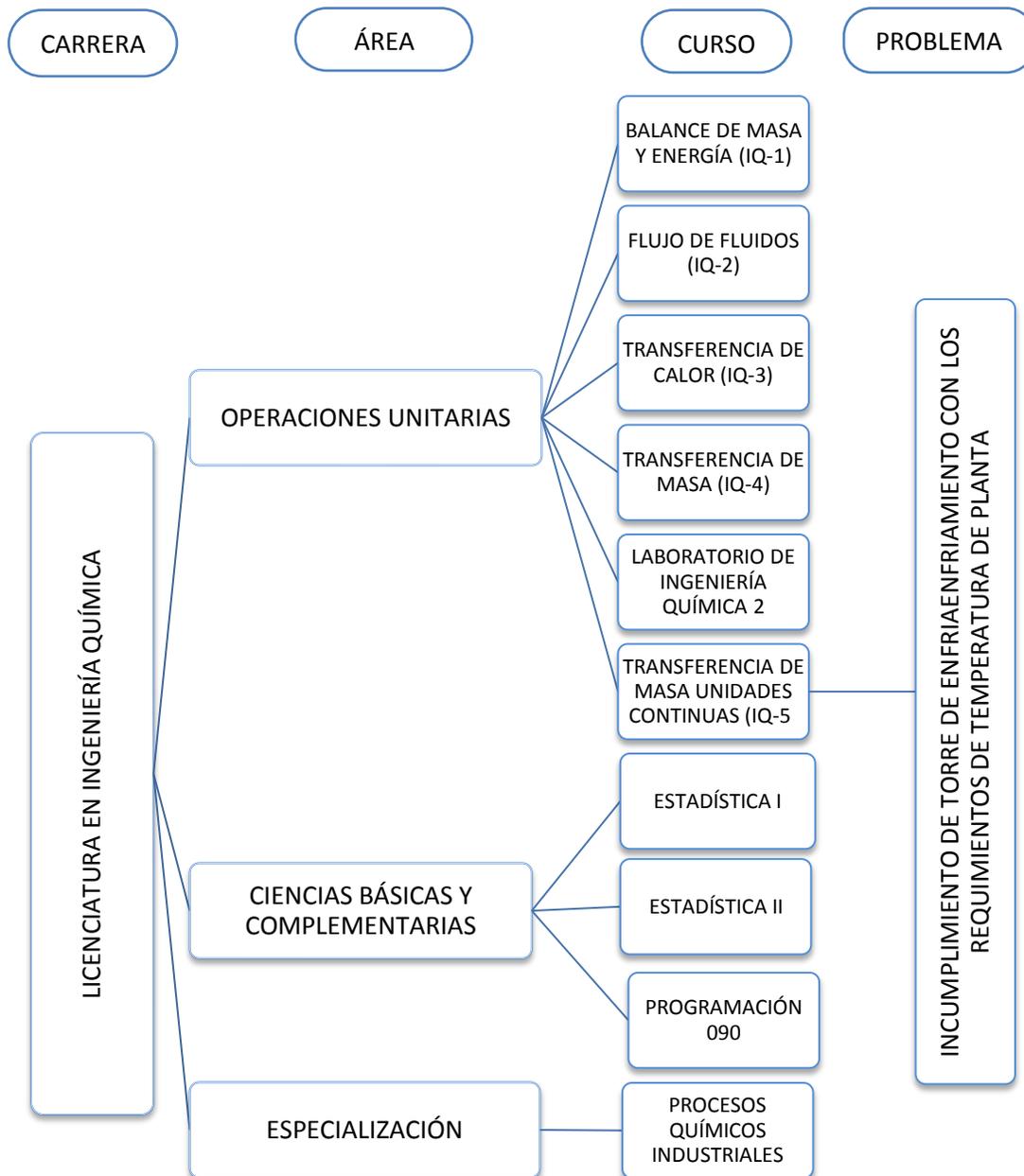
Figura 22. **Árbol de problemas del presente estudio**



Fuente: elaboración propia.

## APÉNDICE 3

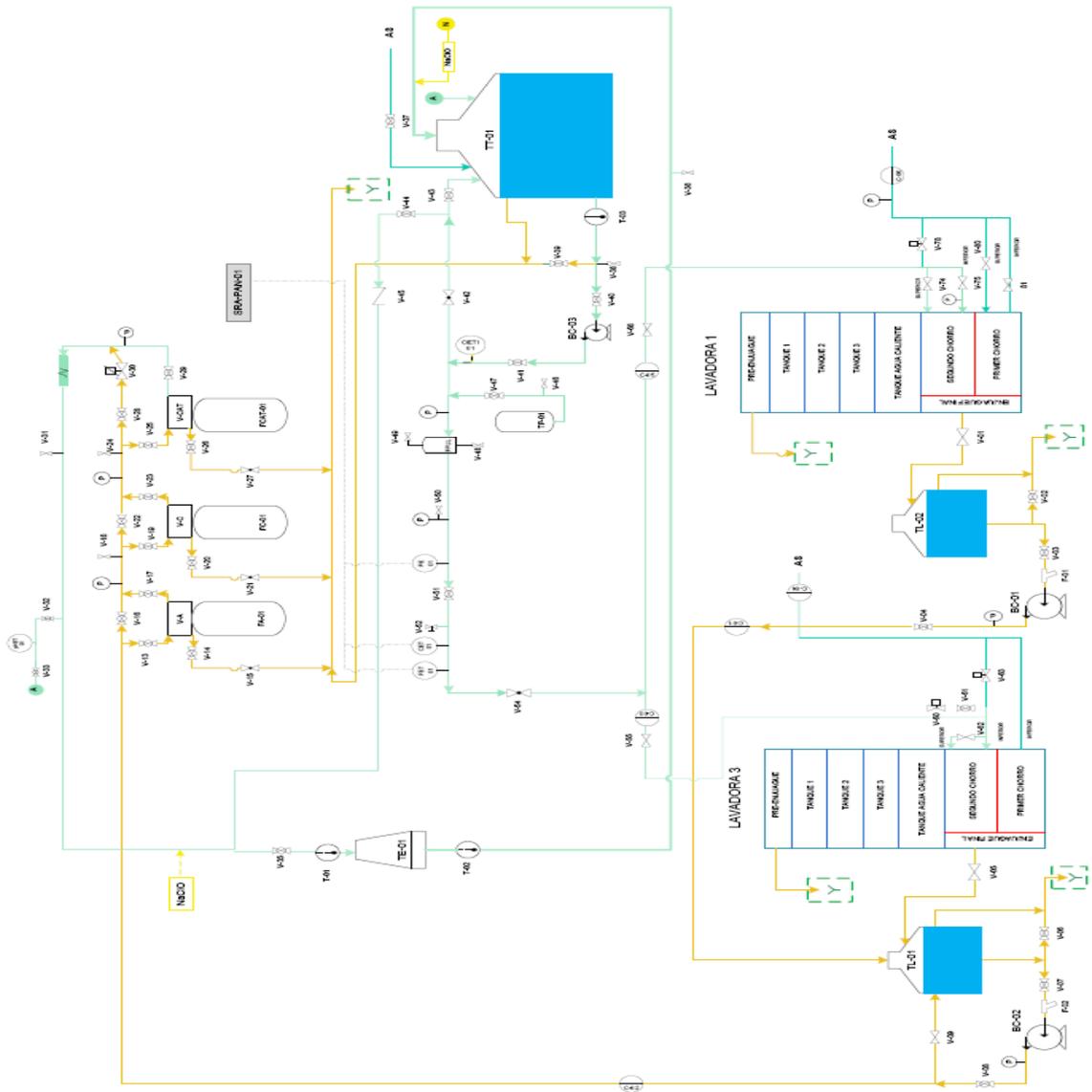
Figura 23. **Tabla de requisitos académicos**



Fuente: elaboración propia.

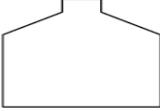
## APÉNDICE 4

Figura 24. Diagrama de equipo del sistema de recuperación de agua de lavadoras



Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Nomenclatura del diagrama de equipo del sistema de recuperación de agua de lavadoras**

	TT-01	Tanque de Homogenización Agua Procesada
	TL-01, TL-02	Tanques de Captación en línea 3 y línea 1
	v-02, v-03, etc.	Válvula reguladora de flujo manual (bola)
	v-01, v-05, etc.	Válvula reguladora de flujo manual (compuerta)
	v-15, v-21, etc.	Válvula reguladora de flujo manual (globo)
	v-34, v-45, etc.	Válvula de retención
	v-11, v-12, etc.	Válvula de paso
	v-10, v-60, etc.	Válvula abierto cerrado automática
	v-30	Válvula reguladora de flujo automática
	v-52	Toma muestra
	VA, VC, VCAT	Multi-válvula automática
	P	Manómetro
	FA-01	Filtro de arena
	C-1 al C-6	Contador de agua
	pHET-01	Sensor, transmisor de pH
	SRA-PAN-01	Panel de Control
		Mezclador estático
		Salida Drenaje

Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Continuación de nomenclatura del diagrama de equipo del sistema de recuperación de agua de lavadoras**

	FC-01	Filtro de carbón activado
	FCAT-01	Filtro de resina
	BC-01, BC-02, BC-03	Bomba centrífuga
	FPUL	Filtro pulidor
	TE-01	Torre de Enfriamiento
	TP-01	Tanque Hidroneumático
	CET	Sensor, transmisor de conductividad
	NaClO	Inyectores de hipoclorito de sodio
	PE-01, PE-02, PE-03	Presostato
	FET	Sensor, transmisor de flujo
	CIETI	Sensor, transmisor, indicador NaClO
	T-01, T-02, T-03	Termómetro
AS		AGUA SUAVIZADA

COLOR TUBERÍA	SIGNIFICADO
	Agua Recuperada Suavizada
	Agua Recuperada Lavadoras
	Agua Suavizada
	Inyección de hipoclorito de sodio
	Conexión Sensores

Fuente: elaboración propia.



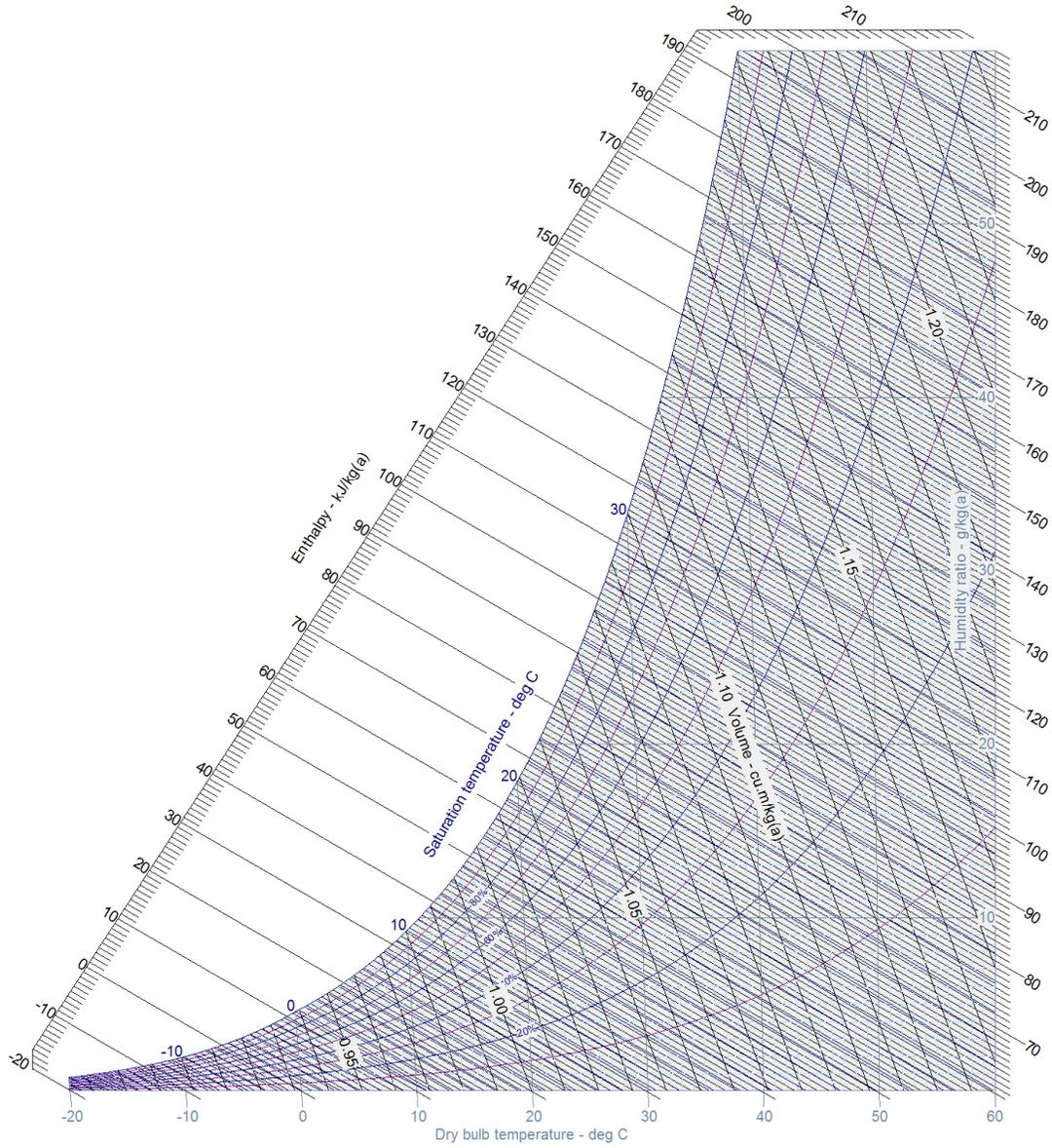
## **ANEXOS**



# ANEXOS

Figura 27. Carta psicrométrica a 0,83 atm de presión atmosférica

Pressure: 84099.9773 Pa



Fuente: herramienta CYTSoft Psychrometric Chart 2,2.

