



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

**DISEÑO, MONTAJE E INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON UN
CIRCUITO CERRADO DE AGUA DE ENFRIAMIENTO APLICADO A LOS EQUIPOS DE
DESTILACIÓN DEL LABORATORIO DE FISCOQUÍMICA, ESCUELA DE INGENIERÍA
QUÍMICA, FIUSAC**

José Benjamín Cancinos Flores

Asesorado por el Ing. Cesar Ariel Villela Rodas

Coasesorado por el Ing. William Eduardo Fagiani Cruz

Guatemala, mayo de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO, MONTAJE E INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON UN
CIRCUITO CERRADO DE AGUA DE ENFRIAMIENTO APLICADO A LOS EQUIPOS DE
DESTILACIÓN DEL LABORATORIO DE FISICOQUÍMICA, ESCUELA DE INGENIERÍA
QUÍMICA, FIUSAC**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JOSÉ BENJAMÍN CANCINOS FLORES

ASESORADO POR EL ING. CÉSAR ARIEL VILLELA RODAS
COASESORADO POR EL ING. WILLIAM EDUARDO FAGIANI CRUZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, MAYO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Núñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León de Paz
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
EXAMINADORA	Inga. Adela María Marroquín González
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

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:

**DISEÑO, MONTAJE E INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON UN
CIRCUITO CERRADO DE AGUA DE ENFRIAMIENTO APLICADO A LOS EQUIPOS DE
DESTILACIÓN DEL LABORATORIO DE FISICOQUÍMICA, ESCUELA DE INGENIERÍA
QUÍMICA, FIUSAC**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 02 de agosto de 2016.

José Benjamín Cancinos Flores

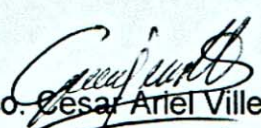
Guatemala, 28 de abril de 2017

Ingeniero Carlos Salvador Wong Davi
Director de Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Su despacho

Por este medio informo que he revisado el trabajo de graduación titulado: **"DISEÑO, MONTAJE E INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON UN CIRCUITO CERRADO DE AGUA DE ENFRIAMIENTO APLICADO A LOS EQUIPOS DE DESTILACIÓN DEL LABORATORIO DE FISICOQUÍMICA, ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA, FIUSAC"**. Del estudiante **José Benjamín Cancinos Flores** que se identifica con carné número **2012 12806** y CUI **2114 98025 0101**.

El mencionado trabajo llena los requisitos para dar mi aprobación e indicarle que el autor y mi persona somos responsables por el contenido y conclusión del mismo.

Atentamente


Ing. Qco. Cesar Ariel Villela Rodas

Colegiado 1175
Ing. Cesar Ariel Villela Rodas
INGENIERO QUIMICO
Colegiado No. 1,175

Guatemala, 28 de abril de 2017

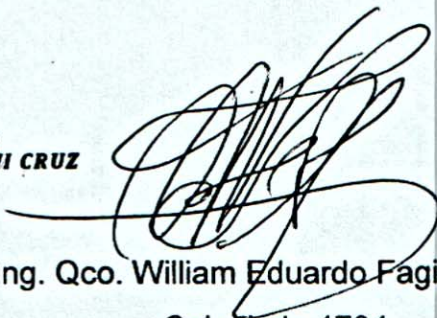
Ingeniero Carlos Salvador Wong Davi
Director de Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Su despacho

Por este medio informo que he revisado el trabajo de graduación titulado: **"DISEÑO, MONTAJE E INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON UN CIRCUITO CERRADO DE AGUA DE ENFRIAMIENTO APLICADO A LOS EQUIPOS DE DESTILACIÓN DEL LABORATORIO DE FISICOQUÍMICA, ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA, FIUSAC"**. Del estudiante **José Benjamín Cancinos Flores** que se identifica con carné número **2012 12806** y CUI: **2114 98025 0101**.

El mencionado trabajo llena los requisitos para dar mi aprobación e indicarle que el autor y mi persona somos responsables por el contenido y conclusión del mismo.

Atentamente

**INGENIERO QUÍMICO
WILLIAM EDUARDO FAGIANI CRUZ
COL. 1734**



Ing. Qco. William Eduardo Fagiani Cruz
Colegiado 1734



Guatemala, 04 de mayo de 2017.
Ref. EIQ.TG-IF.017.2017.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **020-2016** 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: **José Benjamín Cancinos Flores**.
Identificado con número de carné: **2012-12806**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

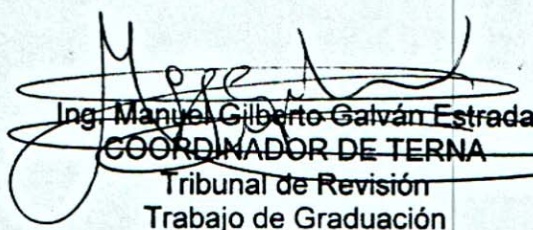
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**DISEÑO, MONTAJE E INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN
CON UN CIRCUITO CERRADO DE AGUA DE ENFRIAMIENTO APLICADO A
LOS EQUIPOS DE DESTILACIÓN DEL LABORATORIO DE FISICOQUÍMICA,
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA, FIUSAC**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por los Ingenieros Químicos: **César Ariel Villela Rodas** y **William Eduardo Fagiani Cruz**.

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. Manuel Gilberto Galván Estrada
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



ACAAI

Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería

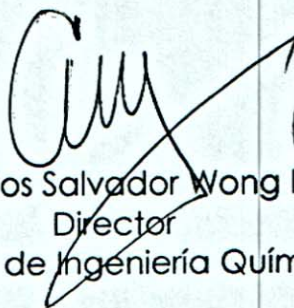




Ref.EIQ.TG.027.2017

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, **JOSÉ BENJAMÍN CANCINOS FLORES** titulado: **"DISEÑO, MONTAJE E INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON UN CIRCUITO CERRADO DE AGUA DE ENFRIAMIENTO APLICADO A LOS EQUIPOS DE DESTILACIÓN DEL LABORATORIO DE FISICOQUÍMICA, ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA, FIUSAC"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, mayo 2017

Cc: Archivo
CSWD/ale

Universidad de San Carlos
de Guatemala

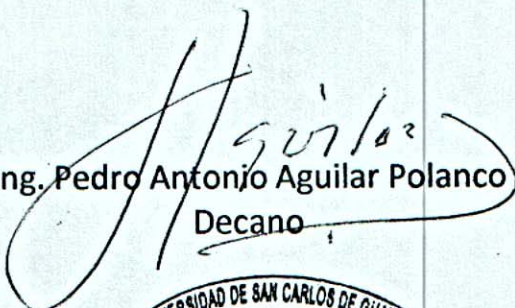


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 257.2017

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: **DISEÑO, MONTAJE E INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON UN CIRCUITO CERRADO DE AGUA DE ENFRIAMIENTO APLICADO A LOS EQUIPOS DE DESTILACIÓN DEL LABORATORIO DE FÍSICOQUÍMICA, ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA, FIUSAC**, presentado el estudiante universitario: **José Benjamín Cancinos Flores**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, mayo de 2017

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Mi madre	Aura Ester Flores de la Cruz, por su apoyo, su amor incondicional y su ejemplo que me han hecho ser la persona que soy.
Mis sobrinos	Erick Santiago y Katia Raquel Martínez Cancinos, por ser mi fuente de inspiración y mi motivación para seguir adelante.
Mis hermanas	Débora Abigaíl y Delmy Sarahí Cancinos Flores, por apoyarme y motivarme cuando más lo necesité.
El pueblo de Guatemala	Porque a pesar de las carencias de nuestro país, con sus contribuciones me brindaron la oportunidad de tener una formación superior.
Mi mejor amigo y su familia	José Carlos de la Cruz Flores, por ser mi confidente, mi compañero de aventuras y por la amistad tan valiosa y sincera que me brindaron él y su familia.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala

Por ser mi alma máter y por la formación superior que me permitió crecer tanto académica como personalmente.

Facultad de Ingeniería

Por aportar las herramientas y los recursos necesarios para llevar a cabo mis estudios universitarios.

Mi madre

Aura Ester Flores de la Cruz, por el esfuerzo que hizo para que yo pueda estar donde estoy.

Mis hermanas

Débora Abigaíl y Delmy Sarahí Cancinos Flores, por sus consejos y llamadas de atención que me sirvieron para mejorar como persona.

Señor José Luis de la Cruz

Por ser una influencia para bien y un ejemplo a seguir.

Mis amigos de la universidad

Por su amistad, por los momentos compartidos y porque sin ellos la “U” no habría sido tan genial.

Mis amigos del Departamento de Matemática

Porque en mi último año en la universidad fueron quienes compartieron las angustias y alegrías conmigo.

Ing. César Ariel Villela Rodas

Por brindarme la oportunidad de ser auxiliar del Departamento de Matemática y también por su apoyo como asesor de trabajo de graduación.

Ing. William Eduardo Fagiani Cruz

Por sus enseñanzas y por su colaboración como asesor de trabajo de graduación.

Ing. Arturo Samayoa

Por confiar en mí para cumplir las funciones de auxiliar en el Departamento de Matemática.

Inga. Ana Rufina Herrera Soto

Por la ayuda brindada durante la fase experimental del trabajo de graduación.

Fundación Roberto Rocca

Por la beca universitaria que me otorgaron y que me fue de gran ayuda.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
Hipótesis	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Fundamentos de termodinámica	5
2.1.1. Equilibrio termodinámico	6
2.1.2. Primera ley de la termodinámica	6
2.1.3. Segunda ley de la termodinámica.....	9
2.1.4. Tercera ley de la termodinámica.....	10
2.1.5. Ley cero de la termodinámica.....	10
2.2. Transferencia de calor	11
2.2.1. Conducción.....	12
2.2.2. Radiación.....	12
2.2.3. Convección	13
2.2.4. Intercambiadores de calor	14
2.2.4.1. Diferencia de temperatura	
logarítmica media	15
2.2.5. Ecuación de transferencia de calor.....	16

2.3.	Ciclos de refrigeración.....	17
2.3.1.	Ciclo de Carnot invertido	17
2.3.2.	Ciclo de refrigeración por compresión	18
2.3.3.	Ciclo de refrigeración por absorción	19
2.4.	Refrigerantes.....	20
2.4.1.	Propiedades requeridas de un refrigerante	21
2.4.2.	Refrigerantes comunes	22
2.5.	Destilación.....	22
2.5.1.	Tipos de destilación.....	23
2.5.1.1.	Destilación simple	23
2.5.1.2.	Destilación flash	23
2.5.1.3.	Destilación fraccionada	24
2.5.1.4.	Destilación por arrastre de vapor	24
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	25
3.1.	Variables	25
3.1.1.	Variables independientes	25
3.1.2.	Variables dependientes	25
3.1.3.	Variables de control.....	26
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	27
3.3.	Recursos humanos disponibles	28
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	28
3.4.1.	Equipo	28
3.4.2.	Cristalería	29
3.4.3.	Reactivos.....	29
3.5.	Técnica cuantitativa.....	29
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	29
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	31

3.7.1.	Plan de análisis de los resultados.....	32
3.7.1.1.	Métodos y modelos de los datos según el tipo de variables	32
3.7.1.2.	Programas a utilizar para análisis de datos.....	32
3.8.	Análisis estadístico	33
3.8.1.	Media aritmética	33
3.8.2.	Error de precisión	33
3.8.3.	Error de incertidumbre	34
3.8.4.	Error de exactitud	34
3.8.5.	Número de repeticiones recomendadas	34
3.8.6.	Análisis de varianzas (ANOVA)	34
4.	RESULTADOS	37
4.1.	Diseño del equipo de refrigeración	37
4.2.	Curvas de enfriamiento del agua refrigerada para diferentes caudales	38
4.3.	Curvas de enfriamiento para diferente sensibilidad del termostato.....	39
4.4.	Curvas de enfriamiento para diferentes arreglos de flujos.....	40
4.5.	Flujos de calor transferido en las operaciones de destilación	41
4.5.1.	Análisis de varianza de un factor para la comparación entre utilizar agua a temperatura ambiente y agua fría	42
4.6.	Resultados de errores	42
4.7.	Estimación del ahorro monetario obtenido por la implementación del sistema de refrigeración.....	42

5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	45
5.1.	Diseño del equipo	45
5.2.	Curvas de enfriamiento para distintos caudales.....	47
5.3.	Curvas de enfriamiento para diferente sensibilidad del termostato	47
5.4.	Curvas de enfriamiento para diferentes arreglos de flujos	48
5.5.	Flujos de calor transferido en las operaciones de destilación	48
5.5.1.	Análisis de varianza de un factor para la comparación entre utilizar agua a temperatura ambiente y agua fría.....	49
5.6.	Resultados de errores	49
5.7.	Estimación del ahorro monetario obtenido por la implementación del sistema de refrigeración	50
	CONCLUSIONES	51
	RECOMENDACIONES	53
	BIBLIOGRAFÍA.....	55
	APÉNDICES.....	57
	ANEXOS.....	73

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Perfiles de flujo en intercambiadores de calor.....	15
2. Representación del ciclo de Carnot invertido	17
3. Diagrama del ciclo de refrigeración	18
4. Diagrama T-S del ciclo de refrigeración por compresión	19
5. Ciclo de refrigeración por absorción amoníaco/agua	20
6. Gradiente de enfriamiento en función del tiempo para distintos caudales	38
7. Gradiente de enfriamiento en función del tiempo para distinta sensibilidad del termostato	39
8. Gradiente de enfriamiento en función del tiempo para distintos arreglos de flujos	40

TABLAS

I. Variables independientes.....	25
II. Variables dependientes	26
III. Variables de control	26
IV. Datos obtenidos para las curvas de enfriamiento	31
V. Datos obtenidos para la destilación	31
VI. Datos calculados.....	32
VII. Criterios considerados para el diseño del equipo	37
VIII. Dimensiones para el tubo de cobre del evaporador.....	38
IX. Descripción de curvas de enfriamiento de la figura 6	39

X. Descripción de curvas de enfriamiento de la figura 7	40
XI. Descripción de curvas de enfriamiento de la figura 8	41
XII. Flujo de calor transferido durante la destilación	41
XIII. Análisis de varianza de un factor	42
XIV. Errores para el flujo de calor transferido durante la destilación	42
XV. Costos anuales en quetzales.....	43

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A_{TDC}	Área de transferencia de calor [m^2]
$\dot{Q}$	Calor transferido por unidad de tiempo [W]
ΔU	Cambio de la energía interna de un sistema [J]
ΔE	Cambio de la energía total de un sistema [J]
dS	Cantidad infinitesimal de entropía [J/K]
dx	Cantidad infinitesimal de longitud [m]
dT	Cantidad infinitesimal de temperatura [$^{\circ}C$]
cm	Centímetros, unidades de longitud
h_c	Coeficiente convectivo de transferencia de calor [$W/m^2 \cdot K$]
R^2	Coeficiente de correlación de Pearson
CV	Coeficiente de variación, error de precisión [%]
U	Coeficiente global de transferencia de calor [W/m^2K]
k	Conductividad térmica [$W/K \cdot m$]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann [$W/m^2 \cdot K^4$]
P_{ot}	Consumo de potencia de los equipos [W]
C_A	Costo del consumo de agua [GTQ]
C_{EE}	Costo del consumo de energía eléctrica [GTQ]
D_E	Dato experimental
D_T	Dato teórico
σ_{est}	Desviación estándar
Δx	Diferencia de longitud, incerteza eje x

ΔT_{LM}	Diferencia de temperatura logarítmica media [°C]
ΔT_A	Diferencia de temperaturas según perfil [°C]
ΔT_B	Diferencia de temperaturas según perfil [°C]
ε	Emisividad de una superficie
e_k	Energía cinética por unidad de masa [J/kg]
u	Energía interna por unidad de masa [J/kg]
e_p	Energía potencial por unidad de masa [J/kg]
e	Energía total por unidad de masa [J/kg]
h	Entalpía por unidad de masa [J/kg]
S	Entropía [J/K]
ε_{exc}	Error de exactitud
ε_{inc}	Error de incertidumbre
$\dot{Q}_{dest}$	Flujo de calor transferido durante destilación [W]
$\dot{Q}_{neta}$	Flujo de calor transferido por radiación [W]
$\dot{m}$	Flujo másico [kg/s]
$\dot{v}$	Flujo volumétrico, caudal [L/min]
°C	Grados centígrados, unidades de temperatura
°F	Grados Fahrenheit, unidades de temperatura
H_{a1}	Hipótesis alternativa
H_{01}	Hipótesis nula
h	Horas, unidad de tiempo
J	Joule, unidad de energía
K	Kelvin, unidad de temperatura
kg	Kilogramo, unidad de masa
kWh	Kilowatt hora, unidad de energía
$psig$	Libras por pulgada cuadrada, unidades de presión manométrica
L	Litros, unidad de volumen
l	Longitud [m]

<i>m</i>	Metros, unidad de longitud
<i>min</i>	Minutos, unidad de tiempo
GTQ	Moneda, quetzales de Guatemala
<i>n</i>	Número de repeticiones
F	Parámetro de Fisher
<i>Pa</i>	Pascales, unidades de presión
<i>pie</i>	Pie, unidad de longitud
%	Porcentaje
<i>pulg</i>	Pulgadas, unidad de longitud
<i>r</i>	Radio de un tubo [cm]
$\sum R$	Sumatoria de resistencias térmicas [<i>K/W</i>]
<i>Tar_e</i>	Tarifa de energía eléctrica [GTQ/kWh]
<i>Tar_a</i>	Tarifa del agua [GTQ/m ³]
T	Temperatura [°C]
<i>T_{EVAP}</i>	Temperatura de evaporación en ciclo [°C]
<i>T_{EV,C}</i>	Temperatura de evaporación en destilación [°C]
<i>T_{alr}</i>	Temperatura de los alrededores [°C]
<i>T_{REF}</i>	Temperatura del agua refrigerante en destilación [°C]
<i>T_E</i>	Temperatura del agua, entrada al evaporador [°C]
<i>T_S</i>	Temperatura del agua, salida del evaporador [°C]
<i>T_{COND}</i>	Temperatura del condensado [°C]
<i>T_{cuerpo}</i>	Temperatura del cuerpo radiante [°C]
<i>T_∞</i>	Temperatura del fluido lejos de la superficie [°C]
<i>T_{sup}</i>	Temperatura en la superficie [°C]
<i>T_A</i>	Temperatura sistema A [°C]
<i>T_B</i>	Temperatura sistema B [°C]
<i>T_C</i>	Temperatura sistema C [°C]
t	Tiempo [min]
BTU	Unidad térmica británica, unidades de energía

W

Watts, unidad de potencia

GLOSARIO

ANOVA	Análisis estadístico de varianzas para las medias.
Capa límite	Fenómeno fisicoquímico que ocurre en el flujo de fluidos cuando la capa infinitesimal que está en contacto con una superficie sólida se encuentra estática.
Capacidad frigorífica	Límite de energía que es posible extraer de un sistema refrigerado.
Ciclo termodinámico	Proceso en el que tras recorrer una trayectoria se vuelve al estado inicial.
Circuito cerrado	Sistema donde el fluido es recirculado indefinidamente.
Condensador	Intercambiador de calor donde ocurre un cambio de fase; en un ciclo de refrigeración, el calor es transferido al ambiente.
EEGSA	Siglas para Empresa Eléctrica de Guatemala, S.A.
EMPAGUA	Siglas para Empresa Municipal de Agua.

Entropía	Variable termodinámica que mide la parte de la energía no utilizable de un sistema para realizar trabajo.
Estrangulamiento	Reducción del área transversal de paso de un fluido.
Evaporador	Intercambiador de calor donde ocurre un cambio de fase. En un ciclo de refrigeración es el espacio de menor temperatura.
FIUSAC	Siglas para Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
Irradiar	Emitir energía mediante el mecanismo de radiación.
Operación unitaria	Operación fundamental que se repite en un proceso y a partir de la cual se modifica la condición de cierta cantidad de materia y energía.
QtiPlot	Programa informático utilizado para el análisis matemático de datos.
R134a	Gas refrigerante utilizado en el ciclo de refrigeración.
Vacío	Condición de baja presión, llegando a ser negativa respecto a la presión atmosférica.
Volatilidad	Tendencia de una sustancia a cambiar de fase hacia el estado gaseoso.

RESUMEN

Para solucionar el problema del consumo de agua en los sistemas de enfriamiento de la operación de destilación, en el Laboratorio de Fisicoquímica de la Escuela de Ingeniería Química, FIUSAC, se diseñó, construyó e instaló un sistema de refrigeración con circuito cerrado de agua de enfriamiento ya que el consumo anual del agua durante las prácticas que involucran esta operación es aproximadamente 58 m^3 y no es congruente con el sistema de gestión ambiental del Laboratorio de Fisicoquímica.

Al diseñar el equipo se partió de la restricción que imponía el compresor: la capacidad de refrigeración; es decir, la magnitud máxima de calor que se puede transferir con el equipo hacia los alrededores en el condensador y desde los alrededores hacia el equipo en el evaporador. Con la ecuación del flujo de transferencia de calor se determinó el área de transferencia de calor necesaria para el evaporador (espacio refrigerado) y la longitud del tubo de cobre que se utilizó. Luego se procedió a armar el equipo, colocando el tubo de cobre del evaporador dentro de una manguera para formar un intercambiador de calor de tubos concéntricos donde el refrigerante circula por el interior del tubo de cobre y el agua circula por el ánulo.

Posteriormente, se variaron, en forma sistemática, los parámetros de funcionamiento del equipo (rango de flujos, sensibilidad del termostato y configuración de flujos) con el fin de evaluar su incidencia en el desempeño. Con el funcionamiento óptimo establecido, el equipo se adaptó a la unidad de destilación del laboratorio para comparar el comportamiento de la transferencia de calor en la condensación durante la operación de destilación a diferentes

temperaturas. Utilizando primero agua refrigerada por el equipo y luego agua del grifo a temperatura ambiente, se hizo la comparación de la cantidad de flujo de calor transferido en cada caso, así como los costos de llevar a cabo los experimentos.

Se estimó que el área de transferencia de calor para el evaporador debía ser de $0,0402 \text{ m}^2$ y, por lo tanto, el tubo de cobre de $0,00635 \text{ m}$ ($\frac{1}{4}$ de pulgada) de diámetro debía tener una longitud de $1,10 \text{ m}$. Además, se necesitaron alrededor de 35 minutos para obtener un gradiente de enfriamiento de $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ operando con un flujo aproximado de 2 L/min funcionando a contracorriente. Por último, la magnitud del flujo de calor transferido durante la operación de destilación es de $40,33 \pm 12,75 \text{ W}$ cuando se utilizó agua del grifo y $151,02 \pm 14,42 \text{ W}$ cuando se utiliza el circuito cerrado de agua refrigerada, esto representa un ahorro anual aproximado de $342,24 \text{ GTQ}$, es decir un $94,73 \%$ en los costos de operación.

Mediante el análisis de varianza de un factor se determinó que sí existe un efecto significativo de la utilización de agua a diferentes temperaturas sobre la magnitud del flujo de calor transferido entre los fluidos involucrados en la operación de destilación, a un nivel de confianza del 95% .

OBJETIVOS

General

Diseñar, montar e instalar un sistema de refrigeración con un circuito cerrado de agua de enfriamiento aplicado a los equipos de destilación del Laboratorio de Fisicoquímica, Escuela de Ingeniería Química, FIUSAC.

Específicos

1. Elegir las variables independientes, dependientes y de control involucradas en el diseño y funcionamiento del sistema de refrigeración, considerando las restricciones y condiciones de operación.
2. Determinar el rango y configuración de flujos así como el nivel de sensibilidad del termostato con los cuales se obtiene un gradiente de enfriamiento de 15 °C en el menor tiempo de operación.
3. Comprobar si existe un aumento en la magnitud del flujo de calor transferido en la operación de destilación al utilizar agua refrigerada respecto a utilizar agua del grifo.
4. Estimar el ahorro monetario anual obtenido por la implementación del sistema de refrigeración respecto a la utilización de agua del grifo.
5. Elaborar un manual de operación acerca de la utilización del sistema de refrigeración con un enfoque didáctico.

Hipótesis

Hipótesis estadísticas

Hipótesis nulas

- H_{01} : no existe un efecto significativo de la utilización de agua a distintas temperaturas sobre la magnitud del flujo de calor transferido entre los fluidos involucrados en la operación de destilación, a un nivel de confianza del 95 %.

Hipótesis alternativas

- H_{a1} : sí existe un efecto significativo de la utilización de agua a distintas temperaturas sobre la magnitud del flujo de calor transferido entre los fluidos involucrados en la operación de destilación, a un nivel de confianza del 95 %.

INTRODUCCIÓN

El sistema de gestión ambiental del Laboratorio de Fisicoquímica, de la Escuela de Ingeniería Química, FIUSAC, prioriza el uso consciente del agua durante las prácticas. Específicamente, en las operaciones de destilación se utiliza una cantidad excesiva de agua que se va directo al desagüe. Con la implementación de un circuito cerrado de agua refrigerada se pretende disminuir el consumo de agua y darle un impulso mayor a la transferencia de calor durante la condensación de los vapores destilados.

La destilación es una operación unitaria de transferencia simultánea de masa y energía. Para que exista la transferencia de calor entre dos fluidos debe haber un gradiente térmico y entre mayor sea, mejor será la transferencia de calor. Por lo general, en un proceso de enfriamiento se utiliza agua a temperatura ambiente, pero también se puede utilizar agua refrigerada que aumenta la magnitud del flujo de calor transferido.

Para refrigerar el agua se hace uso de un ciclo de refrigeración por compresión, donde un compuesto químico orgánico cede su calor hacia el ambiente y extrae calor del sistema que se quiere refrigerar. El proceso de refrigeración consta de cuatro etapas: primero se cambia la presión del refrigerante mediante un compresor; luego, este se somete a un estrangulamiento a través de un capilar o una válvula; las partes del ciclo donde ocurre la transferencia de calor, desde el sistema al refrigerante y del refrigerante hacia el ambiente son: el evaporador y el condensador, respectivamente.

En el ciclo de refrigeración se puede evaluar el desempeño del sistema mediante la comparación de las curvas de enfriamiento generadas al manipular los parámetros de funcionamiento del equipo. La transferencia de calor entre el refrigerante y el agua y, posteriormente, entre el agua y el vapor en la destilación, dependen entonces de la magnitud del flujo másico de agua que se alimenta. En ese caso, también, incide en la magnitud de la transferencia de calor, la configuración de los flujos (paralelo o a contracorriente).

Anteriormente, en la Escuela de Ingeniería Química, FIUSAC, se han presentado trabajos de investigación relacionados con el diseño de equipos de refrigeración, pero ninguno ha sido orientado a la preservación del agua, en su mayoría se les ha dado un enfoque didáctico. Cabe destacar que los trabajos de graduación antes mencionados han sido descontinuados.

Por tal motivo, el presente trabajo de graduación plantea el diseño del equipo y la optimización de su funcionamiento, para obtener el mejor rendimiento posible que aproveche los recursos disponibles. Además, para la construcción del equipo de refrigeración se utilizarán partes del antiguo refrigerador del Laboratorio de Fisicoquímica (compresor, condensador, tubo capilar, termostato y deshumidificador), para evitar así que estos componentes se conviertan en desechos.

1. ANTECEDENTES

Anteriormente, se han implementado simulaciones e incluso prácticas para ejemplificar el ciclo de refrigeración dentro de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala; entre ellos se encuentran los siguientes trabajos de graduación:

En el año 2009, Guillervín Adolfo Macario Castro presentó su trabajo de graduación: *Diseño de la práctica simulada de refrigeración en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala*, en el cual propuso e implementó el diseño de una práctica a través de un software especializado llamado CoolPack, que simulaba el ciclo de refrigeración. La práctica se trabajó como cualquier otra, desarrollando y obteniendo la información experimental de la simulación a través de *CoolPack*.

Un año después, en 2010, Lizandro Danilo Hernández Girón presentó su trabajo de graduación: *Implementación de una práctica experimental de refrigeración por compresión en el Laboratorio de Ingeniería Química en un intercambiador de calor para agua por medio de gas R134a* en el cual se incluía tanto la simulación propuesta por Macario Castro un año antes así como el diseño de un equipo físico para realizar los experimentos correspondientes al ciclo de refrigeración. Entonces, se pudo hacer la comparación entre los resultados teóricos de la simulación y los resultados reales obtenidos mediante el equipo diseñado por Hernández Girón.

Respecto a los gases refrigerantes utilizados en los ciclos de refrigeración por compresión, se desarrolló el siguiente trabajo de graduación en la Escuela

de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala:

En el año 2004, Juan Carlos Ríos Hernández presentó su trabajo de graduación: *Diferencias entre sistemas de refrigeración que utilizan refrigerantes convencionales y los que utilizan refrigerantes ecológicos y análisis de la estructura molecular de los refrigerantes*. En este trabajo se determinó que los refrigerantes convencionales son, por lo general, utilizados en equipos antiguos y, por lo tanto, tienen fugas; esto provoca que los gases se escapen a la atmósfera y debido a su naturaleza química se vuelven una fuente de contaminación que contribuye al efecto invernadero. Se observó, también, que al utilizar refrigerantes ecológicos como el R134a, las presiones de trabajo eran más bajas, obteniéndose un mejor desempeño en la refrigeración. El único inconveniente para pasar de los refrigerantes convencionales a los ecológicos es que se necesita modificar los equipos.

Además de los anteriores, se han presentado otros trabajos de graduación dirigidos al diseño e implementación de circuitos cerrados de agua refrigerada. Entre ellos los siguientes:

En el año 2012, Francisco Javier Calzada Diffor y José Luis Martínez del Pozo presentaron su trabajo de graduación: *Diseño de un sistema industrial de enfriamiento con agua de refrigeración para un complejo industrial en Lima, Perú*, en este trabajo se propuso la implementación de un circuito cerrado de agua refrigerada como solución a las necesidades de una refinería de petróleo ubicada en Lima, Perú, que estaba por incrementar su capacidad de producción. Para refrigerar el agua del circuito cerrado se diseñaron torres de refrigeración de tipo evaporativas.

Ese mismo año, Javier Hidalgo Manzano presentó su trabajo de graduación: *Diseño de sistema de refrigeración en ciclo cerrado*, en el cual se plantea la necesidad de un sistema de enfriamiento para una refinería de petróleo ubicada en Puertollano, España; en este trabajo se establecieron los parámetros más relevantes para el diseño del circuito de agua de enfriamiento y de la torre de refrigeración, de igual manera se estimaron los costos de operación y el monto de la inversión inicial requerida según la demanda energética de enfriamiento de la refinería.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Fundamentos de termodinámica

La termodinámica es la rama de la ciencia que se dedica al estudio y comprensión de los fenómenos relacionados con la energía; sus formas, estados y transformaciones. Cabe destacar que la termodinámica trata con estados de equilibrio. En el amplio campo de estudio de la termodinámica se destacan, también, unos conceptos denominados leyes de la termodinámica que se describirán más adelante.

Para entender que es un estado de equilibrio, primero, se debe definir qué es un sistema y qué tipos de sistemas existen. Cuando se va a efectuar el análisis de cualquier cosa se establecen límites y se elige qué se va a analizar; específicamente, la región del espacio o la cantidad de materia que se ha elegido para llevar a cabo un análisis es lo que se define como un sistema. Todo lo que no es parte del sistema se considera como los alrededores; la superficie real o imaginaria que separa el sistema de los alrededores se conoce como frontera del sistema.

Cuando el sistema posee una cantidad de materia fija, el sistema es cerrado, aunque puede intercambiar energía con sus alrededores no intercambia materia; este sistema, también, es conocido como masa de control y su volumen no es necesariamente constante. Si el sistema posee una región del espacio fija y puede intercambiar materia y energía, entonces, se denomina sistema abierto o volumen de control. Un tercer tipo de sistema, donde no se intercambia ni materia ni energía, se conoce como sistema aislado.

2.1.1. Equilibrio termodinámico

Un estado de equilibrio es aquel donde todo está balanceado, es decir, no hay cambios de ningún tipo en el sistema cuando es aislado de su entorno. En la naturaleza existen varios tipos de equilibrio y para alcanzar el equilibrio termodinámico es necesario satisfacer las condiciones de todos los tipos de equilibrio: mecánico, térmico, de fases y químico.

El equilibrio térmico se da cuando la temperatura es homogénea en todo el sistema, esto implica que no existe ningún gradiente de temperatura que provoque cambios. Por otra parte, si las presiones en un sistema no cambian a través del tiempo, se puede decir que está en equilibrio mecánico. Las presiones dentro del sistema pueden ser diferentes y aun así estar en equilibrio, por ejemplo, en un recipiente con agua la presión en la superficie no es la misma que en el fondo, pero estas presiones se mantienen constantes.

El equilibrio de fases se logra cuando coexisten dos fases en un mismo sistema pero sus masas no cambian. Por último, el equilibrio químico se obtiene cuando la composición química del sistema no cambia en el tiempo, es decir, no ocurre ninguna reacción química en su interior.

2.1.2. Primera ley de la termodinámica

La primera ley de la termodinámica enuncia que la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma. Por ejemplo, cuando el motor de un automóvil hace combustión, la energía interna que posee el combustible se transforma en trabajo, que es otra forma de energía. También, durante esta combustión se produce un aumento de la temperatura, esto es la manifestación de la energía

que se transforma en calor. El balance de energía de un sistema permite definir la primera ley de la termodinámica de la siguiente manera:

$$\left(\begin{matrix} \text{Energía} \\ \text{que entra} \end{matrix} \right) - \left(\begin{matrix} \text{Energía} \\ \text{que sale} \end{matrix} \right) = \left(\begin{matrix} \text{Cambio de energía} \\ \text{en el sistema} \end{matrix} \right)$$

La energía total para un sistema compresible simple es la suma de su energía interna, su energía cinética y su energía potencial:

$$e = u + e_k + e_p$$

Considerando que la mayoría de sistemas son estacionarios, es decir, que no se mueven a ninguna velocidad ni cambian su altitud, se dice entonces que la energía total de un sistema es igual a la energía interna del mismo y, por lo tanto, el cambio total de la energía del sistema es:

$$\Delta E = \Delta U$$

Hasta ahora solo se ha considerado el balance de energía de un sistema cerrado o de masa de control. En un sistema abierto o de volumen de control se le debe sumar otra forma de energía al balance, esta corresponde a la energía que posee un fluido por el simple hecho de fluir. Para que la materia fluya es necesario aplicar un trabajo que es denominado trabajo o energía de flujo:

$$w_{flujo} = \Delta(Pv)$$

Para un fluido en movimiento, la energía total del sistema es:

$$e = u + Pv + e_k + e_p$$

En la expresión que está al lado derecho de la ecuación al agrupar la energía interna con la energía de flujo se obtiene la entalpía, que no es más que la energía asociada a las condiciones de presión y de volumen del sistema:

$$e = h + e_k + e_p$$

Con todo lo anterior se puede escribir una expresión para la razón de cambio de la energía en función del tiempo en un sistema abierto en estado estable. Un proceso de flujo estable es aquel donde sus propiedades no cambian a través del tiempo; aunque en diferentes puntos del volumen de control las propiedades sean distintas, las propiedades de cada punto se mantienen constantes. La razón de cambio es entonces:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{E}_{entra} - \dot{E}_{sale} = 0$$

Por lo tanto, la transferencia de energía que entra al sistema es igual a la transferencia de energía que sale del mismo. La energía puede ser transferida mediante la masa, el trabajo y el calor; dicho esto, el balance de energía queda de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_{entra} + \dot{W}_{entra} + \dot{m}e_{entra} = \dot{Q}_{sale} + \dot{W}_{sale} + \dot{m}e_{sale}$$

Debido a que el calor y el trabajo no son variables de estado sino de trayectoria, se pueden agrupar del lado izquierdo de la ecuación:

$$\dot{Q} + \dot{W} = \dot{m}(e_{sale} - e_{entra})$$

Si el sistema es estacionario, entonces, se desprecia la energía cinética y la energía potencial, siendo la energía total del sistema únicamente la entalpía. Además, el flujo másico es constante porque el sistema es de estado estable, entonces, se puede dividir toda la ecuación del balance dentro del flujo másico; de esa manera se obtiene un balance de energía simplificado:

$$q + w = h_{sale} - h_{entra}$$

2.1.3. Segunda ley de la termodinámica

El concepto de la segunda ley de la termodinámica surgió junto con las máquinas térmicas. Una máquina térmica consiste en la transferencia de calor desde un foco de temperatura alta hacia un foco de temperatura baja; en el proceso se genera energía útil en forma de trabajo. El problema con estas máquinas es que no todo el calor se convierte en trabajo, es decir, que la energía no solo tiene cantidad sino calidad. La energía de baja calidad no se puede convertir en trabajo, entonces, la entropía es una medida de cuánta energía de baja calidad tiene un sistema.

La segunda ley de la termodinámica manifiesta que un sistema siempre tiende a aumentar su entropía conforme se aproxima al equilibrio. Dado un sistema con un estado de energía inicial, que no está en equilibrio, a lo largo del tiempo prevalecerá el estado de energía que maximice la entropía, dado que la entropía es una medida del desorden de las partículas: a mayor entropía mayor desorden. Se dice, entonces, que la entropía máxima de un sistema se alcanza al llegar al equilibrio.

Partiendo de otra definición de entropía, según la cual esta es la cantidad de energía no aprovechable, la segunda ley de la termodinámica expresa que

mientras más cerca del equilibrio se esté, menos energía útil se tiene. La expresión matemática de esta ley es la siguiente:

$$dS \geq 0$$

Esto explica por qué un café caliente se enfría si se deja al ambiente, pero un café a temperatura ambiente jamás se va a calentar extrayendo calor de los alrededores. Simplemente, el café a temperatura ambiente tiene una entropía muy alta y, por lo tanto, la calidad de su energía es baja. Esto, además, implica que la energía fluye en un sentido: desde el estado de energía de alta calidad hacia el estado de energía de baja calidad.

2.1.4. Tercera ley de la termodinámica

Esta ley aunque es poco conocida es importantísima, ya que permite el establecimiento de una escala absoluta de temperatura. Según la tercera ley de la termodinámica, es imposible alcanzar el cero absoluto porque en ese estado todo proceso físico se detiene, es decir, que la entropía es mínima y tiende a ser nula. Por lo tanto, en el universo existente todo tiene una temperatura por encima del cero y, por consiguiente, todo lo que existe posee energía interna. En términos matemáticos esta ley se define como:

$$\lim_{T \rightarrow 0K} S = 0$$

2.1.5. Ley cero de la termodinámica

Si dos sistemas interactúan con un tercero, cada uno por separado, y ambos están en equilibrio térmico con ese tercer sistema, la ley cero establece

que los dos primeros sistemas están en equilibrio térmico entre sí. Matemáticamente esta ley se puede expresar como:

$$\text{si } T_A = T_C \text{ \& } T_B = T_C$$

Entonces:

$$T_A = T_B$$

Se le conoce como ley cero porque es una ley tan obvia que debía preceder a las otras existentes, aun cuando fue planteada mucho después. No se debe confundir equilibrio térmico con equilibrio termodinámico: el equilibrio térmico solo implica el equilibrio de las temperaturas mientras el equilibrio termodinámico incluye todos los equilibrios existentes.

2.2. Transferencia de calor

La transferencia de calor tiene sus fundamentos en las leyes de la termodinámica puesto que ocurre entre dos sistemas con estados de energía diferentes. Un sistema gana energía mientras el otro la pierde; aquí se cumple la primera ley de la termodinámica porque no se está creando ni destruyendo energía sino solo se transfiere de un sistema hacia el otro.

De la segunda ley de la termodinámica se conoce que un sistema siempre tiende a un estado de entropía máxima, esto implica que para que exista la transferencia de calor debe haber una diferencia de temperaturas porque si los dos sistemas en cuestión tuvieran la misma temperatura, estarían en equilibrio, siendo su entropía máxima y la energía útil que se puede transferir casi nula. Además, la transferencia siempre ocurre desde el sistema con mayor temperatura hacia el de menor temperatura.

Existen tres mecanismos de transferencia de calor, en la vida real lo común es que la transferencia ocurra mediante los tres mecanismos en simultáneo aunque uno en mayor grado que los otros. Los mecanismos de transferencia de calor se describen a continuación.

2.2.1. Conducción

Este mecanismo de transferencia de calor funciona entre partículas adyacentes. Una partícula con un nivel de energía alto transfiere su energía a las partículas que se encuentren cerca de ella mediante vibración, pero la partícula nunca cambiará de posición. Por lo general, la conducción ocurre en sistemas en estado sólido y los metales son buenos conductores.

El modelo matemático que describe el mecanismo de transferencia de calor por conducción se conoce como ley de Fourier y se muestra a continuación:

$$\dot{Q} = kA_{TDC} \frac{dT}{dx}$$

2.2.2. Radiación

La radiación es el mecanismo de transferencia de calor que no necesita de un medio para propagarse y es más efectiva en el vacío perfecto. Un cuerpo emite energía en forma de radiación en todas las direcciones debido a la temperatura que posee, pero al mismo tiempo absorbe energía radiante de su alrededor porque de otra manera irradiaría toda su energía y llegaría al cero absoluto, lo cual es imposible según la tercera ley de la termodinámica.

Un ejemplo de radiación es la energía del sol que llega a la tierra a través del espacio donde hay vacío. La transferencia de calor por radiación depende también de la emisividad que es una propiedad radiactiva de la superficie del cuerpo. La ecuación que describe la transferencia de calor neta entre un cuerpo y sus alrededores es conocida como la ley de Stefan-Boltzmann y es la siguiente:

$$\dot{Q}_{neta} = \varepsilon \sigma A_{TDC} (T_{cuerpo}^4 - T_{alr}^4)$$

2.2.3. Convección

La convección es el mecanismo de transferencia de calor entre una superficie y un fluido adyacente. En este mecanismo, las partículas sí se mueven, y la transferencia de calor no ocurre por vibración sino por los choques de las partículas en movimiento contra una superficie. Las partículas en movimiento no necesariamente deben ser las que tienen un nivel de energía alto, puede ser al contrario.

En este mecanismo se pueden distinguir dos tipos: la convección natural y la convección forzada. La convección natural ocurre cuando el fluido se calienta o se enfría y cambia su densidad, por lo tanto, la diferencia de densidades entre la región en contacto con la superficie y el resto del fluido provoca el movimiento. Por otra parte, la convección forzada ocurre cuando el fluido se hace fluir agregándole energía mediante un dispositivo mecánico como una bomba o un ventilador. La ecuación que describe el mecanismo de transferencia de calor entre un fluido y una superficie es conocida como ley de Newton. Esta ecuación es:

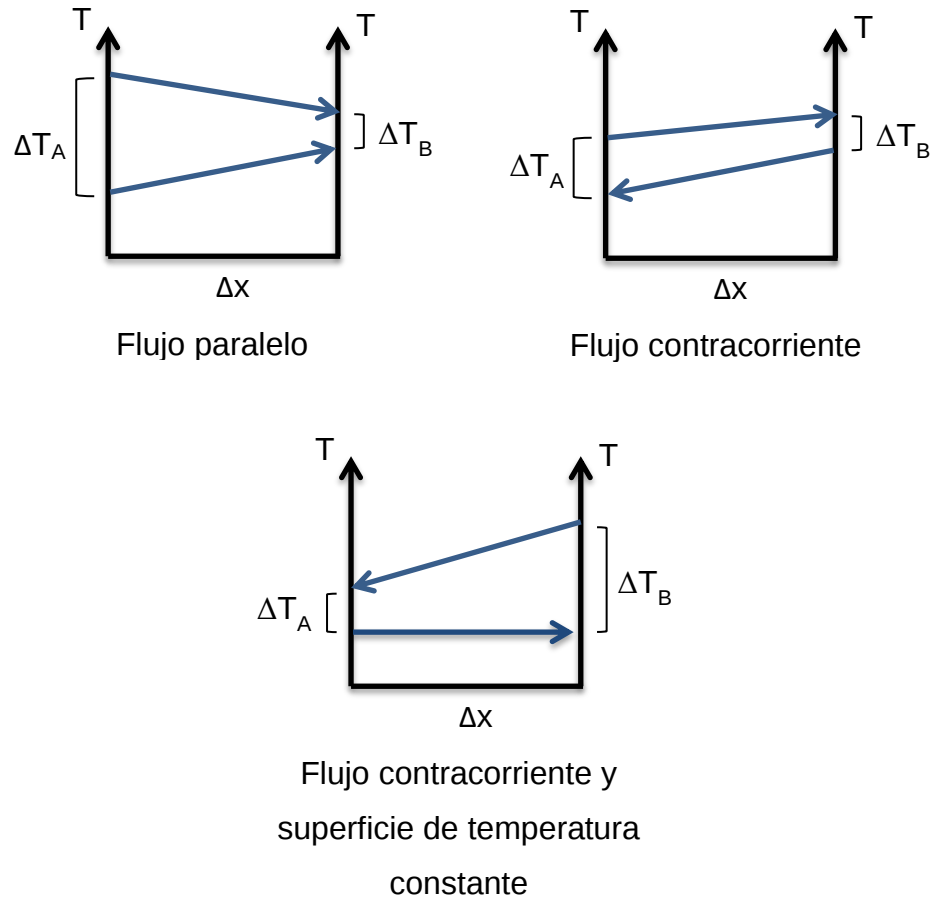
$$\dot{Q} = h_c A_{TDC} (T_{sup} - T_{\infty})$$

2.2.4. Intercambiadores de calor

Un intercambiador de calor es un equipo donde ocurre la transferencia de calor sin mezclar los fluidos; si los fluidos se mezclaran sería un mezclador. En los intercambiadores de calor el mecanismo de transferencia de calor predominante es la convección ya que por lo general ambos fluidos son movidos ya sea por bombas o por convección natural. También, se presenta la conducción a lo largo de la superficie que separa a los fluidos, además, existe conducción entre la superficie del intercambiador y la capa límite de los fluidos porque en la capa límite la velocidad del fluido es cero, es decir, permanece estática. El mecanismo de radiación ocurre en una cantidad que es insignificante.

Existen diferentes tipos de intercambiadores de calor: de tubos concéntricos, de coraza tubo y de placas. Se pueden clasificar también de acuerdo al arreglo de flujos: en paralelo, a contracorriente y de flujo cruzado. El comportamiento de la temperatura de los fluidos en un intercambiador de calor se describe mediante gráficas conocidas como perfiles. A continuación se muestran los perfiles más comunes.

Figura 1. **Perfiles de flujo en intercambiadores de calor**



Fuente: elaboración propia.

2.2.4.1. **Diferencia de temperatura logarítmica media**

Si en los perfiles se trazara una línea vertical que dividiera en dos el área comprendida entre las curvas correspondientes a los fluidos, de manera que las dos áreas tuvieran la misma magnitud, el valor de esa recta vertical sería aproximadamente la diferencia de temperatura logarítmica media.

En la transferencia de calor, la diferencia de temperatura logarítmica media es el gradiente de temperatura que impulsa la transferencia. Esta diferencia se define como:

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_A - \Delta T_B}{\ln\left(\frac{\Delta T_A}{\Delta T_B}\right)}$$

2.2.5. Ecuación de transferencia de calor

Existe una ecuación que relaciona los tres mecanismos de transferencia con la diferencia de temperatura logarítmica media y el área de transferencia de calor. Antes es necesario definir el coeficiente global de transferencia de calor que se expresa como:

$$U = \frac{1}{\sum R}$$

El coeficiente global de transferencia de calor es el inverso de todas las resistencias: conducción, radiación, convección y ensuciamiento. Este coeficiente depende de los fluidos implicados, la magnitud de los flujos, el sentido en el que fluyen y el tipo de intercambiador de calor que se utiliza. La ecuación de transferencia de calor es entonces:

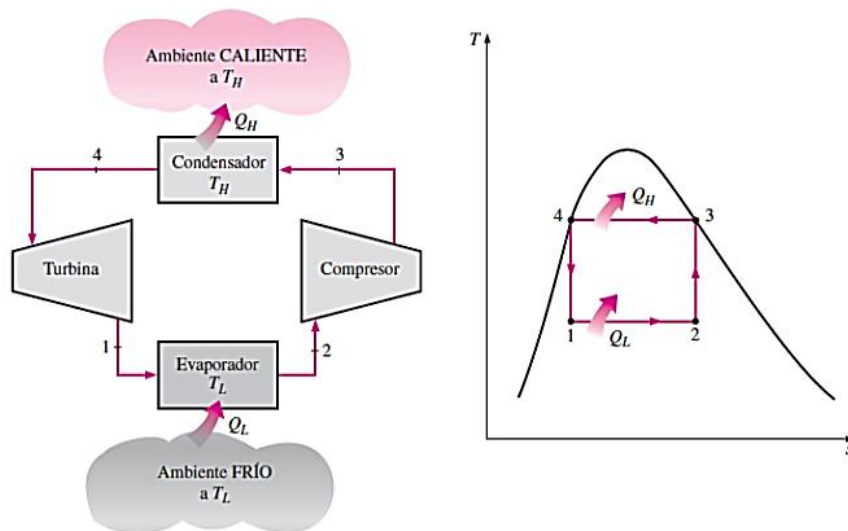
$$\dot{Q} = UA_{TDC}\Delta T_{LM}$$

2.3. Ciclos de refrigeración

2.3.1. Ciclo de Carnot invertido

Al igual que el ciclo de Carnot, el ciclo invertido consta de un compresor, una turbina y dos intercambiadores de calor (evaporador y condensador). El espacio refrigerado está en el evaporador como se muestra en la siguiente figura.

Figura 2. Representación del ciclo de Carnot invertido



Fuente: CENGEL, Yunus. *Termodinámica*. p. 609.

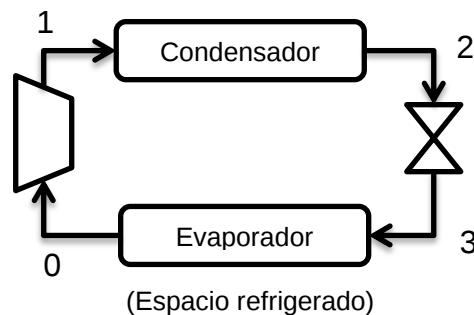
El ciclo de Carnot invertido es más un ciclo teórico con el cual se comparan los demás ciclos de refrigeración para medir su desempeño, esto porque su implementación en la vida real requiere de equipos trabajando en condiciones desfavorables.

2.3.2. Ciclo de refrigeración por compresión

Un ciclo termodinámico, por lo general, se utiliza para generar trabajo a partir de la transformación de la energía interna de un fluido. En el ciclo de refrigeración ocurre lo opuesto, se aplica un trabajo para obtener una transferencia de calor. Este ciclo consta de cuatro etapas: compresión, condensación, estrangulamiento y evaporación del fluido refrigerante.

El compresor convierte el trabajo mecánico en un aumento de presión que comprime el fluido; al pasar al condensador el fluido intercambia temperatura con el ambiente puesto que pasa de una temperatura alta a una temperatura baja. Durante el estrangulamiento el volumen del fluido cambia drásticamente ya que pasa de ser un vapor de gran volumen a un líquido de volumen menor. Por último, el fluido empieza a evaporarse a una temperatura menor que la del ambiente, acá es donde se transfiere calor desde el ambiente hacia el fluido y es donde ocurre la refrigeración. En la siguiente figura se presenta un diagrama de los componentes y etapas del ciclo de refrigeración por compresión.

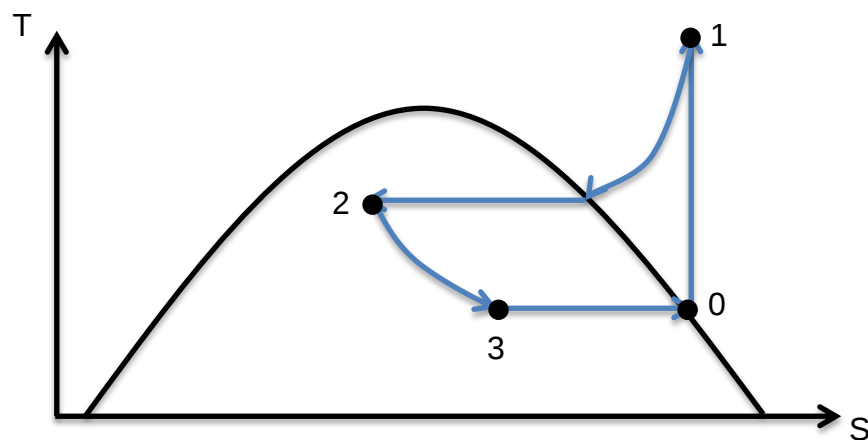
Figura 3. Diagrama del ciclo de refrigeración



Fuente: elaboración propia.

También, es útil conocer el diagrama de temperatura en función de la entropía del ciclo puesto que en este diagrama se observa de una forma analítica las transformaciones de energía y los cambios de estado que sufre el fluido. A continuación, se presenta el diagrama T-S del ciclo de refrigeración por compresión.

Figura 4. **Diagrama T-S del ciclo de refrigeración por compresión**



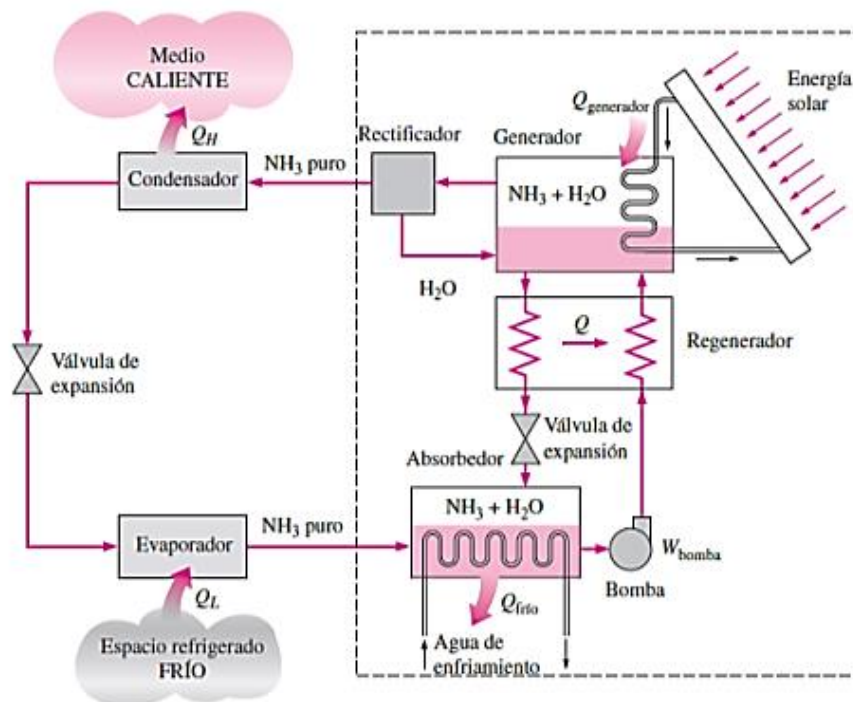
Fuente: elaboración propia.

2.3.3. Ciclo de refrigeración por absorción

Como su nombre lo indica, la refrigeración ocurre mediante la absorción de un refrigerante por un medio de transporte. El sistema amoníaco/agua es el más común en este tipo de ciclo; su funcionamiento se basa en la reacción que da lugar a la formación de amoníaco hidratado que es una reacción exotérmica. Este ciclo es básicamente lo mismo que el ciclo de refrigeración por compresión con la diferencia que el compresor es sustituido por un complicado sistema de absorción donde se aprovecha la energía de fuentes alternativas como la energía solar.

En la siguiente figura se puede observar el esquema del ciclo de refrigeración por absorción de un sistema amoníaco/agua.

Figura 5. **Ciclo de refrigeración por absorción amoníaco/agua**



Fuente: CENGEL, Yunus. *Termodinámica*. p. 632.

2.4. Refrigerantes

En términos generales, un refrigerante es cualquier cuerpo o sustancia que extrae calor de otro disminuyendo su temperatura. En lo que respecta a los ciclos termodinámicos el refrigerante es el fluido de trabajo encargado de ceder y extraer calor hacia los alrededores, mientras se condensa y evapora respectivamente.

Un buen refrigerante debe tener propiedades físicas, químicas y termodinámicas que ofrezcan un buen desempeño en cuestiones de seguridad y que al mismo tiempo sea económico de implementar.

2.4.1. Propiedades requeridas de un refrigerante

En cuanto a seguridad se refiere, un buen refrigerante debe ser un fluido químicamente inerte que no sea inflamable, explosivo o tóxico. Estos requerimientos deben cumplirse tanto en estado puro como mezclado en cualquier proporción con aire. Además, no debe tener efectos desfavorables cuando esté en contacto con el aceite lubricante del compresor o con cualquier material utilizado en la construcción del equipo de refrigeración.

Para minimizar los costos de operación un buen refrigerante debe tener propiedades que disminuyan la potencia requerida para producir cierta cantidad de enfriamiento, o en otras palabras, que tenga un coeficiente de desempeño alto. Entre estas propiedades se encuentran la entalpía latente de vaporización, el volumen específico del vapor, la relación de compresión y la capacidad calorífica tanto en estado líquido como gaseoso.

Una entalpía latente de vaporización combinada con un volumen específico pequeño da como resultado el aumento del coeficiente de desempeño. Si, además, el refrigerante tiene una capacidad calorífica baja en estado líquido y alta en estado gaseoso y su relación de compresión es baja, entonces, se disminuye la potencia requerida. Por otra parte, también, es deseable que la presión del fluido en la evaporación esté muy por debajo de la presión atmosférica.

2.4.2. Refrigerantes comunes

Muchos refrigerantes han sido sacados del mercado debido a que por su naturaleza química contribuían enormemente al efecto invernadero. Las restricciones que se han impuesto con el fin de preservar el medio ambiente han llevado a la investigación y desarrollo de nuevos refrigerantes con menor impacto ambiental.

Actualmente, se utilizan gases compuestos por moléculas de carbono, hidrógeno y flúor. Este tipo de refrigerantes son denominados hidrofluorocarbonos y no tienen bromo ni cloro que son las moléculas que los vuelven dañinos para el medio ambiente. El más conocido es el R134a (tetrafluoroetano) y es ampliamente utilizado en aire acondicionado de autos, refrigeradores domésticos, enfriadores industriales y transporte de elementos refrigerados.

El refrigerante R404a tiene aplicaciones parecidas a las del R134a pero para implementarlo es necesario cambiar el tipo de aceite lubricante del compresor por poliolester y hacer las modificaciones al equipo de refrigeración que esto implica. Los refrigerantes R407c y R410a se deben utilizar específicamente en compresores modernos y que estén diseñados para este tipo de refrigerantes, se utilizan en enfriadores de mediana y alta potencia.

2.5. Destilación

La destilación es una operación unitaria de transferencia simultánea de calor y masa, su fundamento es el equilibrio líquido-vapor de dos sustancias con diferencias de volatilidades. Análogamente a la diferencia de temperatura logarítmica media que es el motor que impulsa la transferencia de calor, el

motor que impulsa la destilación es, en este caso, la diferencia de volatilidades. La volatilidad es una propiedad que está relacionada con la presión de vapor y, por lo tanto, con la temperatura de ebullición de las sustancias.

Al mezclar dos sustancias con volatilidades que distan lo suficiente, dependiendo de la composición de la mezcla en el equilibrio líquido vapor, la dos sustancias coexistirán en la fase gaseosa con diferentes composiciones; es, entonces, que se puede condensar una de las dos sustancias con el fin de separarlas o aumentar la pureza de una de ellas.

2.5.1. Tipos de destilación

2.5.1.1. Destilación simple

Es la destilación que comúnmente se lleva a cabo en los laboratorios, consiste en calentar una mezcla cuyas volatilidades difieren en gran magnitud y separarlas mediante la condensación del vapor que se genera. Un equipo de destilación simple consiste en un balón de dos o tres bocas, un condensador y una plancha o mechero para calentar la mezcla. Este tipo de destilación es útil para sustancias con puntos de ebullición mayores a los 30 °C y menores que 150 °C.

2.5.1.2. Destilación flash

Este es un tipo de destilación simple con la diferencia que se lleva a cabo a altas presiones con el fin de evitar que la mezcla hierva; la mezcla calentada luego se transporta a una columna con menor presión lo que provoca una expansión súbita (de allí que el nombre sea destilación flash); la sustancia más volátil se vaporiza instantáneamente y luego se condensa.

2.5.1.3. Destilación fraccionada

La destilación fraccionada es la que se utiliza en las torres de destilación y tiene la ventaja de que en cada etapa el soluto se va concentrando cada vez más. Este tipo de destilación parte de una mezcla de baja concentración y consiste en la destilación sucesiva de los vapores condensados en cada etapa.

2.5.1.4. Destilación por arrastre de vapor

Cuando se quiere separar dos sustancias que tienen volatilidades parecidas se utiliza una tercera sustancia que sea soluble en una e insoluble en la otra, de esta manera se consigue aumentar considerablemente el punto de ebullición de una de las dos sustancias y se procede a destilar.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

3.1.1. Variables independientes

Las variables independientes y sus respectivos equipos o accesorios mediante los cuales se pueden manipular son:

Tabla I. **Variables independientes**

Variable	Unidades	Equipos y accesorios (según apéndice 4)
Sensibilidad del termostato	No aplica	C-059
Flujo volumétrico de agua refrigerada	L/min	K-102
Configuración de flujos	Paralelo y contracorriente	E-157B
Masa de agua que se va a refrigerar	kg	ST-231

Fuente: elaboración propia.

3.1.2. Variables dependientes

Las variables dependientes y los equipos o accesorios donde se manifiestan los respectivos cambios son:

Tabla II. **Variables dependientes**

Variable	Unidades	Equipos y accesorios (según apéndice 4)
Área de transferencia de calor	m ²	E-157B
Longitud del tubo de cobre para el evaporador	m	E-157B
Diferencia de temperatura logarítmica media	°C	T-156A, T156-B y T-156C
Temperatura del agua refrigerada	°C	T-156A
Flujo de calor transferido durante la destilación	W	E-157B

Fuente: elaboración propia.

3.1.3. Variables de control

Las variables de control del sistema y sus equipos o accesorios asociados son:

Tabla III. **Variables de control**

Variable	Unidades	Equipos y accesorios (según apéndice 4)
Temperaturas en el ciclo de refrigeración	°C	T-156B
Presiones en el ciclo de refrigeración	Pa	M-169A, M-169B, M-169C y M-169D
Temperaturas en la operación de destilación	°C	T-156A y T-156C

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

El presente trabajo de graduación estuvo orientado al dimensionamiento y posterior elaboración de un sistema de refrigeración con recirculación que es utilizado en el sistema de destilación durante el proceso de enseñanza/aprendizaje en el Laboratorio de Fisicoquímica, de la Escuela de Ingeniería Química, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. El diseño del equipo consistió en determinar la dimensión del evaporador para optimizar el área de transferencia de calor entre el refrigerante y el agua de enfriamiento.

Cabe destacar que el equipo de refrigeración fue construido reutilizando los componentes útiles del antiguo refrigerador del Laboratorio de Fisicoquímica; entre los componentes que se utilizaron están: compresor, condensador, termostato, tubo capilar y deshumidificador. Se manipularon los parámetros de funcionamiento: sensibilidad del termostato, magnitud del flujo de agua refrigerada y dirección del flujo (paralelo o contracorriente) con el fin de evaluar su incidencia en el desempeño del sistema.

Para cada uno de los parámetros se eligió un rango en el que se pudieran manipular; de esa manera, el flujo se configuró desde uno hasta cuatro litros por minuto. La sensibilidad del termostato se configuró en tres estados diferentes y el arreglo de flujos se colocó en paralelo y contracorriente, cambiando de configuraciones en cada experimento. Por ejemplo, si el parámetro que se quería evaluar era la magnitud del flujo, los otros dos parámetros se colocaban en un estado fijo mientras el flujo volumétrico se iba cambiando en cada repetición.

3.3. Recursos humanos disponibles

Para el presente estudio se cuenta con el apoyo de las siguientes personas:

- José Benjamín Cancinos Flores: investigador
- Cesar Ariel Villela Rodas: asesor
- William Eduardo Fagiani Cruz: coasesor

3.4. Recursos materiales disponibles

3.4.1. Equipo

- Partes del antiguo refrigerador (compresor, condensador, tubo capilar, termostato y deshumidificador).
- Termómetros.
- Manómetros.
- Tubos de cobre (para condensador y evaporador).
- Aislante térmico.
- Disipador de calor.
- Base para colocar el equipo.
- Plancha eléctrica.
- Mangueras.
- Recipiente aislado térmicamente.
- Bomba sumergible.
- Computadora.
- Impresora.
- Equipo de protección personal (bata, botas y gafas de seguridad).

3.4.2. Cristalería

- Equipo de destilación
- Balón de destilación de tres bocas (24/40)

3.4.3. Reactivos

- Refrigerante R134a
- Etanol

3.5. Técnica cuantitativa

Se utilizará la técnica cuantitativa ya que se tomarán mediciones de la sensibilidad del termostato, flujos, temperatura y presión en todo el sistema de refrigeración con el fin de determinar los valores, también cuantitativos, de las variables dependientes.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Para llevar a cabo el dimensionamiento del equipo, se consideraron los datos teóricos y la capacidad frigorífica del compresor (anexos 1 y 2); de esa manera se obtuvo el área de transferencia de calor que debe tener el evaporador (equipo E-157B) del ciclo de refrigeración que estará en contacto con el agua. A partir del área de transferencia de calor se calculó la longitud del tubo de cobre que se utilizó en el evaporador del equipo.

Con el equipo ya dimensionado se procedió a su construcción; posteriormente, se probó si el equipo funcionaba correctamente antes de proceder a la parte de toma de datos.

Se procedió a variar sistemáticamente las condiciones de operación empezando por el flujo volumétrico mediante la válvula K-102, en un rango entre 1 y 4 L/min. De los datos obtenidos se determinó el flujo con el cual se obtenía un gradiente de enfriamiento de 15 °C en el agua del tanque ST-231 en el menor tiempo y luego se varió la sensibilidad del termostato (equipo C-059); al observar que el desempeño del equipo no cambiaba al manipular la sensibilidad del termostato, se decidió realizar el experimento solo con tres variaciones: sensibilidad mínima, máxima e intermedia.

Posteriormente, se cambió la configuración de flujos en el equipo E-157B; primero, se colocó el sentido del flujo a contracorriente con un flujo aproximado de 2 L/min en la válvula K-102 y se procedió a tomar los datos. Posteriormente, se repitió el experimento esta vez colocando los flujos en paralelo.

Con el flujo a contracorriente en el equipo E157B y con un flujo de 2 L/min en la válvula K-102 se procedió a adaptar el sistema al equipo de destilación del Laboratorio de Fisicoquímica, utilizando el agua de enfriamiento del equipo como refrigerante en el condensador. Para este experimento, se preparó una mezcla de 50 % de etanol y agua. Luego, se repitió utilizando agua del grifo como refrigerante en el condensador para comparar la diferencia entre utilizar agua fría y agua a temperatura ambiente. En ambos casos se tomaron las temperaturas correspondientes a la evaporación y condensación (equipos T-156A y T-156C) de la mezcla y se realizaron cinco repeticiones.

Las mediciones de temperaturas se realizaron con termómetros digitales, tomando y anotando las medidas a cada minuto a lo largo de una hora, tiempo durante el cual se consiguió el gradiente de enfriamiento de 15 °C en el agua del tanque ST-231. En la operación de destilación, también, se utilizaron

termómetros digitales y las mediciones fueron tomadas desde el instante en que se condensó la primera gota, minuto a minuto.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Los datos obtenidos se tabularon en tablas como la siguiente:

Tabla IV. Datos obtenidos para las curvas de enfriamiento

Parámetro manipulado	t [min]	T_E [°C]	T_S [°C]	T_{EVAP} [°C]
Magnitud	0			
	10			
	20			
	30			
	40			
	50			
	60			

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. Datos obtenidos para la destilación

Refrigerante	Repetición	$T_{EV,C}$ [°C]	T_{COND} [°C]	T_{REF} [°C]
Agua fría	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
Agua a temperatura ambiente	1			
	2			
	3			
	4			
	5			

Fuente: elaboración propia.

Los datos calculados se tabularon de la siguiente manera:

Tabla VI. **Datos calculados**

Refrigerante	Repetición	$\Delta T_{LM} [^{\circ}C]$	$Q_{dest} [W]$	$\varepsilon_{inc} [W]$
Agua fría	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
Agua a temperatura ambiente	1			
	2			
	3			
	4			
	5			

Fuente: elaboración propia.

3.7.1. Plan de análisis de los resultados

3.7.1.1. Métodos y modelos de los datos según el tipo de variables

Debido a que la técnica a utilizar es cuantitativa, el método debe ser cuantitativo. Se utilizó el análisis de varianzas para confirmar la hipótesis de que una variable tiene influencia sobre la otra y en el supuesto de que se confirme esta relación se procederá a realizar un modelo matemático que describa esa relación.

3.7.1.2. Programas a utilizar para análisis de datos

- Procesador de textos: como procesador y editor de textos

- Hoja electrónica de cálculo: para realizar cálculos, el ANOVA y las gráficas
- QtiPlot: para realizar el ajuste de datos a un modelo matemático

3.8. Análisis estadístico

3.8.1. Media aritmética

Para calcular los datos promedio y para calcular la desviación estándar se utilizará la media aritmética.

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$$

3.8.2. Error de precisión

Primero se calcula la desviación estándar:

$$\sigma_{EST} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\bar{x} - x_i)^2}{n - 1}}$$

El error de precisión es entonces:

$$CV = \frac{\sigma_{EST}}{\bar{x}} * 100 \%$$

3.8.3. Error de incertidumbre

Partiendo de diferenciales, se estimará el error de incertidumbre de la siguiente manera:

$$\varepsilon_{inc} = \frac{\Delta f(x_1, x_2, x_3 \dots x_n)}{f(x_1, x_2, x_3 \dots x_n)} * 100 \% = \left(\frac{1}{f} * \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| \Delta x_i \right) * 100 \%$$

3.8.4. Error de exactitud

El error de exactitud se determina según:

$$\varepsilon_{exc} = \left(\frac{|D_t - D_e|}{D_t} \right) * 100 \%$$

3.8.5. Número de repeticiones recomendadas

El número de repeticiones para un experimento, con un nivel de confianza del 95 % ($z_{\alpha/2} = 1.96$) y asumiendo que los datos se comportan en forma normal se determina de la siguiente manera:

$$n = \left(\frac{z_{\alpha/2} * \sigma}{\varepsilon} \right)^2$$

3.8.6. Análisis de varianzas (ANOVA)

Para verificar si existe variación entre las medias del calor transferido durante la destilación, cuando estos son agrupados según la potencia del compresor que les corresponde, se utilizará un análisis de varianzas (ANOVA).

Varianza de cada muestra:

$$S^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\bar{x} - x_i)^2}{n - 1}$$

Estimación interna de varianzas:

$$S_w^2 = \frac{S_1 + S_2 + \dots + S_k}{k}$$

Varianza de las medias muestrales:

$$S_{\bar{x}}^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(\bar{x}_j - \bar{\bar{x}})^2}{k - 1}$$

Parámetro F:

$$F = \frac{n * S_{\bar{x}}^2}{S_w^2}$$

Los grados de libertad son:

$$v_1 = k - 1$$

$$v_2 = k(n - 1)$$

Suponiendo que los datos se distribuyen en forma normal y con base en el nivel de confianza del estudio, se determina el valor crítico de F. Si el valor calculado de F es mayor que el valor crítico de F, se rechaza la hipótesis nula. La hipótesis nula en este caso sugiere que la variación de las medias entre un

nivel y otro no son significativas; por otra parte, la hipótesis alternativa sugiera que la variación de las medias entre un nivel y otro son significativas.

4. RESULTADOS

4.1. Diseño del equipo de refrigeración

Para diseñar el equipo de refrigeración se tomaron las siguientes consideraciones:

Tabla VII. Criterios considerados para el diseño del equipo

Variable	Magnitud
Capacidad frigorífica máxima del compresor	50 W
Temperatura anual promedio en la ciudad de Guatemala (INSIVUMEH)	20 °C
Temperatura del refrigerante en el evaporador	0 °C
Gradiente de disminución de la temperatura del agua refrigerada	15 °C
Tipo de intercambiador de calor para el evaporador	Tubos concéntricos
Coeficiente global de transferencia de calor para un sistema R134A/Agua	$100 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$
Diámetro de tubo de cobre para el evaporador	0,00635 m ($\frac{1}{4}$ pulg)

Fuente: elaboración propia.

Se calculó el área de transferencia de calor para el evaporador y la longitud del tubo de cobre, sobredimensionándolo en un factor del 10 %, se obtuvieron los siguientes resultados:

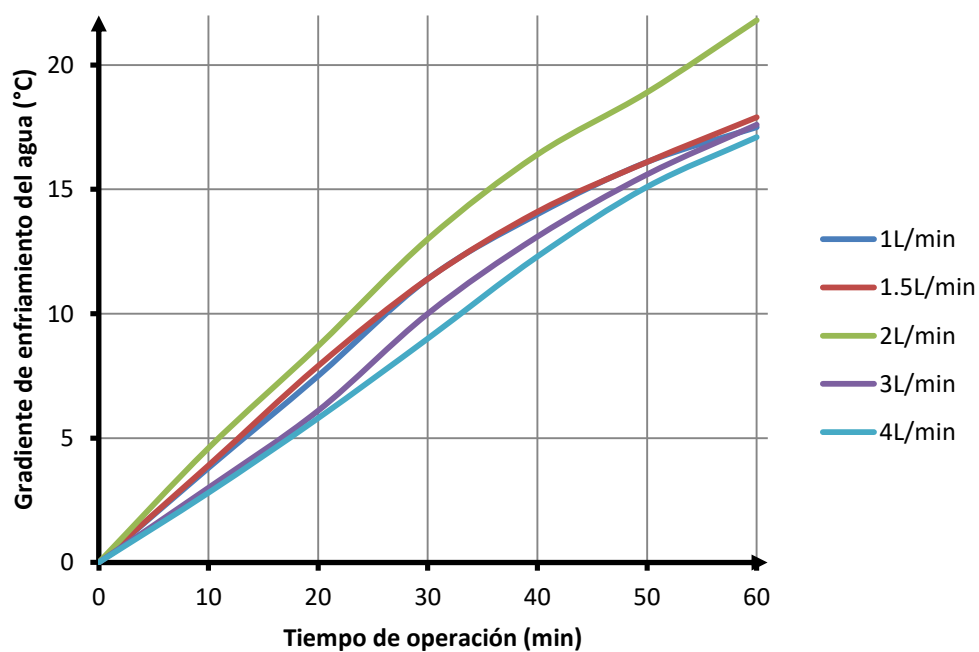
Tabla VIII. Dimensiones para el tubo de cobre del evaporador

Variable	Magnitud
Área de transferencia de calor	0,0402 m ²
Longitud del tubo	1,10 m

Fuente: elaboración propia.

4.2. Curvas de enfriamiento del agua refrigerada para diferentes caudales

Figura 6. Gradiente de enfriamiento en función del tiempo para distintos caudales



Fuente: elaboración propia.

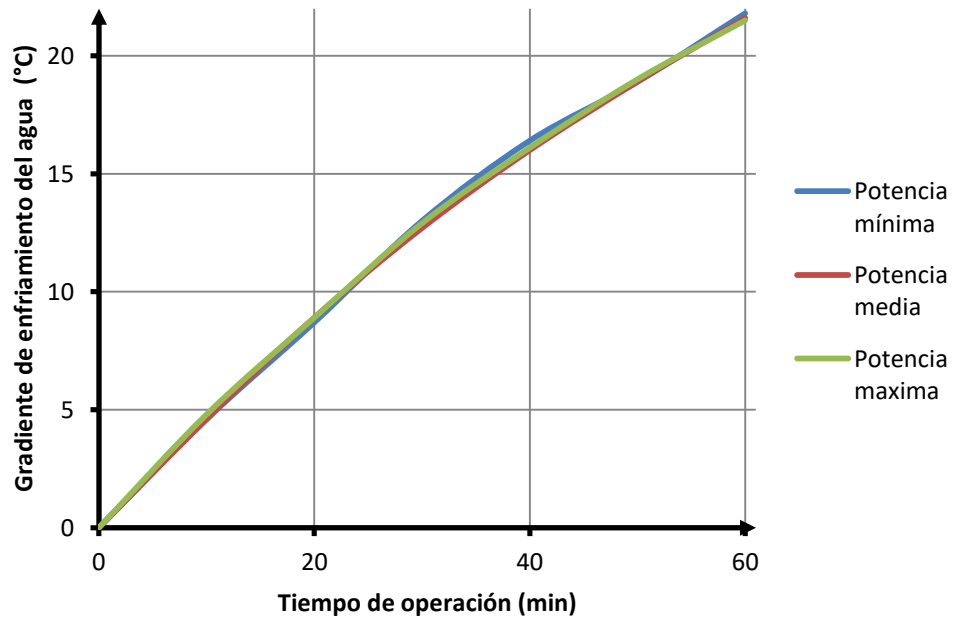
Tabla IX. Descripción de curvas de enfriamiento de la figura 6

$\dot{v}$ [L/min]	Color	Modelo	R ²	Δx [min]	Δy [°C]	Intervalo de validez
1	Blue	$f(t) = 20,32 \ln(0,024t + 1)$	0,9955	1	0,1	[0 - 60]
1,5	Red	$f(t) = 20,06 \ln(0,025t + 1)$	0,9977	1	0,1	[0 - 60]
2	Green	$f(t) = 33,02 \ln(0,016t + 1)$	0,9990	1	0,1	[0 - 60]
3	Purple	$f(t) = 56,89 \ln(0,006t + 1)$	0,9961	1	0,1	[0 - 60]
4	Cyan	$f(t) = 120,84 \ln(0,003t + 1)$	0,9975	1	0,1	[0 - 60]

Fuente: elaboración propia.

4.3. Curvas de enfriamiento para diferente sensibilidad del termostato

Figura 7. Gradiente de enfriamiento en función del tiempo para distinta sensibilidad del termostato



Fuente: elaboración propia.

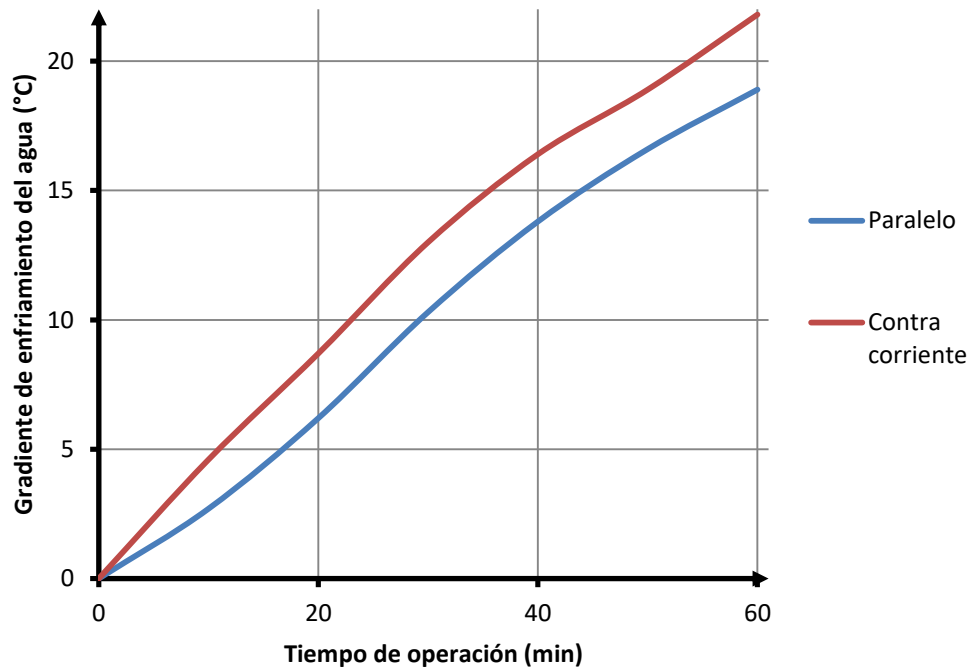
Tabla X. Descripción de curvas de enfriamiento de la figura 7

Sensibilidad termostato	Color	Modelo	R2	Δx [min]	Δy [°C]	Intervalo de validez
Mínima	Blue	$f(t) = 33,02 \ln(0,016t + 1)$	0,9990	1	0,1	[0 - 60]
Intermedia	Red	$f(t) = 32,39 \ln(0,016t + 1)$	0,9999	1	0,1	[0 - 60]
Máxima	Green	$f(t) = 29,53 \ln(0,018t + 1)$	0,9998	1	0,1	[0 - 60]

Fuente: elaboración propia.

4.4. Curvas de enfriamiento para diferentes arreglos de flujos

Figura 8. Gradiente de enfriamiento en función del tiempo para distintos arreglos de flujos



Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. Descripción de curvas de enfriamiento de la figura 8

Arreglo de flujos	Color	Modelo	R ²	Δx [min]	Δy [°C]	Intervalo de validez
Paralelo		$f(t) = 138,79 \ln(0,003t + 1)$	0,9949	1	0,1	[0 - 60]
Contracorriente		$f(t) = 33,02 \ln(0,016t + 1)$	0,9990	1	0,1	[0 - 60]

Fuente: elaboración propia.

4.5. Flujos de calor transferido en las operaciones de destilación

El equipo de refrigeración funcionando bajo los parámetros óptimos se adaptó a la destilación de una mezcla al 50 % de etanol y agua; se utilizó agua refrigerada y luego agua del grifo a temperatura ambiente para la condensación. De este experimento se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla XII. Flujo de calor transferido durante la destilación

Repetición No.	Agua del grifo		Agua refrigerada	
	Caudal [L/min]	Q_{dest} [W]	Caudal [L/min]	Q_{dest} [W]
1	5	39,13	2	152,86
2		39,13		151,21
3		39,55		152,26
4		43,94		150,81
5		39,90		147,98
Promedio	-	40,33	-	151,02

Fuente: elaboración propia.

4.5.1. Análisis de varianza de un factor para la comparación entre utilizar agua a temperatura ambiente y agua fría

Tabla XIII. Análisis de varianza de un factor

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	30632,79	1	30632,79	7927,84	2,825E-13	5,32
Dentro de los grupos	30,91	8	3,86			
Total	30663,70	9				

Fuente: elaboración propia.

4.6. Resultados de errores

Tabla XIV. Errores para el flujo de calor transferido durante la destilación

	CV [%]	ϵ_{inc} [%]	ϵ_{exc} [%]
Agua refrigerada	1,25	0,81	9,55
Agua del grifo	5,07	31,61	29,89

Fuente: elaboración propia.

4.7. Estimación del ahorro monetario obtenido por la implementación del sistema de refrigeración

En el experimento donde se utilizó el equipo de refrigeración, se tomó en cuenta el consumo eléctrico del compresor y de la bomba y el agua utilizada; por otra parte, cuando se utilizó agua del grifo solo se consideró el consumo de dicho fluido. La energía eléctrica de la plancha fue excluida del análisis ya que forma parte de ambos experimentos. El tiempo de operación estimado fue de 4 horas por práctica por un total de 48 prácticas en el año.

Tabla XV. **Costos anuales en quetzales**

	Tiempo de operación [h]	Consumo anual de recursos	Costos anuales [GTQ]
Agua del grifo	192	57,60 m ³ de agua	361,27
Agua refrigerada	192	17,28 kWh de energía eléctrica	19,02
Ahorro [GTQ]	342,24		
Ahorro [%]	94,73		

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Para la optimización del equipo, se puso en ejecución bajo diferentes condiciones; se manipuló el flujo de agua de enfriamiento, la sensibilidad del termostato y el arreglo de flujos. De esta manera, se obtuvieron las curvas de enfriamiento del equipo bajo las condiciones establecidas. También, se adaptó el equipo de refrigeración a un equipo de destilación, con el fin de comparar la magnitud del flujo de calor cedido en la operación, al utilizar agua enfriada respecto a utilizar agua a temperatura ambiente.

Por último, se determinó el costo en quetzales de llevar a cabo una práctica de destilación utilizando el equipo de refrigeración respecto a utilizar agua del grifo. A continuación se interpretan las gráficas y los resultados de los experimentos mencionados anteriormente.

5.1. Diseño del equipo

En la tabla VII se presentan los criterios de diseño considerados, entre estos, la capacidad frigorífica del compresor, dato obtenido de su ficha técnica. La capacidad frigorífica de 50 W es el parámetro que restringe la magnitud máxima del flujo de calor que puede transferir el equipo de refrigeración; este valor no depende de ninguna otra variable y es característico del tipo y tamaño del compresor.

Otro de los datos que se muestran en la tabla VII son las temperaturas ambiente y del refrigerante en el evaporador, así como el gradiente de enfriamiento. Se consideró la temperatura promedio de la ciudad de Guatemala

a 20 °C según datos del INSIVUMEH. La temperatura del refrigerante en el evaporador según su ficha técnica, puede estar entre -35 °C y -10 °C pero la temperatura mínima que alcanzaba el refrigerador del cual se extrajo el compresor era de 4 °C. Para simplificar los cálculos de diseño se asumió que el refrigerante en el evaporador podía llegar a 0 °C. Por último, se consideró que enfriar el agua en un gradiente de 15 °C sería suficiente para aumentar la magnitud del flujo de calor transferido en la operación de destilación.

Para refrigerar el agua, primero se propuso un intercambiador de calor de serpentín sumergible pero este presentaba el inconveniente de funcionar únicamente por convección natural, lo que hacía que la transferencia de calor fuera lenta, por lo cual se decidió utilizar un intercambiador de calor de tubos concéntricos. Para su elaboración se utilizó una manguera con el tubo de cobre del evaporador dentro de ella con dos “T” de cobre en los extremos para permitir el paso de agua entre la manguera y el tubo. Conociendo el tipo de intercambiador de calor a implementar y los fluidos a utilizar, se consultaron las fuentes bibliográficas para conocer el valor del coeficiente global de transferencia de calor correspondiente y se determinó que los valores típicos están entre 10 y 25 $BTU/h \cdot pie^2 \cdot ^\circ F$. De los datos anteriores se calculó el promedio y se hizo la conversión a unidades del sistema internacional; el coeficiente calculado es de aproximadamente $100 W/m^2 \cdot ^\circ C$.

Al consultar a un profesional de refrigeración acerca del diámetro del tubo de cobre para el evaporador, recomendó utilizar tubo de ¼ de pulgada que, según su experiencia, es el adecuado para la potencia del compresor.

Con los datos descritos en la tabla VII se procedió entonces a calcular el área de transferencia de calor con la ecuación $\dot{Q} = UA_{TDC} \Delta T_{LM}$. El área calculada fue de 0,0402 metros cuadrados; con las conversiones necesarias y

según el área superficial de un cilindro, se determinó que la longitud del tubo de cobre para el evaporador debía ser de 1,10 metros, sobredimensionándolo 10 % como factor de seguridad del diseño.

5.2. Curvas de enfriamiento para distintos caudales

En la figura 6 se observan las curvas de enfriamiento para caudales entre uno y cuatro litros por minuto. Entre las cinco curvas hay una que se destaca y es la que corresponde a un caudal de 2 L/min, ya que todas las demás curvas coinciden en un gradiente de enfriamiento de aproximadamente 17 °C mientras que la curva de 2 L/min sobrepasa los 20 °C. De esta comparación se estimó que el caudal con el cual el equipo tiene un mejor desempeño es con gran diferencia, alrededor de 2 L/min. El modelo matemático de esta curva es fiable debido a que tiene un coeficiente R^2 de 0,9990 el cual es muy cercano a uno e indica la correlación con los datos experimentales, con una validez entre 0 y 60 minutos.

5.3. Curvas de enfriamiento para diferente sensibilidad del termostato

Las curvas de enfriamiento mostradas en la figura 7 son casi idénticas, esto se puede observar tanto gráficamente como en sus modelos matemáticos, los cuales tienen coeficientes R^2 entre 0,9990 y 0,9999 que indican la gran correlación entre los modelos y los datos experimentales. Con base en estas curvas se determinó que la manipulación de la sensibilidad del termostato no cambia el gradiente térmico de enfriamiento y, por lo tanto, no incide en el desempeño del equipo, con una validez entre 0 y 60 minutos.

5.4. Curvas de enfriamiento para diferentes arreglos de flujos

El arreglo de flujos en un intercambiador de calor de tubos concéntricos solo puede ser configurado de dos maneras, en paralelo y a contracorriente. En la figura 8 se observa que el flujo a contracorriente le saca una diferencia al flujo en paralelo de aproximadamente 3 °C de gradiente de enfriamiento, diferencia que empieza desde los 10 minutos y se mantiene hasta los 60 minutos. Eso significa que al colocar el flujo en contracorriente se obtiene un mayor desempeño en el equipo. El modelo matemático tiene un coeficiente R^2 de 0,9990 que indica gran correlación entre los datos experimentales y el modelo, con una validez entre 0 y 60 minutos.

5.5. Flujos de calor transferido en las operaciones de destilación

Se adaptó el equipo de refrigeración, funcionando en contracorriente y con un flujo de 2 L/min para optimizar su funcionamiento, a un equipo de destilación del Laboratorio de Fisicoquímica, Escuela de Química, FIUSAC. La mezcla a destilar fue de 50 % de etanol y agua; primero se utilizó agua del grifo como refrigerante en el condensador del equipo de destilación, como se observa en la tabla XII, se obtuvo un flujo de calor transferido promedio de 40,33 W. Al utilizar el agua enfriada por el equipo de refrigeración como refrigerante se obtuvo un flujo de calor transferido de 151,02 W que triplica el valor obtenido con el uso de agua del grifo.

El hecho de que la transferencia de calor sea el triple cuando se utiliza el agua enfriada por el equipo de refrigeración significa que la mayoría del vapor que pasa por el condensador será recuperada; esta es una ventaja a la hora de analizar la composición del fluido condensado.

5.5.1. Análisis de varianza de un factor para la comparación entre utilizar agua a temperatura ambiente y agua fría

En el análisis de varianza de un factor mostrado en la tabla XIII, el valor F calculado fue de 7 927,84 siendo este mayor que su valor crítico de 5,32 por lo que se rechazó la hipótesis nula. Se determinó, entonces, que existe un efecto significativo de la utilización de agua refrigerada sobre la magnitud del flujo de calor transferido entre los fluidos involucrados en la operación de destilación, a un nivel de confianza del 95 %.

5.6. Resultados de errores

En la tabla XIV se muestran los porcentajes de error para la magnitud del flujo de calor transferido durante la destilación utilizando agua fría o agua a temperatura ambiente. En el caso del agua fría el error de precisión fue de 1,25 % lo que indica que los datos experimentales son cercanos entre sí, el error de incertidumbre es de 0,81 % lo que representa la fiabilidad de los instrumentos de medición y por último el error de exactitud fue de 9,55 %, el cual representa las pérdidas de calor hacia el ambiente y la cristalería.

En el caso del agua a temperatura ambiente el error de precisión fue de 5,07 %, es decir, los datos difieren entre sí pero aún en un margen aceptable. El error de incertidumbre fue de 31,61 % lo que significa que las mediciones no se efectuaron de la mejor manera posible. Por último, se obtuvo un error de exactitud de 29,89 % que también representa las pérdidas de calor; si se considera que estas pérdidas son de igual magnitud que al utilizar agua fría, se hace evidente que la proporción respecto al flujo de calor transferido utilizando agua a temperatura ambiente debería ser aproximadamente el triple que al utilizar agua fría que coincide con los errores obtenidos.

5.7. Estimación del ahorro monetario obtenido por la implementación del sistema de refrigeración

Al utilizar el equipo de refrigeración, ya que cuenta con circuito cerrado de agua de enfriamiento, no existe consumo de agua por lo que los mayores gastos económicos los representa la energía eléctrica que necesitan para funcionar tanto el compresor como la bomba de agua. Para calcular estos costos se consideraron las tarifas de EMPAGUA (6,27 GTQ/m³) y de EEGSA (1,10 GTQ/kWh) para el agua y energía eléctrica, respectivamente. Además, se consideró una duración de la práctica de 4 horas y se midió el caudal del laboratorio, resultando ser de 5 L/min.

Según se muestra en la tabla XV, el costo anual por el consumo de los respectivos recursos fue de 19,02 GTQ cuando se utilizó el equipo de refrigeración y 361,27 GTQ cuando se utilizó agua del grifo. Utilizar el equipo de refrigeración representa entonces un ahorro de 94,73 % respecto al costo de utilizar agua del grifo.

CONCLUSIONES

1. Considerando los criterios y restricciones de diseño, la longitud del tubo de cobre de 0,00635 m ($\frac{1}{4}$ de pulgada) de diámetro para el evaporador debe ser de 1,10 m con un factor de seguridad del diseño de 10 %.
2. Se obtiene un gradiente de enfriamiento de 15 °C en aproximadamente 35 minutos al configurar los flujos en contracorriente con un caudal de 2 L/min; por otra parte, manipular la sensibilidad del termostato del equipo de refrigeración no afecta su desempeño.
3. El flujo de calor transferido aumenta desde $40,33 \pm 12,75$ W hasta $151,02 \pm 14,42$ W con flujos volumétricos de 5 L/min de agua del grifo y 2 L/min de agua refrigerada, respectivamente, se obtiene mayor recuperación del vapor utilizando agua refrigerada, posiblemente, porque las pérdidas de calor son compensadas.
4. Con la implementación del sistema de refrigeración durante las operaciones de destilación en el Laboratorio de Fisicoquímica se ahorra aproximadamente 342,24 GTQ por año, lo que representa un 94,73 %.
5. Es posible darle un enfoque didáctico al manual de operación del equipo (incluido en el apéndice 5) porque el equipo posee instrumentos de medición que permiten monitorear y observar experimentalmente el ciclo de refrigeración por compresión.

RECOMENDACIONES

1. En un futuro cercano se podría aumentar la capacidad frigorífica del equipo cambiando el compresor por uno nuevo y de mayor potencia.
2. Antes de poner en marcha el compresor, dejar que el agua circule por el intercambiador de calor por lo menos durante un par de minutos para estabilizar las lecturas iniciales de los termómetros.
3. Para favorecer la convección dentro del depósito, procurar que la manguera de descarga quede por encima del nivel del agua.
4. La mayoría de accesorios del equipo son desmontables por lo tanto se recomienda adaptar solo los que se utilizarán.
5. Nunca se debe encender la bomba de agua si no está totalmente sumergida, ya que puede sufrir daños, según recomienda el fabricante.
6. Si se enfría un líquido que no sea agua, se debe calibrar el rotámetro.
7. Colocar las mangueras de manera que no se estrangulen ya que esto provoca que la bomba de agua no funcione correctamente.
8. No se debe encender el compresor si el agua en el intercambiador de calor no está fluyendo porque se corre el riesgo de que se congele.

BIBLIOGRAFÍA

1. CALZADA, Francisco Javier; MARTÍNEZ, José Luis. *Diseño de un sistema industrial de enfriamiento con agua de refrigeración para un complejo industrial en Lima, Perú*. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad Pontificia Comillas, 2012. 149 p.
2. ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. *Termodinámica*. 5a ed. México: McGraw-Hill, 2003. 988 p.
3. ÇENGEL, Yunus A. *Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico*. 3a ed. México: McGraw-Hill, 2007. 901 p.
4. DOSSAT, Roy J. *Principles of refrigeration*. New York: John Wiley & Sons, 1961. 544 p.
5. HERNÁNDEZ, Lizandro Danilo. *Implementación de una práctica experimental de refrigeración por compresión en el Laboratorio de Ingeniería Química en un intercambiador de calor para agua por medio de gas R134a*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2010. 167 p.
6. HIDALGO, Javier. *Diseño de sistema de refrigeración en ciclo cerrado*. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad Pontificia Comillas, 2012. 275 p.

7. KERN, Donald. Q. *Procesos de transferencia de calor*. 2a ed. México: C.E.C.S.A, 1986. 981 p.
8. MACARIO, Guillervín Adolfo. *Diseño de la práctica simulada de refrigeración en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2009. 95 p.
9. PERRY, Robert H. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 8a Ed. New York, EE.UU: McGraw-Hill, 2008. 2400 p.
10. SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C. *Introducción a la termodinámica en ingeniería química*. 6a ed. México: McGraw Hill, 2003. 837 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Metodología de cálculo

- Temperatura logarítmica media

La temperatura logarítmica media sirve para calcular el gradiente térmico que impulsa la transferencia de calor en intercambiadores.

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_A - \Delta T_B}{\ln \left(\frac{\Delta T_A}{\Delta T_B} \right)} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Ejemplo: temperatura logarítmica media en la condensación de la operación de destilación.

$$\Delta T_{LM} = \frac{(77,2^{\circ}\text{C} - 4^{\circ}\text{C}) - (16,3^{\circ}\text{C} - 4^{\circ}\text{C})}{\ln \left(\frac{77,2^{\circ}\text{C} - 4^{\circ}\text{C}}{16,3^{\circ}\text{C} - 4^{\circ}\text{C}} \right)}$$
$$\Delta T_{LM} = 34,14^{\circ}\text{C}$$

- Flujo de transferencia de calor

La ecuación utilizada para calcular la magnitud de la transferencia de calor es la siguiente:

$$\dot{Q} = UA_{TDC} \Delta T_{LM} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Ejemplo: transferencia de calor en la condensación de la destilación.

$$\dot{Q} = \left(475 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right) (0,009 m^2) (34,14 ^\circ C)$$

$$\dot{Q} = 152,86 W$$

- Longitud de tubo

Para calcular la longitud de un tubo para un intercambiador de calor se parte del área superficial del tubo, que será el área de transferencia de calor; además, se sobredimensionó en un factor de 10 % de seguridad del diseño.

$$l = \left(\frac{A_{TDC}}{2\pi r} \right) * 1.1 \quad (\text{Ecuación 3})$$

Ejemplo: longitud del tubo de cobre para el evaporador del equipo de refrigeración.

$$l = \left(\frac{0,0402 m^2}{2\pi(0,00635 m)} \right) * 1.1$$

$$l = 1,10 cm$$

- Costo de energía eléctrica

En el cálculo del costo del consumo de energía eléctrica del equipo se utilizó la siguiente ecuación.

$$C_{EE} = t \left(\frac{P_{ot}}{1000} \right) (Tar_E) \quad (\text{Ecuación 4})$$

Ejemplo: consumo de energía eléctrica del equipo.

$$C_{EE} = 192h \left(\frac{65 \text{ W} + 25 \text{ W}}{1000} \right) \left(\frac{1,1 \text{ GTQ}}{\text{kWh}} \right)$$

$$C_{EE} = 19,02 \text{ GTQ}$$

- Costo de agua potable

En el cálculo del costo del consumo de agua durante la destilación se utilizó la siguiente ecuación.

$$C_A = t \left(\frac{\dot{v}}{1000} \right) (Tar_A) \quad (\text{Ecuación 5})$$

Ejemplo: consumo de agua potable durante la destilación.

$$C_A = 11\,520 \text{ min} \left(\frac{5 \text{ L/min}}{1000} \right) \left(\frac{6,27 \text{ GTQ}}{\text{m}^3} \right)$$

$$C_{EE} = 361,27 \text{ GTQ}$$

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Variación del flujo volumétrico

$\dot{v} [L/min]$	$t [min]$	$T_E [^{\circ}C]$	$T_S [^{\circ}C]$	$T_{EVAP} [^{\circ}C]$
1	0	22,8	22,2	19,1
	10	19,0	18,5	1,6
	20	15,3	14,4	0,0
	30	11,4	10,7	-0,4
	40	8,8	8,4	-0,5
	50	6,7	6,5	2,3
	60	5,3	5,0	2,8

Continuación del apéndice 2.

1,5	0	22,8	22,9	21,0
	10	18,9	18,4	0,3
	20	14,9	14,2	1,8
	30	11,4	11,0	2,7
	40	8,7	8,4	2,7
	50	6,7	6,4	3,2
	60	4,9	4,7	2,5
2	0	24,9	24,8	24,4
	10	20,3	19,8	0,1
	20	16,2	15,8	1,2
	30	11,9	11,6	1,7
	40	8,5	8,3	2,1
	50	6,0	5,8	1,7
	60	3,1	3,0	1,6
3	0	21,8	21,9	22,4
	10	19,8	19,4	-6,5
	20	16,7	16,3	-2,7
	30	12,8	12,4	-0,5
	40	9,7	9,4	0,7
	50	7,2	6,9	1,6
	60	5,2	4,7	1,9
4	0	24,4	24,3	26
	10	21,6	21,4	-2,0
	20	18,6	18,4	1,3
	30	15,4	15,1	2,4
	40	12,1	11,7	3,7
	50	9,3	9,1	4,1
	60	7,3	7,1	4,2

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Variación de la sensibilidad del termostato**

Sensibilidad del termostato	t [min]	T_E [°C]	T_S [°C]	T_{EVAP} [°C]
Mínima	0	24,9	24,8	24,4
	10	20,3	19,8	0,1
	20	16,2	15,8	1,2
	30	11,9	11,6	1,7
	40	8,5	8,3	2,1
	50	6,0	5,8	1,7
	60	3,1	3,0	1,6
Intermedia	0	24,5	24,7	23,9
	10	19,9	19,7	-0,3
	20	15,6	15,4	0,7
	30	11,8	11,4	1,3
	40	8,5	8,4	1,8
	50	5,6	5,5	1,6
	60	2,9	2,8	1,5
Máxima	0	24,8	24,8	24,2
	10	20,0	19,9	-0,2
	20	15,9	15,7	1,0
	30	11,9	11,4	1,5
	40	8,7	8,4	1,8
	50	5,8	5,7	1,9
	60	3,3	2,9	1,6

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Variación de la configuración de flujos**

Configuración de flujos	t [min]	T_E [°C]	T_S [°C]	T_{EVAP} [°C]
Paralelo	0	24,1	24,2	24,6
	10	21,4	21,2	-7,3
	20	17,9	17,7	-4,2
	30	13,8	13,7	-2,6
	40	10,3	10,2	-1,6

Continuación del apéndice 4.

	50	7,5	7,4	-1,4
	60	5,2	5,1	-1,0
Contracorriente	0	24,9	24,8	24,4
	10	20,3	19,8	0,1
	20	16,2	15,8	1,2
	30	11,9	11,6	1,7
	40	8,5	8,3	2,1
	50	6,0	5,8	1,7
	60	3,1	3,0	1,6

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Destilación

Refrigerante	Repetición	$T_{EV,C}[^{\circ}C]$	$T_{COND}[^{\circ}C]$	$T_{REF}[^{\circ}C]$
Agua fría	1	77,2	16,3	4,0
	2	78,4	16,1	4,4
	3	80,4	16,4	4,9
	4	77,5	15,5	3,8
	5	78,6	16,5	5,3
Agua a temperatura ambiente	1	78,1	22,9	22,8
	2	77,3	22,1	22,0
	3	78,2	22,3	22,2
	4	77,5	22,3	22,1
	5	78,9	22,4	22,3

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Datos calculados

Refrigerante	Repetición	$\Delta T_{LM} [^{\circ}C]$	$Q_{dest} [W]$	$\varepsilon_{inc} [W]$
Agua fría	1	34,14	152,86	1,16
	2	33,78	151,21	1,18
	3	34,01	152,26	1,19
	4	33,69	150,81	1,18
	5	33,06	147,98	1,19
Agua a temperatura ambiente	1	8,74	39,13	12,37
	2	8,74	39,13	12,37
	3	8,83	39,55	12,48
	4	9,82	43,94	7,78
	5	8,91	39,90	12,57

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. Fotos del equipo de refrigeración en funcionamiento

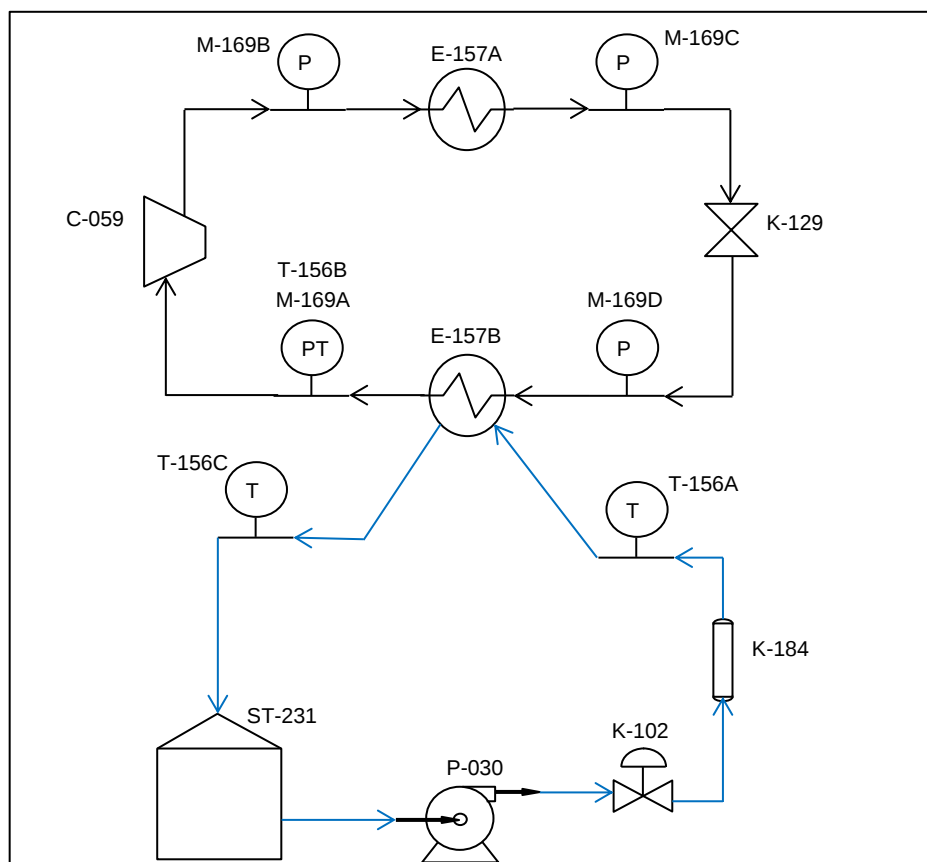


Continuación del apéndice 7.



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. Diagrama del equipo



Símbolo	Descripción
C-059	Compresor
E-157A	Condensador
E-157B	Intercambiador de calor (evaporador)
K-102	Válvula de globo
K-129	Capilar de estrangulación
K-184	Rotámetro
M-169A, M-169B, M-169C, M-169D	Manómetros
P-030	Bomba sumergible
T-156A, T-156B, T-156C	Termómetros
ST-231	Tanque de almacenamiento de agua

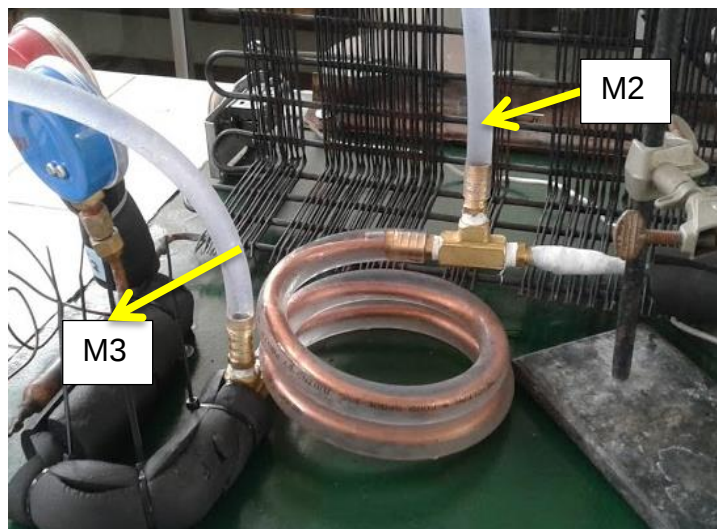
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Manual de operación del equipo de refrigeración**

Para poner a funcionar el equipo de refrigeración seguir las siguientes indicaciones:

- Conectar los accesorios que se van a utilizar (rotámetro, válvula, mangueras, etc.). Si el caudal ya está regulado en 2 L/min no es necesario colocar el rotámetro.

Figura A1. **Evaporador del intercambiador de calor**



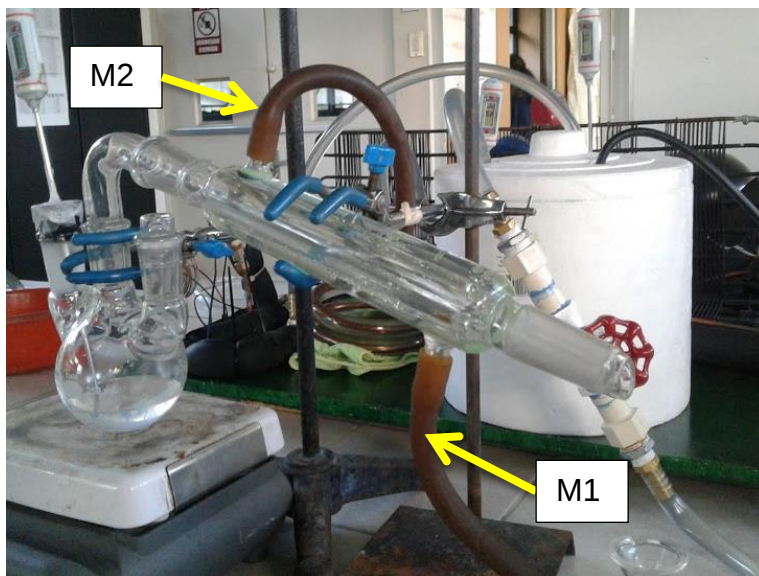
Fuente: elaboración propia.

- Para empezar a enfriar no es necesario colocar el equipo de destilación, por lo que solo se necesita conectar dos mangueras: una desde la bomba hacia el evaporador (M2) y otra desde el evaporador hacia el tanque (M3), como se muestra en la figura A1.

Continuación del apéndice 9

- A continuación, se debe verificar que el depósito de agua de enfriamiento esté lleno hasta la línea azul; de lo contrario, llenarlo hasta este nivel.
- Ahora se puede encender la bomba de agua y colocar los termómetros donde se desee.
- Dejar que el agua circule a través del equipo durante al menos dos minutos y proceder a encender el compresor.
- Dejar que el sistema llegue a temperaturas entre 6 y 8 °C, en ese momento detener la bomba y apagar el compresor para conectar el equipo de destilación.

Figura A2. **Equipo de destilación**

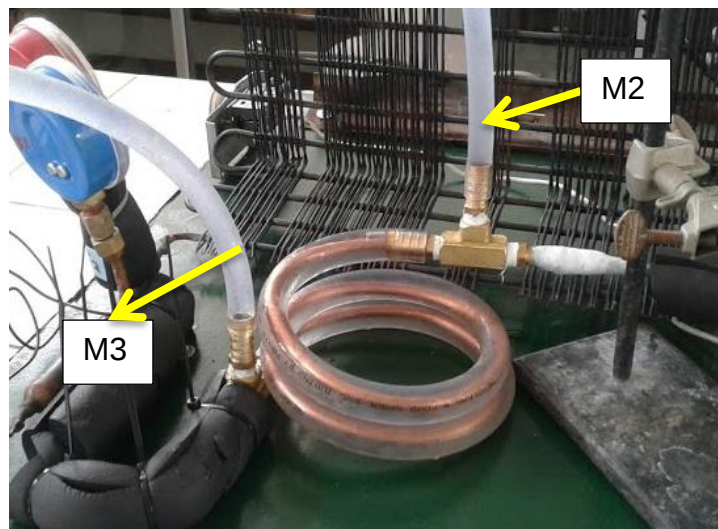


Fuente: elaboración propia.

Continuación del apéndice 9

- Una manguera (M1) debe salir de la bomba e ir conectada a la válvula de globo y seguir hacia el equipo de destilación; en la otra boquilla del condensador, del equipo de destilación, se debe conectar otra manguera flexible de color marrón (M2), como se muestra en la figura A2.

Figura A3. **Evaporador del intercambiador de calor**



Fuente: elaboración propia.

- Luego, la manguera que sale del condensador (M2) debe ser conectada al evaporador y otra manguera transparente (M3) se debe conectar desde la salida del evaporador hacia el tanque; esta es la línea de retorno del agua, como se muestra en la figura A3.

Continuación del apéndice 9

- Ya que el equipo de refrigeración y el de destilación están conectados entre sí, se puede proceder a encender de nuevo la bomba de agua en primer lugar y luego el compresor.
- Se recomienda anotar las presiones de los manómetros para luego comparar utilizando las tablas de vapor del R134a, los valores de la temperatura teórica en el evaporador respecto a la temperatura experimental medida.
- Observar e identificar cada parte del ciclo de refrigeración por compresión y verificar si se comporta de acuerdo al diagrama T-S teórico.
- Estos dos últimos pasos son opcionales, para los alumnos que deseen ver cómo funciona experimentalmente el ciclo de refrigeración por compresión.
- Desmontar y colocar el equipo en su lugar.

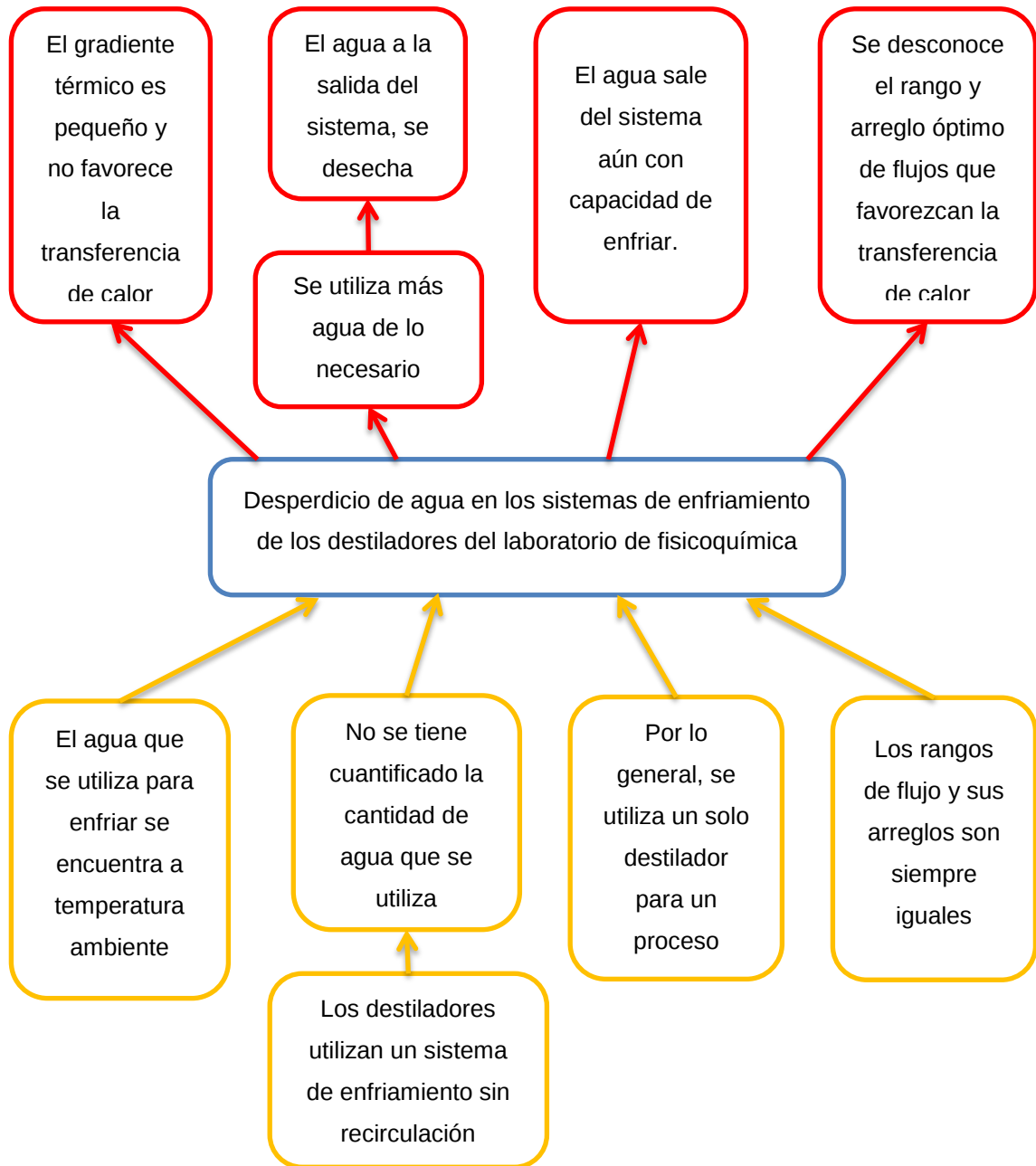
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Tabla de requisitos académicos**

Carrera	Área	Curso	Tema específico
Ingeniería química	Química	Química orgánica	Nomenclatura y propiedades de compuestos orgánicos
	Fisicoquímica	Fisicoquímica 1	Estados y procesos, ciclo de Carnot
			Leyes de la termodinámica
		Termodinámica 3	Ciclo de refrigeración por compresión
			Uso de tablas de vapor
			Procesos con cambio de fase
	Operaciones unitarias	Transferencia de calor	Evaporación
			Condensación
			Enfriamiento
		Transferencia de masa	Destilación
	Ciencias básicas y complementarias	Estadística 2	Análisis estadístico

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Ficha técnica del compresor

SPECIFICATION OF DAEWOO COMPRESSOR					
Model	HFL5Y-1		Date of Approval	2002-07-22	
Voltage	110-115V		Frequency	60Hz	
APPLICATION					
Evaporating temp. range	-35℃~-10℃		Refrigerant control	Capillary tube	
	-31℉~-14℉		Compressor cooling	Static cooling	
Refrigerant	R134a		Voltage range	94~132 V	
PERFORMANCE					
Cooling capacity	kcal/h	43 (50W)	Test condition (ASHRAE L.B.P)		
	Btu/h	171	Evaporating temp.	℃	-23.3 (-10 ℉)
Power input	W	65	Condensing temp.	℃	54.4 (130 ℉)
Current	A	0.9	Liquid subcooled to	℃	32.2 (90 ℉)
Efficiency : COP	W/W	0.77	Gas superheated to	℃	32.2 (90 ℉)
Efficiency : EER	Btu/Wh	2.63	Ambient temp.	℃	32.2 (90 ℉)
Test power source : 115V 60Hz			Test equipment : DAEWOO Calorimeter		

Fuente: DAEWOO, *Specification of Daewoo compressor.*

http://compressor.dwe.co.kr/product/elec_view.asp?cpage=29&seq=57. Consulta: 2 de septiembre de 2016.

Anexo 2. Coeficientes globales de transferencia de calor típicos

Current conservative design values of heat transfer coefficient $\bar{U}$ based on outside surface for bare tube coolers, unless mentioned otherwise, are as follows:		
	Min	Max
Flooded shell-and-tube cooler (water to ammonia or R-12)	50	150
Flooded shell-and-finned tube high velocity R-12 water cooler	30	150
Flooded shell-and-tube cooler (brine to ammonia)	45	100
Flooded shell-and-tube cooler (brine to R-12)	30	90
Dry-expansion shell-and-tube cooler, R-12 in tubes, water in shell	50	115
Baudelot cooler, flooded (ammonia or R-12 to water)	100	200
Baudelot cooler, dry-expansion (ammonia to water)	60	150
Baudelot cooler, dry-expansion (R-12 to water)	60	120
Double-pipe cooler (water to ammonia)	50	150
Double-pipe cooler (brine to ammonia)	50	125
Shell-and-coil cooler (water to ammonia)	10	25
Shell-and-coil cooler (water to R-12)	10	25
Spray-type shell-and-tube water coolers (ammonia or R-12)	150	250
Tank-and-agitator, coil-type water cooler, ammonia, flooded	80	125
Tank-and-agitator, coil-type water cooler, R-12 flooded	60	100
Tank, ammonia, brine cooling, coils between can in ice tank	15	40
Tank, high velocity raceway type, brine to ammonia	80	110

Fuente: DOSSAT, Roy. *Principles of refrigeration*. p. 188.