



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

**IMPLEMENTACIÓN DE UNA PRÁCTICA DE LABORATORIO QUE RELACIONE
CALORIMETRÍA CON EL EQUILIBRIO SÓLIDO LÍQUIDO EN EL CURSO DE
LABORATORIO DE FISICOQUÍMICA 2, ÁREA DE FISICOQUÍMICA, ESCUELA DE
INGENIERÍA QUÍMICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE
GUATEMALA**

Luis Enrique Rodolfo Dell García

Asesorado por el Ing. César Ariel Villela Rodas

Guatemala, octubre de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**IMPLEMENTACIÓN DE UNA PRÁCTICA DE LABORATORIO QUE RELACIONE
CALORIMETRÍA CON EL EQUILIBRIO SÓLIDO LÍQUIDO EN EL CURSO DE
LABORATORIO DE FISCOQUÍMICA 2, ÁREA DE FISCOQUÍMICA, ESCUELA DE
INGENIERÍA QUÍMICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, UIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE
GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LUIS ENRIQUE RODOLFO DELL GARCÍA
ASESORADO POR EL ING. CÉSAR ARIEL VILLELA RODAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a.i.)
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Julio Ricardo Díaz Pappa
EXAMINADORA	Inga. Dinna Lissette Estrada Moreira de Rossal
EXAMINADOR	Ing. Pablo Enrique Morales Paniagua
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**IMPLEMENTACIÓN DE UNA PRÁCTICA DE LABORATORIO QUE RELACIONE
CALORIMETRÍA CON EL EQUILIBRIO SÓLIDO LÍQUIDO EN EL CURSO DE
LABORATORIO DE FISICOQUÍMICA 2, ÁREA DE FISICOQUÍMICA, ESCUELA DE
INGENIERÍA QUÍMICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE
GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 11 de abril de 2023.



Luis Enrique Rodolfo Dell García

Guatemala 24 de abril de 2023

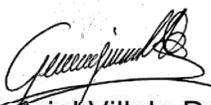
Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Le saludo cordialmente, deseándole éxitos en sus actividades. Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado el Informe Final en la modalidad TESIS con seminario de investigación, del trabajo de graduación titulado: "IMPLEMENTACIÓN DE UNA PRÁCTICA DE LABORATORIO QUE RELACIONE CALORIMETRÍA CON EL EQUILIBRIO SÓLIDO LÍQUIDO EN EL CURSO DE LABORATORIO DE FISICOQUÍMICA 2, ÁREA DE FISICOQUÍMICA, ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA", elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Química Luis Enrique Rodolfo Dell García, quien se identifica con el registro académico 2014 03598 y con el CUI 2722 14043 1201

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted,

Atentamente,


Cesar Ariel Villela Rodas
ASESOR
Ingeniero Químico
Colegiado activo no. 1175

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



Guatemala, 21 de julio de 2023.
Ref. EIQ.TG-IF.014.2023.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **01-2023**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL

Solicitado por el estudiante universitario: **Luis Enrique Rodolfo Dell Garcia**.
Identificado con número de carné: **2722140431201**.
Identificado con registro académico: **201403598**.
Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química**.
En la modalidad: **TESIS (Informe Final, Seminario de Investigación)**.

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:

IMPLEMENTACIÓN DE UNA PRÁCTICA DE LABORATORIO QUE RELACIONE CALORIMETRÍA CON EL EQUILIBRIO SÓLIDO LÍQUIDO EN EL CURSO DE LABORATORIO DE FISCOQUÍMICA 2, ÁREA DE FISCOQUÍMICA, ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

César Ariel Villela Rodas, profesional de la Ingeniería Química

Habiendo encontrado el referido 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”

Ingrid Lorena Álvarez Paredón
profesional de la Ingeniería Química
COORDINADOR DE TERNA
Tribuna de Revisión
Trabajo de Graduación



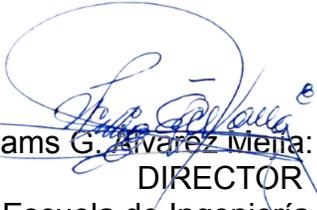
C.c.: archivo



LNG.DIRECTOR.203.EIQ.2023

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de Área y aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **IMPLEMENTACIÓN DE UNA PRÁCTICA DE LABORATORIO QUE RELACIONE CALORIMETRÍA CON EL EQUILIBRIO SÓLIDO LÍQUIDO EN EL CURSO DE LABORATORIO DE FISICOQUÍMICA 2, ÁREA DE FISICOQUÍMICA, ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**, presentado por: **Luis Enrique Rodolfo Dell García**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“Id y Enseñad a Todos”


Ing. Williams G. Álvarez Mejía: Mg.I.Q., M.U.I.E.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, octubre de 2023.

LNG.DECANATO.OI.678.2023

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: **IMPLEMENTACIÓN DE UNA PRÁCTICA DE LABORATORIO QUE RELACIONE CALORIMETRÍA CON EL EQUILIBRIO SÓLIDO LÍQUIDO EN EL CURSO DE LABORATORIO DE FISICOQUÍMICA 2, ÁREA DE FISICOQUÍMICA, ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**, presentado por: **Luis Enrique Rodolfo Dell García**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANO a.i.
Facultad de Ingeniería

Ing. José Francisco Gómez Rivera

Decano a.i.

Guatemala, octubre de 2023

JFGR/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

- | | |
|-----------------------|---|
| Dios | Por su infinita bondad y guía en mi camino. |
| Mis padres | Por ser mi guía y apoyo incondicional. |
| Mis hermanos | Por su apoyo y cariño en todo momento. |
| Mis compañeros | Por su amistad y apoyo durante toda la carrera. |

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por estar conmigo en cada paso que doy.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser una importante influencia en mi carrera, y ser parte de mi vida profesional.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme de sus conocimientos.
Mi familia	Por apoyarme y permitirme alcanzar este logro.
Mi asesor	Ing. César Villela, por su apoyo y brindarme el tiempo necesario para el desarrollo del presente trabajo.
Mis amigos	Por ayudarme en el desarrollo de mi tesis, en el desarrollo de la carrera y mi vida personal.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
HIPÓTESIS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Termodinámica.....	3
2.1.1. Ley enfriamiento de Newton	3
2.1.2. Transferencia de calor	4
2.1.2.1. Conducción.....	5
2.1.2.2. Convección.....	5
2.1.2.3. Radiación.....	5
2.1.3. Primera ley de la termodinámica	6
2.1.4. Segunda ley de la termodinámica.....	6
2.2. Equilibrio.....	6
2.2.1. Equilibrio térmico	7
2.2.2. Equilibrio de fases	7
2.3. Proceso adiabático	8
2.4. Calorimetría	8
2.4.1. Calorímetro.....	9

2.5.	Conductividad térmica.....	10
2.6.	Condensación	10
2.6.1.	Condensador.....	10
2.6.1.1.	Estructura de un condensador	11
2.6.1.2.	Líquido refrigerante	11
2.7.	Mezcla homogénea	13
2.8.	Descenso crioscópico	13
2.9.	Punto eutéctico	13
2.10.	Cloruro de sodio	14
2.10.1.	Usos del cloruro de sodio.....	15
2.10.2.	Cloruro de sodio como agente Anti hielo y para el deshielo	15
2.11.	Laboratorio de Fisicoquímica	16
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	17
3.1.	Variables	17
3.1.1.	Variables dependientes.....	17
3.1.2.	Variables independientes	17
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	17
3.3.	Recursos humanos disponibles	18
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	18
3.4.1.	Equipo	18
3.4.1.1.	Medición.....	18
3.4.1.2.	Auxiliar	18
3.4.2.	Cristalería	19
3.4.2.1.	Auxiliar	19
3.4.3.	Reactivos y materia prima	20
3.4.3.1.	Reactivos.....	20
3.5.	Técnica cuantitativa o cualitativa.....	20

3.5.1.	Medición de temperatura de mezclas binarias expuestas al ambiente.....	20
3.5.2.	Medición de temperatura de mezclas binarias dentro del calorímetro.....	21
3.5.3.	Recirculación de agua en sistema de enfriamiento para realizar destilación.....	22
3.6.	Recolección, ordenamiento y procesado de la información.....	22
3.7.	Análisis estadístico	28
3.7.1.	Diseño experimental.....	28
3.7.2.	Media aritmética	28
3.7.3.	Desviación estándar	28
3.7.4.	Varianza	29
3.7.5.	Análisis de varianza.....	29
3.8.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	30
3.8.1.	Programas por utilizar para el análisis de datos	40
3.8.1.1.	Microsoft Word 2016.....	40
3.8.1.2.	Microsoft Excel 2016	40
4.	RESULTADOS	41
4.1.	Diagramas de fase sólido-líquido de mezclas de cloruro de sodio-hielo dentro del calorímetro y expuestas al ambiente	41
4.2.	Razón de calentamiento de las mezclas en el punto eutéctico en función del tiempo, modelo de enfriamiento de Newton de las mezclas en el punto eutéctico y la transferencia de calor por conducción según la ley de Fourier	44
4.3.	Estimación del ahorro monetario obtenido al implementar del sistema de recirculación de agua	46
4.4.	Análisis de varianza de los resultados obtenidos	47

5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	49
5.1.	Diagramas de fase sólido-líquido de mezclas de cloruro de sodio-hielo dentro del calorímetro y expuestas al ambiente.....	50
5.2.	Razón de calentamiento de las mezclas en el punto eutéctico en función del tiempo, modelo de enfriamiento de Newton de las mezclas en el punto eutéctico y la transferencia de calor por conducción según la ley de Fourier.....	51
5.3.	Estimación del ahorro monetario obtenido por la implementación del sistema de refrigeración	52
5.4.	Diferencia significativa de las temperaturas de las mezclas	54
	CONCLUSIONES.....	57
	RECOMENDACIONES.....	59
	REFERENCIAS	61
	APÉNDICES.....	63

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1.	Curva de enfriamiento.....	4
Figura 2.	Calorímetro adiabático de fabricación simple	9
Figura 3.	Sistema de destilación tradicional de laboratorio.....	12
Figura 4.	Diagrama de fase sólido - líquido	14
Figura 5.	Distribución F de temperaturas del sistema dentro del calorímetro.....	32
Figura 6.	Distribución F de las temperaturas del sistema expuestas al ambiente	34
Figura 7.	Distribución F de mezclas dentro del calorímetro en función del tiempo.....	36
Figura 8.	Distribución F de mezclas expuestas al ambiente en función del tiempo.....	38
Figura 9.	Diagrama de fase sólido - líquido de mezclas dentro del calorímetro.....	41
Figura 10.	Diagrama de fase sólido - líquido de mezclas expuestas al ambiente	42
Figura 11.	Razón de calentamiento en función del tiempo	44
Figura 12.	Diagrama de fase Líquido - vapor para la mezcla etanol - agua..	54

TABLAS

Tabla 1.	Peso de los compuestos para la realización de mezclas	23
Tabla 2.	Temperaturas en el equilibrio de mezclas dentro del calorímetro	23
Tabla 3.	Temperaturas en el equilibrio de mezclas expuestas al ambiente.....	24
Tabla 4.	Temperaturas del punto eutéctico de mezclas expuestas al ambiente.....	25
Tabla 5.	Temperatura del punto eutéctico de mezclas dentro del calorímetro	27
Tabla 6.	Prueba ANOVA	30
Tabla 7.	Temperatura ambiente para análisis de mezclas dentro del calorímetro	31
Tabla 8.	Análisis de temperaturas en el equilibrio de mezclas dentro del calorímetro	31
Tabla 9.	ANOVA de las temperaturas en el equilibrio de mezclas dentro del calorímetro.....	32
Tabla 10.	Temperatura ambiente para análisis de mezclas expuestas al ambiente.....	33
Tabla 11.	Análisis de temperaturas en el equilibrio de mezclas expuestas al ambiente.....	33
Tabla 12.	ANOVA de las temperaturas en el equilibrio de mezclas expuestas al ambiente.....	34
Tabla 13.	Temperatura del punto eutéctico de mezclas dentro del calorímetro	35
Tabla 14.	ANOVA de temperaturas de mezclas en calorímetro en función del tiempo.....	36

Tabla 15.	Temperatura del punto eutéctico de mezclas expuestas al ambiente	37
Tabla 16.	ANOVA de mezclas expuestas al ambiente en función del tiempo	38
Tabla 17.	Resumen de resultados de análisis ANOVA.....	39
Tabla 18.	Descripción de la Figura 9	42
Tabla 19.	Descripción de la Figura 10	43
Tabla 20.	Punto eutéctico de mezclas de cloruro de sodio - hielo	43
Tabla 21.	Descripción de la Figura 11	45
Tabla 22.	Modelo de calentamiento de Newton de las mezclas en el punto eutéctico	45
Tabla 23.	Transferencia de calor para mezclas en el punto eutéctico	46
Tabla 24.	Ahorro monetario estimado anual.....	46
Tabla 25.	Resumen de resultados de ANOVA	47

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
ΔH_{Cal}	Cambio de entalpia del calorímetro (J)
ΔH_{Sis}	Cambio de entalpia del sistema (J)
C_P	Capacidad calorífica a presión constante ($\frac{J}{^\circ C}$)
R^2	Coefficiente de correlación
C_{AR}	Costo agua recirculada (Q)
ρ	Densidad (g/mL)
σ	Desviación estándar
F	F de Fisher
x	Fracción másica
$^\circ C$	Grados centígrados
K	Grados Kelvin
g	Gramo
h	Hora
\bar{x}	Media aritmética
mg	Miligramo
mL	Mililitro
min	Minuto
%	Porcentaje
T_{Eq}	Temperatura de equilibrio
σ^2	Varianza
V	Volumen (mL)

GLOSARIO

Adiabático	Término que se aplicado a un proceso en el cual no hay transferencia de calor entre el sistema de proceso y sus alrededores.
Alrededores	Toda la materia ajena al sistema estudiado.
Aprovechamiento	Utilizar una cosa o circunstancia de forma que se obtenga el beneficio máximo posible.
Caudal	Volumen de líquido que se mueve por unidad de tiempo.
Destilación	Proceso de separación, realizado mediante vaporización y posterior enfriamiento.
Fase	Región de un sistema en el que las propiedades físicas de la materia son esencialmente uniformes.
Fisicoquímica	Rama de la química que estudia las propiedades físicas de la materia, las leyes de la interacción química y las teorías que las gobiernan.
Operación Unitaria	Paso básico en un proceso. Implica un cambio físico o transformación química.

Recirculación

Paso repetido de un fluido a través de un sistema con el objetivo de llevar a cabo las funciones de refrigeración o de calefacción.

Sistema

Materia a estudiar, delimitada por una superficie, a través de la cual se puede, o no, dar intercambio de masa y energía con los alrededores.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se realizó con el fin de relacionar mediante la realización de una práctica integral los temas de equilibrio sólido-líquido y calorimetría del curso de Laboratorio de Fisicoquímica 2 del área de fisicoquímica de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Para la realización del estudio se efectuó la determinación del punto eutéctico de mezclas de hielo triturado y cloruro de sodio. Realizando esto dentro de un calorímetro adiabático y comparándolo con el comportamiento observado al exponer las mezclas al ambiente. Además se utilizó el gradiente de temperatura obtenido al determinar el punto eutéctico de las mezclas para diseñar un sistema de refrigeración de circuito cerrado de agua de enfriamiento para realizar destilaciones con el objeto de reducir el consumo de agua durante las prácticas de destilación.

Para la determinación del punto eutéctico de las mezclas de hielo triturado y cloruro de sodio se inició con hielo triturado a 0 °C, aumentando la fracción de cloruro de sodio en intervalos del 5 % en la mezcla hasta que se alcanzó el punto de saturación de la mezcla, de 26.3 % cloruro de sodio a partir del cual se requieren alrededor de 801 °C para alcanzar la fusión del cloruro de sodio por lo que, el experimento se limitó a determinar la temperatura de las mezclas hasta antes del punto de saturación, se determinó un valor mínimo de temperatura al 20 % cloruro de sodio, aumentando hasta el 25 % en concentración, por lo tanto se subdividió este intervalo de concentración en fracciones de 1 % para así determinar con mayor precisión el punto eutéctico.

Se trabajó en un calorímetro adiabático y a su vez exponiendo las mezclas al ambiente. Se analizaron las variaciones en la temperatura de las mezclas conforme se variaron las composiciones de estas, luego se evaluó la capacidad de este equipo para el enfriamiento de un sistema de recirculación de agua.

El punto eutéctico de las mezclas se determinó a concentración de 23 % de cloruro de sodio con temperatura de $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ dentro del calorímetro y de $-20.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ para las mezclas expuestas al ambiente.

La temperatura de las mezclas expuestas al ambiente aumentó de manera considerable en función del tiempo, en el caso de las mezclas dentro del calorímetro se observó que la temperatura mostró un comportamiento casi constante, la transferencia de calor mediante conducción tuvo un valor de 6.2686 J/s en el caso de las mezclas dentro del calorímetro mientras que de 272.3565 J/s para las mezclas expuestas al ambiente.

Se determinó la viabilidad de la recirculación de agua enfriada en un calorímetro utilizando mezclas eutécticas para la reducción en el gasto de recursos ya que utilizar el circuito cerrado de agua refrigerada, representa un ahorro anual aproximado de 281.75 GTQ, es decir un 97,52 % en los costos de operación.

Mediante el análisis de varianza de un factor se determinó que sí existe un efecto significativo de la composición de las mezclas sobre la temperatura de estas, además de un efecto significativo del tiempo sobre la temperatura de las mezclas dentro del calorímetro y las expuestas al ambiente. Esto a un nivel de confianza del 95 %, y el estudio se llevó a cabo con condiciones ambientales, en el Laboratorio de Físicoquímica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

OBJETIVOS

General

Proponer la implementación de una práctica de laboratorio que relacione la calorimetría con el equilibrio sólido líquido en el curso de Laboratorio de Fisicoquímica 2, área de Fisicoquímica, Escuela de Ingeniería Química FIUSAC.

Específicos

1. Evaluar la relación entre las prácticas de equilibrio sólido líquido y la calorimetría mediante la determinación del punto eutéctico de la mezcla binaria agua destilada-cloruro de sodio.
2. Comparar los efectos de la transferencia de calor sobre las mezclas en el calorímetro adiabático y de las mezclas expuestas al ambiente.
3. Considerar si es viable la recirculación de agua enfriada en el calorímetro para la reducción de en el gasto de agua para el uso de condensadores mediante el uso de un sistema de bombeo.
4. Elaborar un instructivo de laboratorio con un enfoque didáctico para la realización de la práctica integral.
5. Determinar si es posible implementar el experimento propuesto en el laboratorio de Fisicoquímica 2.

6. Interpretar el análisis estadístico que se realizará a las variables dependientes e independientes involucradas dentro de las variables involucradas en la práctica propuesta.

HIPÓTESIS

Hipótesis científica

Es posible el descenso de la temperatura de mezclas binarias de agua destilada-cloruro de sodio mediante variaciones en la composición de mezcla.

Hipótesis nulas

- $(H_0)_1$: la temperatura de las mezclas no varía significativamente en función de la concentración de estas.
- $(H_0)_2$: la temperatura de las mezclas no varía significativamente con el paso del tiempo dentro del calorímetro.
- $(H_0)_3$: la temperatura de las mezclas no varía significativamente con el paso del tiempo al exponerse al ambiente.

Hipótesis alternativa

- $(H_0)_1$: la temperatura de las mezclas varía significativamente en función de la concentración de estas.
- $(H_0)_2$: la temperatura de las mezclas varía significativamente con el paso del tiempo dentro del calorímetro.

- $(H_0)_3$: la temperatura de las mezclas varía significativamente con el paso del tiempo al exponerse al ambiente.

INTRODUCCIÓN

El propósito principal de este trabajo es relacionar mediante la realización de una práctica integral los temas de equilibrio sólido-líquido y calorimetría del curso de Laboratorio de Físicoquímica 2 del área de fisicoquímica de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Mediante la determinación del punto eutéctico de mezclas de hielo triturado y cloruro de sodio.

Realizando esto dentro de un calorímetro adiabático y comparándolo con el comportamiento observado al exponer las mezclas al ambiente. Así también aprovechar el gradiente de temperatura obtenido al determinar el punto eutéctico de las mezclas para diseñar un sistema de refrigeración con circuito cerrado de agua de enfriamiento para realizar destilaciones.

El presente informe está conformado por cinco capítulos.

En el primer capítulo se tienen los antecedentes generales, donde se hace una breve recopilación de estudios relacionados al tema de investigación, como lo pueden ser artículos científicos y tesis que ayuden a darle soporte al presente trabajo.

En el segundo capítulo, marco teórico, se describe lo relacionado con los temas de estudio como lo es la transferencia de calor, la calorimetría, Así también se describen los conceptos termodinámicos estudiados Por último, se la importancia y aplicaciones de las mezclas de cloruro de sodio-hielo.

En el tercer capítulo, diseño metodológico, se delimita el campo de estudio, las variables a analizar, los recursos materiales y humanos requeridos para llevar a cabo el estudio. Además, en este capítulo se describen los métodos y procedimientos utilizados para la realización de la parte experimental del estudio. Por último, se detalla el ordenamiento, tratamiento y análisis estadístico de los datos obtenidos de la experimentación.

En el cuarto capítulo se presentan los resultados obtenidos, conteniendo tablas, gráficas, figuras y ecuaciones obtenidas de los resultados del experimento.

En el quinto capítulo se interpretan los resultados obtenidos, se discuten las tendencias, datos, rangos, errores, hipótesis y posibles causas que pueden afectar los resultados esperados.

1. ANTECEDENTES

Se investigó acerca de la relación entre el equilibrio sólido líquido y la calorimetría y no se encontraron estudios que relacionaran ambos fenómenos, existen trabajos que estudian los fenómenos pero de manera individual.

En la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Tarapacá Chile, se evaluó el *Efecto del estroncio en las temperaturas de reacción eutécticas y microestructuras de solidificación de una aleación al-si tipo a319*, donde se detectaron tres reacciones eutécticas, la más interesante entre ellas es la formación de fases ricas en cobre, con temperaturas de formación que disminuyen al aumentar la velocidad de enfriamiento y el contenido de estroncio (Martínez et al., 2004).

En la Facultad de Ingeniería de la Universidad de São Paulo Brasil, se realizó el *Estudio del equilibrio sólido-líquido de mezclas binarias formadas por miristato de etilo y compuestos representativos del diesel de petróleo*, donde se estudió del equilibrio sólido líquido de mezclas binarias de miristato de etilo (éster etílico del ácido mirístico que se encuentra en abundancia en el biodiesel producido a partir de aceite de coco), y compuestos representativos del diesel de petróleo, tales como el decano, dodeciloheptano y p-xileno (Robustillo-Fuentes et al., 2014).

En la Facultad de Ingeniería del Instituto Tecnológico de Celaya Mexico, se desarrolló el estudio sobre *Calorimetría adiabática y sus aplicaciones*, donde se enuncia el fundamento de la calorimetría adiabática, se describen las partes principales del calorímetro adiabático, los métodos bajo los cuales opera, así como sus aplicaciones en diferentes disciplinas (Gonzales, Lira y Sanchez, 2010).

En la Facultad de Ingeniería de Universidad de San Carlos de Guatemala. Se realizó el estudio sobre la *Optimización de la energía eléctrica específica consumida en el proceso de destilación de agua en un destilador clásico marca barnstead™ modelo a1007, utilizando el procedimiento para 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*, en el cual se determinó que la mayor eficiencia energética y menor consumo de energía eléctrica específica en el equipo de destilación, se logra cuando el flujo másico de entrada al sistema es relativamente bajo (Santos, 2017).

En la Facultad de Ingeniería de Universidad de San Carlos de Guatemala, se realizó el 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, donde se estudió la implementación de un circuito cerrado de agua refrigerada que pretende disminuir el consumo de agua y darle un impulso mayor a la transferencia de calor durante la condensación de los vapores destilados (Cancinos, 2017).

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Termodinámica

La termodinámica es una rama de la física que estudia la energía y el trabajo de un sistema. En especial, describe como la energía térmica se transforma en otras formas de energía y su efecto sobre la materia.

La termodinámica se relaciona con varias propiedades de la materia, principalmente entre estas se encuentra el calor. El calor es energía transferida entre sustancias o sistemas debido a un gradiente de temperatura entre estos. Al ser una forma de energía, el calor se conserva, no puede ser creado ni destruido.

El calor específico se define como la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia.

2.1.1. Ley enfriamiento de Newton

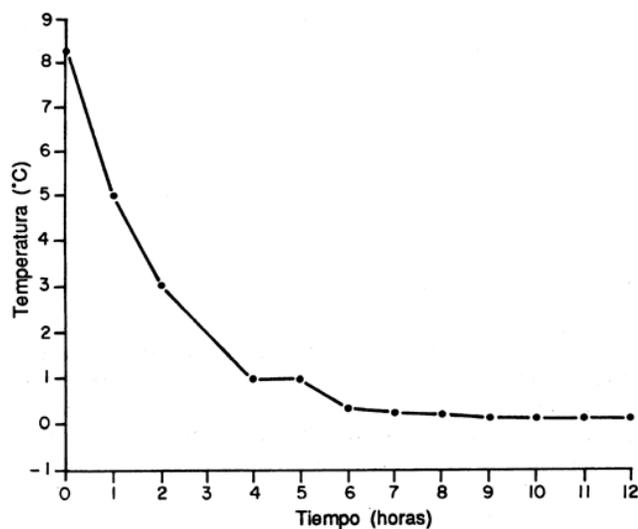
Esta ley establece que la razón de cambio de la temperatura es proporcional a la diferencia entre la temperatura del objeto y la temperatura de los alrededores. Esto resulta en un decaimiento exponencial en la diferencia de temperatura.

Una curva de enfriamiento representa la caída de la temperatura de una sustancia respecto al tiempo que es expuesta al ambiente, en estas curvas se observa como la temperatura de la sustancia disminuye conforme se alcanza el

equilibrio respecto a los alrededores, donde la temperatura se vuelve constante con el paso del tiempo.

Figura 1.

Curva de enfriamiento



Nota. El gráfico muestra el comportamiento de la temperatura en función del tiempo para una muestra que pierde calor. Obtenido de J. Graham, W.A. Johnston y F.J. Nicholson (1993). *El hielo en las pesquerías*. (<http://www.fao.org/docrep/003/t0713s/T0713S04.htm>), consultado el 20 de abril de 2023. De dominio publico.

2.1.2. Transferencia de calor

En términos del sistema termodinámico, la transferencia de calor es el movimiento de calor a través de la frontera del sistema debido a una diferencia de temperatura entre el sistema y los alrededores. La transferencia de calor puede darse también dentro del sistema debido a diferencias de temperaturas en varios

puntos dentro del sistema. La diferencia en temperatura es considerada como el potencial que genera el flujo de calor.

El calor puede transferirse de un cuerpo a otro o entre un cuerpo y los alrededores mediante tres formas: conducción, convección y radiación.

2.1.2.1. Conducción

La conducción es la transferencia de energía a través de un material sólido. La conducción entre cuerpos ocurre cuando están en contacto directo y las moléculas transfieren su energía a través de la interfaz.

2.1.2.2. Convección

La convección es la transferencia de calor en un medio líquido. Las moléculas en un gas o líquido en contacto con un cuerpo sólido transmiten o absorben calor hacia o de ese cuerpo y después se separan, permitiendo que otras moléculas tomen sus lugares y repitan el proceso. La eficiencia puede mejorarse al aumentar el área de superficie a ser calentada o enfriada y forzando el fluido a moverse sobre la superficie.

2.1.2.3. Radiación

La radiación es la emisión de energía electromagnética, particularmente fotones infrarrojos que transportan la energía en forma de calor. Toda la materia emite o absorbe radiación electromagnética, la diferencia neta entre la energía emitida y absorbida determina si esto causa ganancias o pérdidas de calor.

2.1.3. Primera ley de la termodinámica

También conocida como la ley de la conservación de la energía, establece que la energía no se crea ni destruye, solo cambia de forma durante un proceso, ya sea en forma de calor o trabajo.

2.1.4. Segunda ley de la termodinámica

Esta ley afirma que la energía tiene calidad así como cantidad, y los procesos reales ocurren hacia donde disminuye la calidad de la energía (Cengel & Boles, 2011).

2.2. Equilibrio

El equilibrio se divide en equilibrio mecánico, térmico, de fase y equilibrio químico.

Cuando un sistema está aislado, no interactúa con sus alrededores; sin embargo su estado puede cambiar a consecuencia de eventos espontáneos ocurriendo internamente como sus propiedades intensivas, como la temperatura y presión.

Cuando estos cambios cesan, el sistema está en equilibrio. Por lo tanto para que un sistema se encuentre en equilibrio debe estar en una fase o consistir de un número de fases que no tiendan a cambiar sus condiciones cuando el sistema se aísla de sus alrededores. En el equilibrio, la temperatura es uniforme en todo el sistema. También, la presión puede considerarse como uniforme mientras no exista un efecto significativo de la gravedad.

2.2.1. Equilibrio térmico

Se dice que dos sistemas físicos están en equilibrio térmico cuando el calor no fluye entre estos al estar conectados por un medio permeable al calor.

El equilibrio térmico se alcanza cuando al poner en contacto dos sistemas físicos a distintas temperaturas, alcanzan una temperatura en común.

2.2.2. Equilibrio de fases

El término fase se refiere a la cantidad de materia que es homogénea en tanto su composición química como su estructura física. Homogeneidad en estructura física significa que la materia es totalmente sólida, totalmente líquida o totalmente gas. Un sistema puede contener una o más fases.

Se denomina diagrama de fase a la representación gráfica de las fronteras entre diferentes estados de la materia de un sistema determinado, en función de variables elegidas para facilitar el estudio del mismo. Cuando en una de estas representaciones todas las fases corresponden a estados de agregación diferentes se suele denominar diagrama de cambio de estado.

Los diagramas de fase son utilizados para entender la relación entre diferentes fases y son usualmente representados como el cambio en la fase de un sistema en función de la temperatura, presión o composición de los componentes en un sistema. En el equilibrio, la temperatura, presión y potencial químico de las moléculas de los componentes constituyentes en el sistema deben ser iguales en todas las fases.

Un diagrama de sustancia pura representa el comportamiento de una sustancia al variarse sus propiedades mientras que en un diagrama de fase binario se representa el comportamiento de una mezcla de dos sustancias.

2.3. Proceso adiabático

La velocidad con la que dos sistemas a distintas temperaturas alcanzan el equilibrio térmico puede retardarse al separarlos utilizando materiales aislantes. A pesar de que la velocidad a la que el equilibrio se alcanza puede reducirse, ningún material puede evitar que los dos sistemas interactúen hasta alcanzar la misma temperatura.

Sin embargo un aislante ideal puede ser imaginado que imposibilite que estos interactúen térmicamente. Este aislante ideal es conocido como una pared adiabática. Cuando un sistema sufre un proceso mientras está encerrado por una pared adiabática, no experimenta interacciones térmicas con sus alrededores. Este proceso es llamado proceso adiabático.

2.4. Calorimetría

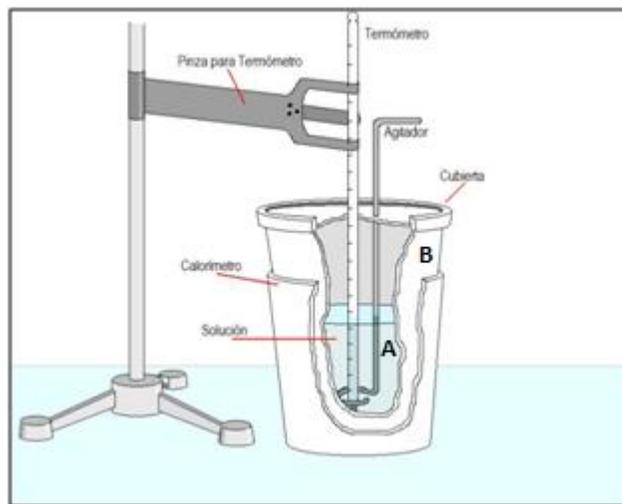
La calorimetría es la ciencia asociada con la determinación de los cambios de energía de un sistema mediante la medición del calor intercambiado con sus alrededores. La calorimetría es la medición cuantitativa del calor. Entre sus aplicaciones se encuentra la medición de calores específicos de elementos y compuestos además de la medición de entalpías de cambio de fase.

2.4.1. Calorímetro

Un calorímetro es un dispositivo utilizado para medir la cantidad de calor involucrada en un proceso físico o químico. En su forma más simple es un recipiente de paredes aisladas que aloja en su interior un termómetro y un dispositivo agitador. Los cuales sirven para medir la temperatura y revolver la sustancia depositada en el interior del calorímetro.

Figura 2.

Calorímetro adiabático de fabricación simple



Nota. En la imagen se presenta de forma esquemática un calorímetro adiabático. Obtenido de M. Acevedo y L. Navarro (2010). *Elaboración y calibración de un calorímetro.* (<http://fqmegablog.blogspot.com/2010/06/elaboracion-y-calibracion-de-un.html>), consultado el 15 de abril de 2023. De dominio público.

2.5. Conductividad térmica

La conductividad térmica es la tasa a la cual el calor atraviesa un material específico, expresado como la cantidad de calor que fluye por unidad de tiempo a través de una unidad de área con un gradiente de temperatura de un grado por unidad de distancia.

2.6. Condensación

Es considerada una forma de transferencia de calor por convección porque está relacionada con movimiento del fluido. Se presenta la condensación cuando la temperatura de un vapor se reduce por debajo de su temperatura de saturación. Esto suele llevarse a cabo cuando el vapor entra en contacto con una superficie sólida cuya temperatura esté por debajo de la temperatura de saturación de ese vapor. Pero la condensación también puede ocurrir sobre la superficie libre de un líquido o incluso en un gas, cuando la temperatura de éstos a la cual se expone el vapor está por debajo de Temperatura de saturación (Cengel, 2007).

2.6.1. Condensador

Un condensador es un aparato o equipo de laboratorio empleado para condensar (cambiar el estado físico de una sustancia de estado gaseoso a líquido). En los laboratorios, son utilizados generalmente en procedimientos que involucran líquidos orgánicos llevados al estado gaseoso mediante calentamiento. Los condensadores pueden emplearse a varias escalas, en el área de investigación y enseñanza se usan típicamente condensadores de vidrio diseñados para pasar flujo de vapor sobre una cámara enfriada adyacente.

En su forma más simple, estos condensadores consisten de un tubo de vidrio con aire exterior que provee enfriamiento. Otro tipo de condensador es el de tipo Liebig, este consiste en tubos de vidrio concéntricos, el tubo interior es a través del cual pasa el gas caliente y la cámara exterior es a través de la que pasa el fluido refrigerante, para reducir la temperatura del gas y lograrse así la condensación.

2.6.1.1. Estructura de un condensador

Los condensadores constan de dos tubos concéntricos, en el tubo interior fluyen los vapores a condensar. En el tubo exterior fluye el líquido refrigerante, los extremos del condensador están provistos generalmente de juntas de vidrio esmerilado. En las que se pueden ajustar otros aparatos de vidrio. El extremo superior puede dejarse abierto a la atmósfera. El tubo exterior generalmente posee dos conexiones de vidrio donde se colocan mangueras donde entra y sale el líquido refrigerante empleado para absorber el calor del vapor condensable. Para reducir el choque térmico por lo general entra a través de la conexión inferior y sale por la conexión superior.

2.6.1.2. Líquido refrigerante

Un líquido refrigerante es el utilizado en la transmisión de calor que, en un sistema de refrigeración, absorbe calor a bajas temperatura y presión, cediéndolo a temperatura y presión más elevadas. Este proceso tiene lugar, generalmente, con cambios de fase del fluido.

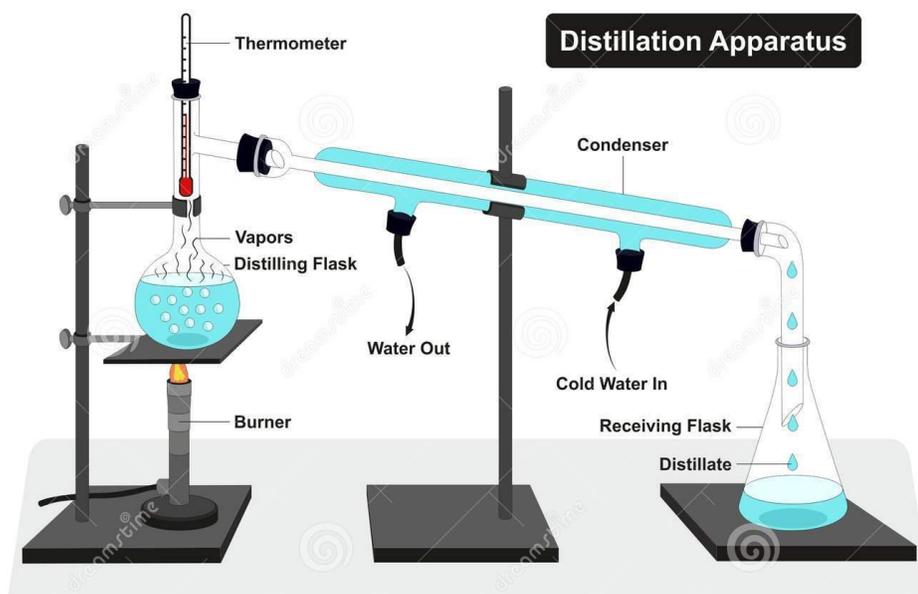
El líquido refrigerante debe circular constantemente a través del condensador para evitar que este se caliente debido a la temperatura del vapor, y así mantener una temperatura que permita la condensación del vapor. Por lo

general no es necesario que el caudal de refrigerante sea elevado para mantener un enfriamiento correcto.

El agua, no toxica, de bajo costo, amigable con el ambiente y ampliamente disponible es utilizado de manera amplia en tareas de enfriamiento, es también comúnmente usada como un material para la transferencia de calor y almacenamiento de este en sistemas a gran escala.

Figura 3.

Sistema de destilación tradicional de laboratorio



Nota. El diagrama muestra un sistema de destilación convencional de laboratorio. Obtenido de Dreamstime (2016). *Diagrama del aparato de destilación.* (<https://www.dreamstime.com/stock-illustration-distillation-apparatus-diagram-full-process-lab-tools-including-thermometer-burner-condenser-distilling-receiving-image92205767>), consultado el 15 de abril de 2023. De dominio público.

2.7. Mezcla homogénea

Es una mezcla de elementos o compuestos que tiene una composición y propiedades uniformes en una muestra determinada. Sin embargo, la composición y propiedades pueden variar de una muestra a otra (Petrucci et al., 2002).

Una mezcla binaria es una mezcla compuesta por dos elementos o compuestos. Cuya composición depende de las composiciones y cantidades de los elementos individuales a mezclar.

2.8. Descenso crioscópico

El descenso crioscópico o depresión del punto de congelamiento es una propiedad coligativa que consiste en la disminución de la temperatura del punto de congelamiento que experimenta una solución respecto a la del solvente puro. Esto significa que una solución debe ser enfriada hasta una temperatura más baja que la requerida por el solvente puro para que la congelación ocurra. El punto de congelamiento de un solvente en una solución cambia conforme la concentración del soluto cambia. Este fenómeno se observa cuando al añadir impurezas a una sustancia, se observa una disminución en su punto de congelamiento.

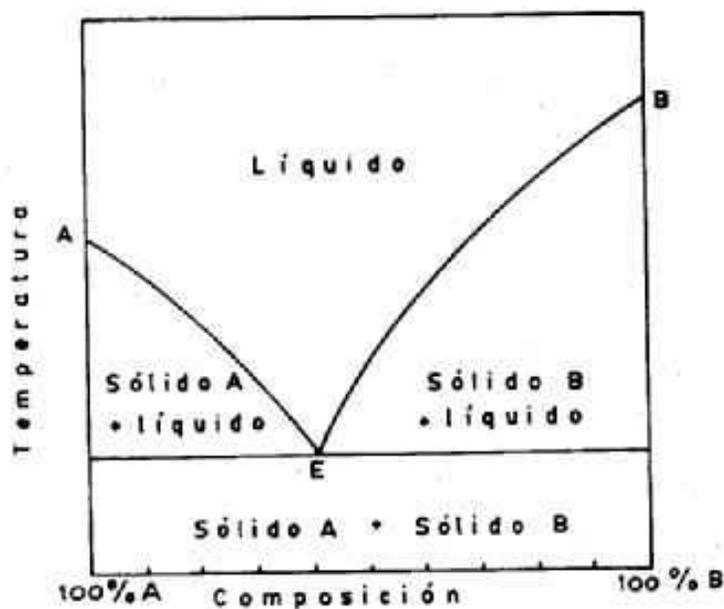
2.9. Punto eutéctico

El punto eutéctico es la temperatura más baja a la que una mezcla binaria puede seguir siendo líquida sin producirse la precipitación de cualquiera de sus componentes.

También se define como la temperatura más baja a la cual puede fundir una mezcla de sólidos A y B con una composición fija.

Figura 4.

Diagrama de fase sólido - líquido



Nota En el gráfico se observa el diagrama de fase sólido líquido para una mezcla binaria. Obtenido de Procesos Químicos 4 (2017). *Equilibrio de fases. Sistemas binarios.* (http://procesosquimicos4.blogspot.com/2017/12/equilibrio-de-fases-sistemas-binarios_14.html), consultado el 12 de abril de 2023. De dominio público.

2.10. Cloruro de sodio

Es un compuesto químico incoloro con buena solubilidad en agua, se representa con la fórmula NaCl. Es también llamada sal común o sal de mesa.

Se trata del mayor componente de la sal comestible, usada comúnmente desde la antigüedad como un condimento y preservante de comida. Además es una de las sales responsable de la salinidad del océano.

2.10.1. Usos del cloruro de sodio

El cloruro de sodio posee más de 14 000 usos conocidos. La industria de la sal generalmente la clasifica en cinco categorías principales, Sal de mesa y producción alimenticia, agricultura, tratamiento de agua, química, antihielo y deshielo. (Westphal et al., 2012).

2.10.2. Cloruro de sodio como agente Anti hielo y para el deshielo

El segundo uso más grande para el cloruro de sodio es el del deshielo de autopistas y calles. Es utilizado para mantener seguridad vial y movilidad durante condiciones de nieve y hielo en regiones de bajas temperaturas alrededor del mundo. El cloruro de sodio derrite el hielo a temperaturas menores a su punto de fusión en estado puro, hasta alcanzar su punto eutéctico de $-21.12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para el deshielo de autopistas y calles se utiliza sal seca, salmuera cercana al punto de saturación o sal pre humedecida, dependiendo de las condiciones de la calle o del ambiente (Westphal et al., 2012).

Esta solución es barata y ampliamente disponible como agente efectivo contra el hielo. Sin embargo se vuelve menos efectivo conforme la temperatura desciende por debajo de los $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. A temperaturas más bajas, es necesario aumentar la cantidad de sal aplicada para mantener el mismo grado de fusión (Westphal et al., 2012).

2.11. Laboratorio de Fisicoquímica

El Laboratorio de Fisicoquímica pertenece al Área de Fisicoquímica de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Este se encuentra ubicado en el tercer nivel del Edificio T5, Ciudad Universitaria, Zona 12 de la Ciudad de Guatemala.

El Laboratorio de Fisicoquímica es un laboratorio de docencia, de mucha importancia dentro de la formación práctica del ingeniero químico. Durante el desarrollo del curso se realizan prácticas experimentales en forma grupal para estudiar varios fenómenos fisicoquímicos que requerirán herramientas teóricas para la resolución de problemas (González, 2002).

En este laboratorio se realizan de manera sistemática ensayos experimentales con la finalidad de estudiar, en forma vivencial, diversos fenómenos fisicoquímicos mediante su caracterización cualitativa o cuantitativa desde el punto de vista de la investigación. Presentación e interpretación de resultados, análisis estadístico de información experimental y desarrollo de investigación además de trabajo en equipo.

En cada práctica, el estudiante aplica de forma ordenada las leyes estudiadas y conocidas del curso de Fisicoquímica 1 y 2, que rigen los fenómenos. También aplica los lineamientos establecidos en los instructivos y deriva otros con iniciativa propia (González, 2002).

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

A continuación se enumeran las variables dependientes e independientes relacionadas al estudio realizado.

3.1.1. Variables dependientes

Variable afectada por las variaciones en las variables independientes.

- Temperatura (°C)

3.1.2. Variables independientes

Variables cuya variación repercute en la variable dependiente.

- Tiempo (s)
- Concentración másica de NaCl (g de sustancia/ g de solución)

3.2. Delimitación del campo de estudio

- Área: Físicoquímica
- Industria: Laboratorio
- Proceso: implementación de una práctica de laboratorio que relacione la calorimetría con el equilibrio sólido líquido.

- Ubicación: el estudio y sus análisis se realizarán en el Laboratorio de Fisicoquímica, área de Fisicoquímica, Escuela de Ingeniería Química FIUSAC.

3.3. Recursos humanos disponibles

Investigador: Br. Luis Enrique Rodolfo Dell García
Asesor: Ing. Químico César Ariel Villela Rodas

3.4. Recursos materiales disponibles

A continuación, se muestran los recursos materiales disponibles.

3.4.1. Equipo

Véase el equipo por utilizar para el desarrollo de la investigación.

3.4.1.1. Medición

Consiste en la medición de los pesos de los componentes de las mezclas así como mediciones de temperatura.

- Balanza semianalítica
- Termómetro digital

3.4.1.2. Auxiliar

Equipos e instrumentos auxiliares para la realización del experimento.

- Calorímetro adiabático
- Triturador de hielo
- Congelador
- Mangueras para recircular agua
- Bomba para agua
- Plancha de calentamiento
- Soporte universal
- Espátula

3.4.2. Cristalería

A continuación, se muestran los instrumentos de cristalería utilizados.

3.4.2.1. Auxiliar

Cristalería auxiliar utilizada en la realización del experimento.

- Condensador
- Beaker de 50 mL
- Beaker de 100 mL
- Beaker de 500 mL
- Vidrio reloj
- Varilla de agitación
- Cabeza de destilación

3.4.3. Reactivos y materia prima

Ahora se muestran los reactivos utilizados en el desarrollo de la investigación.

3.4.3.1. Reactivos

Reactivos utilizados en la realización de las mezclas

- Cloruro de sodio grado reactivo
- Agua desmineralizada

3.5. Técnica cuantitativa o cualitativa

La investigación estará basada en las técnicas cuantitativas y cualitativas, porque el experimento va a estar influido por variables dependientes e independientes con valores numéricos.

3.5.1. Medición de temperatura de mezclas binarias expuestas al ambiente

Realizadas utilizando un termómetro de indicación digital.

- Pesar utilizando una balanza, la cantidad en masa necesaria de cloruro de sodio, colocándola en un beaker de 500 mL.
- Verter dentro de la licuadora aproximadamente 300 g de hielo y licuar hasta obtener un tamaño de partícula uniforme.

- Pesar en un beaker utilizando una balanza, la cantidad en masa necesaria de hielo triturado y añadir al beaker conteniendo NaCl.
- Mezclar utilizando la varilla de agitación hasta obtener una mezcla homogénea.
- Medir la temperatura de la mezcla cada 5 segundos hasta que se alcance el equilibrio.

3.5.2. Medición de temperatura de mezclas binarias dentro del calorímetro

Realizadas utilizando un termómetro de indicación digital.

- Pesar utilizando una balanza, la cantidad en masa necesaria de cloruro de sodio, colocándola en un beaker de 500 mL.
- Verter dentro de la licuadora aproximadamente 300 g de hielo y licuar hasta obtener un tamaño de partícula uniforme.
- Pesar en un beaker utilizando una balanza, la cantidad en masa necesaria de hielo triturado y añadir al beaker conteniendo el NaCl.
- Transferir el contenido del beaker al calorímetro y mezclar utilizando la varilla de agitación hasta obtener una mezcla homogénea.
- Medir la temperatura de la mezcla cada 5 segundos hasta que se alcance el equilibrio.

3.5.3. Recirculación de agua en sistema de enfriamiento para realizar destilación

Sistema diseñado para ahorro de agua al momento de realizar destilaciones.

- Armar el equipo de destilación tradicional
- Utilizando el calorímetro asignado, llenar de agua a temperatura ambiente hasta el nivel indicado, conectar mangueras de entrada y salida de agua al condensador.
- Preparar aproximadamente 600 g de mezcla de NaCl y hielo en el punto eutéctico y colocar en los recipientes asignados.
- Colocar los recipientes conteniendo las mezclas dentro del calorímetro, quedando cubiertos con el agua de refrigeración.
- Tapar el calorímetro y encender la bomba de recirculación de agua.
- Iniciar la destilación.

3.6. Recolección, ordenamiento y procesado de la información

Se utilizará el mismo tipo de ordenamiento, recolección y procesado de datos para las tres muestras de la experimentación.

Tabla 1.

Peso de los compuestos para la realización de mezclas

$\%_{NaCl}$	M_{NaCl} (g)	M_{H_2O} (g)
0	0	100
5	5	95
10	10	90
15	15	85
20	20	80
21	21	79
22	22	78
23	23	77
24	24	76
25	25	75

Nota. Peso de componentes a mezclar en los distintas concentraciones requeridas. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 2.

Temperaturas en el equilibrio de mezclas dentro del calorímetro

$\%_{NaCl}$	$T_{cal R1}$ (°C)	$T_{cal R2}$ (°C)	$T_{cal R3}$ (°C)
0	0	0.1	0
5	-4.6	-5.1	-4.7
10	-9.5	-10.2	-9.7
15	-14.5	-14.9	-14.7
20	-17.7	-17.8	-17.9
21	-18.9	-18.6	-19

Continuación tabla 2.

22	-20.2	-20.5	-19.9
23	-21.1	-20.9	-21.1
24	-20.6	-20.1	-20.4
25	-17.3	-17.1	-17.8

Nota. Datos de temperatura obtenidos de mezclas binarias del sistema agua destilada-cloruro de sodio dentro del calorímetro. Elaboración propia, con datos del Laboratorio de Físicoquímica, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, USAC, realizado con Excel.

Tabla 3.

Temperaturas en el equilibrio de mezclas expuestas al ambiente

$\%_{NaCl}$	$T_{exp R1}$ (°C)	$T_{exp R2}$ (°C)	$T_{exp R3}$ (°C)
0	0	0.1	0.1
5	-4.2	-4.9	-4.5
10	-9.2	-9.8	-9.4
15	-14.1	-14.5	-14.2
20	-17.4	-17	-17.3
21	-18.2	-18.5	-18.7
22	-19.5	-19.9	-19.8
23	-20.8	-21	-20.7
24	-20.1	-19.4	-19.8
25	-16.4	-16.7	-16.8

Nota. Datos de temperatura obtenidos de mezclas binarias del sistema agua destilada-cloruro de sodio expuestas al ambiente. Elaboración propia, con datos del Laboratorio de Físicoquímica, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, USAC, realizado con Excel.

Tabla 4.

Temperaturas del punto eutéctico de mezclas expuestas al ambiente

t (min)	$T_{exp R1}$ (°C)	$T_{exp R2}$ (°C)	$T_{exp R3}$ (°C)
0	-20.8	-20.7	-20.8
1	-19.6	-20.1	-19.8
2	-18.8	-19.5	-19.1
3	-17.9	-18.9	-18.4
4	-17.1	-18	-17.5
5	-16.3	-17.2	-16.6
6	-15.3	-16.5	-15.8
7	-14.5	-15.8	-14.7
8	-13.7	-15.2	-14
9	-13	-14.3	-13.4
10	-12.3	-13.5	-12.8
11	-11.8	-12.7	-12.3
12	-11.3	-12.3	-11.7
13	-10.8	-11.8	-11.1
14	-10.4	-11.3	-10.7

Continuacion de la tabla 4.

t (min)	$T_{exp R1}$ (°C)	$T_{exp R2}$ (°C)	$T_{exp R3}$ (°C)
15	-9.9	-10.8	-10.2
16	-9.5	-10.4	-9.9
17	-9.1	-10	-9.6
18	-8.7	-9.5	-8.9
19	-8.2	-9.1	-8.5
20	-7.7	-8.6	-8
21	-7.3	-8.2	-7.6
22	-6.8	-7.9	-7.2
23	-6.3	-7.5	-6.8
24	-5.8	-7.1	-6.3
25	-5.4	-6.6	-5.9
26	-4.9	-6.1	-5.3
27	-4.4	-5.6	-4.7
28	-4	-5	-4.4
29	-3.5	-4.6	-3.8
30	-3.1	-4.1	-3.5

Nota. Datos de temperaturas del punto eutéctico de mezclas binarias del sistema agua destilada-cloruro de sodio expuestas al ambiente. Elaboración propia, con datos del Laboratorio de Físicoquímica, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, USAC, realizado con Excel.

Tabla 5.

Temperatura del punto eutéctico de mezclas dentro del calorímetro

t (min)	T_{calR1} (°C)	T_{calR2} (°C)	T_{calR3} (°C)
0	-21.1	-21	-21.1
1	-21.1	-21	-21.1
2	-21.1	-21	-21.1
3	-21.1	-21	-21.1
4	-21.1	-21	-21.1
5	-21.1	-21	-21.1
6	-21.1	-21	-21
7	-21.1	-20.9	-21
8	-21	-20.9	-21
9	-21	-20.9	-21
10	-21	-20.9	-21
11	-21	-20.8	-20.9
12	-21	-20.8	-20.9
13	-21	-20.7	-20.9
14	-21	-20.7	-20.9
15	-20.9	-20.6	-20.8
16	-20.9	-20.5	-20.8
17	-20.9	-20.4	-20.8
18	-20.9	-20.3	-20.7
19	-20.9	-20.2	-20.7
20	-20.8	-20.1	-20.7
21	-20.8	-20	-20.6
22	-20.8	-19.9	-20.6
23	-20.7	-19.8	-20.6
24	-20.7	-19.7	-20.6
25	-20.7	-19.6	-20.5
26	-20.7	-19.5	-20.5
27	-20.7	-19.4	-20.5
28	-20.7	-19.3	-20.4
29	-20.6	-19.2	-20.4
30	-20.6	-19.1	-20.3

Nota. Datos de temperatura del punto eutéctico de mezclas binarias del sistema agua destilada-cloruro de sodio dentro del calorímetro. Elaboración propia, con datos del Laboratorio de Físicoquímica, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, USAC, realizado con Excel.

3.7. Análisis estadístico

El análisis estadístico permitirá evaluar los datos y comprenderlos, a continuación se realiza la descripción.

3.7.1. Diseño experimental

El diseño experimental estará constituido por 2 diferentes tratamientos de muestra en función de 10 niveles de concentración de estas. Además de 2 diferentes tratamientos de muestra en función de 31 mediciones de tiempo y se realizarán tres réplicas de cada muestra que constituirá la parte experimental de la investigación. Por lo tanto, se obtendrán 246 unidades experimentales.

3.7.2. Media aritmética

Cálculo de media aritmética para datos obtenidos

Donde:
$$\sigma = \frac{\sum_I^N X_I}{N}$$
 [Ec. 1]

\bar{x} = media

$\sum_I^N X_I$ = sumatoria de valores

N = número de datos

3.7.3. Desviación estándar

Cálculo de desviación estándar para datos obtenidos

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{N}}$$
 [Ec. 2]

Donde:

σ = desviación estándar

\bar{x} = valor promedio

x_i = valor de la muestra

N = número de datos

3.7.4. Varianza

Cálculo de varianza para datos obtenidos

$$\sigma^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{N} \quad [\text{Ec. 3}]$$

Donde:

σ^2 = varianza

\bar{x} = valor promedio

x_i = valor de la muestra

N = número de datos

3.7.5. Análisis de varianza

La prueba de hipótesis se realizará por medio del análisis de varianza a partir de la diferencia entre medias. Se asume que las varianzas son iguales de las k poblaciones. Se utiliza la tabla de ANOVA.

Tabla 6.

Prueba ANOVA

Fuentes	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F Prueba	F Crítica
Tratamientos	SST	k-1	MST	MST/MSE	F ($\alpha, k-1, n-1$)
Error	SSE	n-k	MSE		
Total	SStotal	n-1			

Nota. Parametros utilizados para la realización de análisis de variancia. Obtenido de R. Walpole (1999). *Probabilidad y estadística para ingenieros.* (p. 378). Pearson Educacion.

La comprobación de la hipótesis nula y alternativa se realizará utilizando el análisis de varianza de un factor por medio de Microsoft Excel, utilizando una significancia del 5 %.

3.8. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

A continuación, se presentan cálculos a partir de la información del laboratorio, tales como las temperaturas obtenidas de las mezclas efectuadas.

Tabla 7.*Temperatura ambiente para análisis de mezclas dentro del calorímetro*

$T_{cal R1}$ (°C)	$T_{cal R2}$ (°C)	$T_{cal R3}$ (°C)	T (°C) \bar{x}	T (°C) σ
24.9	25.4	24.6	25.0	0.40

Nota. Datos de temperatura ambiente de trabajo para análisis de mezclas binarias del sistema agua destilada-cloruro de sodio dentro del calorímetro. Elaboración propia, con datos del Laboratorio de Físicoquímica, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, USAC, realizado con Excel.

Tabla 8.*Análisis de temperaturas en el equilibrio de mezclas dentro del calorímetro*

% $NaCl$	$T_{cal R1}$ (°C)	$T_{cal R2}$ (°C)	$T_{cal R3}$ (°C)	T (°C) \bar{x}	T (°C) σ
0	0	0.1	0	0.0	0.06
5	-4.6	-5.1	-4.7	-4.8	0.26
10	-9.5	-10.2	-9.7	-9.8	0.36
15	-14.5	-14.9	-14.7	-14.7	0.20
20	-17.7	-17.8	-17.9	-17.8	0.10
21	-18.9	-18.6	-19	-18.8	0.21
22	-20.2	-20.5	-19.9	-20.2	0.30
23	-21.1	-20.9	-21.1	-21.0	0.12
24	-20.6	-20.1	-20.4	-20.4	0.25
25	-17.3	-17.1	-17.8	-17.4	0.36

Nota. Análisis estadístico de datos obtenidos. Elaboración propia, con datos del Laboratorio de Físicoquímica, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, USAC, realizado con Excel.

Tabla 9.

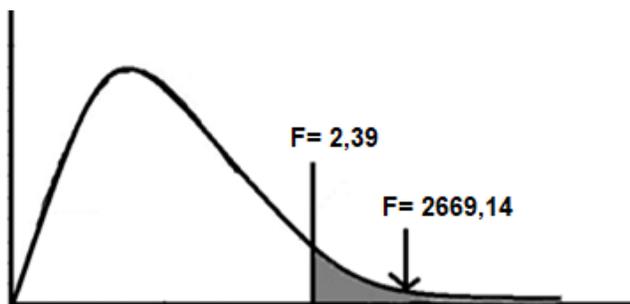
ANOVA de las temperaturas en el equilibrio de mezclas dentro del calorímetro

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor Crítico para F
Tratamientos	1,425.32	9	158.37	2,669.14	2.39
Error	1.19	20	0.06		
Total	1,426.51	29			

Nota. Analisis de varianza de las temperaturas en el equilibrio de mezclas binarias del sistema agua destilada-cloruro de sodio dentro del calorímetro. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 5.

Distribución F de temperaturas del sistema dentro del calorímetro



Nota. Distribución F de Fisher de las temperaturas en el equilibrio de mezclas binarias del sistema agua destilada-cloruro de sodio dentro del calorímetro. Elaboración propia, con base en la Tabla 9, realizado con Minitab.

Tabla 10.*Temperatura ambiente para análisis de mezclas expuestas al ambiente*

$T_{exp R1}$ (°C)	$T_{exp R2}$ (°C)	$T_{exp R3}$ (°C)	$T_{exp \bar{x}}$ (°C)	T (°C) σ
25.8	24.5	24.9	25.1	0.67

Nota. Análisis estadístico de temperatura ambiente a la que se trabajó en cada una de las repeticiones para el análisis de mezclas expuestas al ambiente, Elaboración propia, con datos del Laboratorio de Físicoquímica, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, USAC, realizado con Excel.

Tabla 11.*Análisis de temperaturas en el equilibrio de mezclas expuestas al ambiente*

%Nacl	$T_{exp R1}$ (°C)	$T_{exp R2}$ (°C)	$T_{exp R3}$ (°C)	$T_{exp \bar{x}}$ (°C)	T (°C) σ
0	0	0.1	0.1	0.1	0.06
5	-4.2	-4.9	-4.5	-4.5	0.35
10	-9.2	-9.8	-9.4	-9.5	0.31
15	-14.1	-14.5	-14.2	-14.3	0.21
20	-17.4	-17	-17.3	-17.2	0.21
21	-18.2	-18.5	-18.7	-18.5	0.25
22	-19.5	-19.9	-19.8	-19.7	0.21
23	-20.8	-21	-20.7	-20.8	0.15
24	-20.1	-19.4	-19.8	-19.8	0.35
25	-16.4	-16.7	-16.8	-16.6	0.21

Nota. Análisis estadístico de temperaturas en el equilibrio de mezclas binarias del sistema agua destilada-cloruro de sodio expuestas al ambiente. Elaboración propia, con datos del Laboratorio de Físicoquímica, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, USAC, realizado con Excel.

Tabla 12.

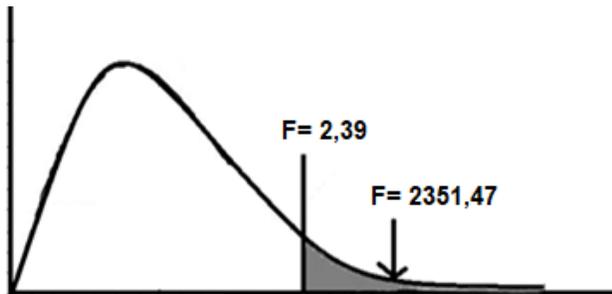
ANOVA de las temperaturas en el equilibrio de mezclas expuestas al ambiente

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico para F
Tratamientos	1,374.59	9	152.73	2,531.47	2.39
Error	1.21	20	0.06		
Total	1,375.79	29			

Nota. Analisis de variancia de las temperaturas en el equilibrio de mezclas binarias del sistema agua destilada-cloruro de sodio expuestas al ambiente. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 6.

Distribución F de las temperaturas del sistema expuestas al ambiente



Nota. Distribución F de Fisher de las temperaturas en el equilibrio de mezclas binarias del sistema agua destilada-cloruro de sodio dentro del calorímetro. Elaboración propia, en base a la Tabla 12, Realizado con Minitab.

Tabla 13.*Temperatura del punto eutéctico de mezclas dentro del calorímetro*

t (min)	$T_{cal R1}$ (°C)	$T_{cal R2}$ (°C)	$T_{cal R3}$ (°C)	T (°C) \bar{x}	T (°C) σ
0	-21.1	-21	-21.1	-21.07	0.06
1	-21.1	-21	-21.1	-21.07	0.06
2	-21.1	-21	-21.1	-21.07	0.06
3	-21.1	-21	-21.1	-21.07	0.06
4	-21.1	-21	-21.1	-21.07	0.06
5	-21.1	-21	-21.1	-21.07	0.06
6	-21.1	-21	-21	-21.03	0.06
7	-21.1	-20.9	-21	-21.00	0.10
8	-21	-20.9	-21	-20.97	0.06
9	-21	-20.9	-21	-20.97	0.06
10	-21	-20.9	-21	-20.97	0.06
11	-21	-20.8	-20.9	-20.90	0.10
12	-21	-20.8	-20.9	-20.90	0.10
13	-21	-20.7	-20.9	-20.87	0.15
14	-21	-20.7	-20.9	-20.87	0.15
15	-20.9	-20.6	-20.8	-20.77	0.15
16	-20.9	-20.5	-20.8	-20.73	0.21
17	-20.9	-20.4	-20.8	-20.70	0.26
18	-20.9	-20.3	-20.7	-20.63	0.31
19	-20.9	-20.2	-20.7	-20.60	0.36
20	-20.8	-20.1	-20.7	-20.53	0.38
21	-20.8	-20	-20.6	-20.47	0.42
22	-20.8	-19.9	-20.6	-20.43	0.47
23	-20.7	-19.8	-20.6	-20.37	0.49
24	-20.7	-19.7	-20.6	-20.33	0.55
25	-20.7	-19.6	-20.5	-20.27	0.59
26	-20.7	-19.5	-20.5	-20.23	0.64
27	-20.7	-19.4	-20.5	-20.20	0.70
28	-20.7	-19.3	-20.4	-20.13	0.74
29	-20.6	-19.2	-20.4	-20.07	0.76
30	-20.6	-19.1	-20.3	-20.00	0.79

Nota. Datos experimentales obtenidos de temperatura de punto eutéctico de las mezclas del sistema agua destilada-cloruro de sodio dentro del calorímetro, Laboratorio de Físicoquímica, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, USAC. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 14.

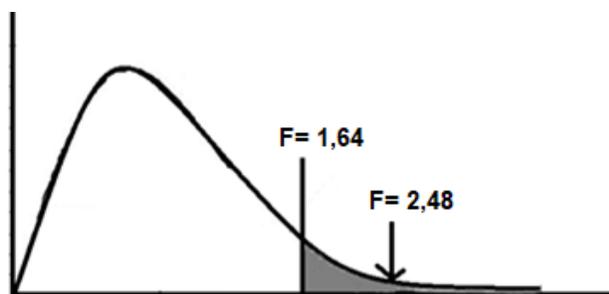
ANOVA de temperaturas de mezclas en calorímetro en función del tiempo

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico para F
Tratamientos	10.92	9	0.36	2.48	1.64
Error	9.10	20	0.15		
Total	20.02	29			

Nota. Datos obtenidos de ANOVA de las temperaturas de mezclas binarias del sistema agua destilada-cloruro de sodio dentro del calorímetro en función del tiempo, Laboratorio de Físicoquímica, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, USAC. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 7.

Distribución F de mezclas dentro del calorímetro en función del tiempo



Nota. Distribución F de Fisher de las temperaturas de mezclas binarias del sistema agua destilada-cloruro de sodio dentro del calorímetro en función del tiempo. Elaboración propia, con base en la tabla 14, realizado con Minitab.

Tabla 15.*Temperatura del punto eutéctico de mezclas expuestas al ambiente*

t (min)	$T_{exp R1}$ (°C)	$T_{exp R2}$ (°C)	$T_{exp R3}$ (°C)	T (°C) \bar{x}	T (°C) σ
0	-20.8	-20.7	-20.8	-20.77	0.06
1	-19.6	-20.1	-19.8	-19.83	0.25
2	-18.8	-19.5	-19.1	-19.13	0.35
3	-17.9	-18.9	-18.4	-18.40	0.50
4	-17.1	-18	-17.5	-17.53	0.45
5	-16.3	-17.2	-16.6	-16.70	0.46
6	-15.3	-16.5	-15.8	-15.87	0.60
7	-14.5	-15.8	-14.7	-15.00	0.70
8	-13.7	-15.2	-14	-14.30	0.79
9	-13	-14.3	-13.4	-13.57	0.67
10	-12.3	-13.5	-12.8	-12.87	0.60
11	-11.8	-12.7	-12.3	-12.27	0.45
12	-11.3	-12.3	-11.7	-11.77	0.50
13	-10.8	-11.8	-11.1	-11.23	0.51
14	-10.4	-11.3	-10.7	-10.80	0.46
15	-9.9	-10.8	-10.2	-10.30	0.46
16	-9.5	-10.4	-9.9	-9.93	0.45
17	-9.1	-10	-9.6	-9.57	0.45
18	-8.7	-9.5	-8.9	-9.03	0.42
19	-8.2	-9.1	-8.5	-8.60	0.46
20	-7.7	-8.6	-8	-8.10	0.46
21	-7.3	-8.2	-7.6	-7.70	0.46
22	-6.8	-7.9	-7.2	-7.30	0.56
23	-6.3	-7.5	-6.8	-6.87	0.60
24	-5.8	-7.1	-6.3	-6.40	0.66
25	-5.4	-6.6	-5.9	-5.97	0.60
26	-4.9	-6.1	-5.3	-5.43	0.61
27	-4.4	-5.6	-4.7	-4.90	0.62
28	-4	-5	-4.4	-4.47	0.50
29	-3.5	-4.6	-3.8	-3.97	0.57
30	-3.1	-4.1	-3.5	-3.57	0.50

Nota. Datos experimentales de temperatura de punto eutéctico de mezclas del sistema Agua destilada-cloruro de sodio expuestas al ambiente, Laboratorio de Físicoquímica, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, USAC. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 16.

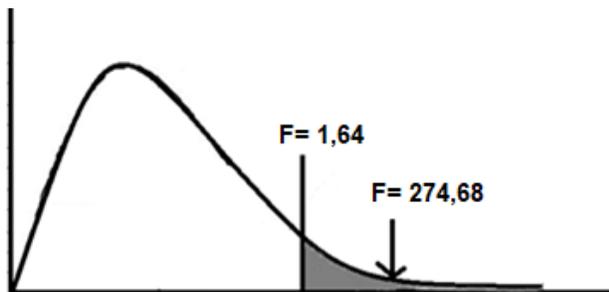
ANOVA de mezclas expuestas al ambiente en función del tiempo

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico para F
Tratamientos	2,273.63	30	75.79	274.68	1.64
Error	17.11	62	0.28		
Total	2,290.74	92			

Nota. Datos obtenidos de ANOVA de temperaturas de mezclas del sistema agua destilada-cloruro de sodio, expuestas al ambiente en función del tiempo. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 8.

Distribución F de mezclas expuestas al ambiente en función del tiempo



Nota. Diagrama de distribución F de Fischer para temperaturas del sistema agua destilada-cloruro de sodio expuesta al ambiente y en función del tiempo. Elaboración propia, con base en la tabla 16, realizado con Minitab.

Para realizar el análisis de varianza (ANOVA), se siguió una distribución de Fisher con un nivel de confianza del 95 %, para evaluar la aceptabilidad o rechazo de cada una de las hipótesis estadísticas planteadas se tomó en cuenta

el siguiente criterio: si la F es mayor a la F crítica se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, si la F es menor que la F crítica se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alternativa.

Lo cual se demuestra en las figuras de régimen crítico del análisis, donde se acepta la hipótesis nula cuando está en el rango de aceptabilidad, y se acepta la hipótesis alternativa cuando esta entra en el rango sombreado de gris.

Tabla 17.

Resumen de resultados de análisis ANOVA

Análisis	F	F crítico	Cumplimiento de hipótesis	
			Nula	Alternativa
La temperatura de las mezclas dentro del calorímetro en función de la composición de estas.	2,669.4	2.39		X
La temperatura de las mezclas expuestas al ambiente en función de la composición de estas.	2,531.47	2.39		X
La temperatura de las mezclas dentro del calorímetro en función del tiempo	2.48	1.64		X
La temperatura de las mezclas expuestas al ambiente en función del tiempo	274.68	1.64		X

Nota. Tabla de resumen de resultados obtenidos de análisis de varianza, elaboración propia. realizado con Excel.

3.8.1. Programas por utilizar para el análisis de datos

A continuación, se muestran los programas por utilizar para el análisis de datos.

3.8.1.1. Microsoft Word 2016

Se utilizará este programa para editar y presentar el informe con los resultados obtenidos en este trabajo de investigación.

3.8.1.2. Microsoft Excel 2016

Se utilizará como una hoja electrónica que permitirá automatizar diversas operaciones matemáticas y parámetros estadísticos como media aritmética, desviación estándar y los análisis de varianza correspondientes para la evaluación de las hipótesis de este trabajo de investigación.

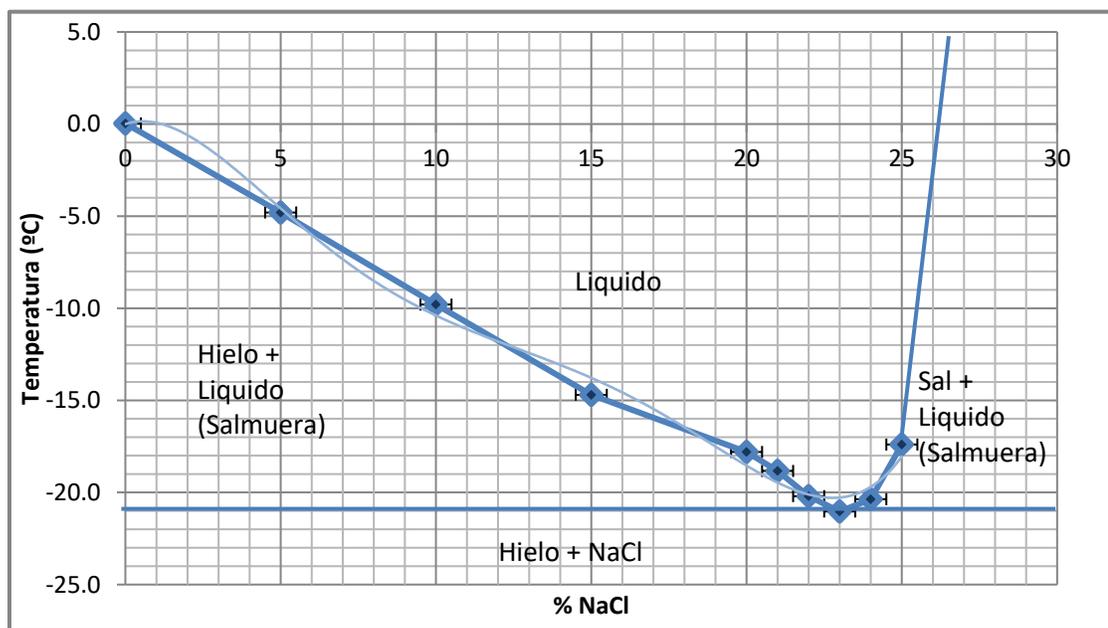
4. RESULTADOS

4.1. Diagramas de fase sólido-líquido de mezclas de cloruro de sodio-hielo dentro del calorímetro y expuestas al ambiente

A continuación se observa el comportamiento de las mezclas en función de su composición y las temperaturas alcanzadas por estas.

Figura 9.

Diagrama de fase sólido - líquido de mezclas dentro del calorímetro



Nota. El gráfico ilustra el comportamiento de la temperatura alcanzada por las mezclas de cloruro de sodio-hielo dentro del calorímetro según su composición. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 18.

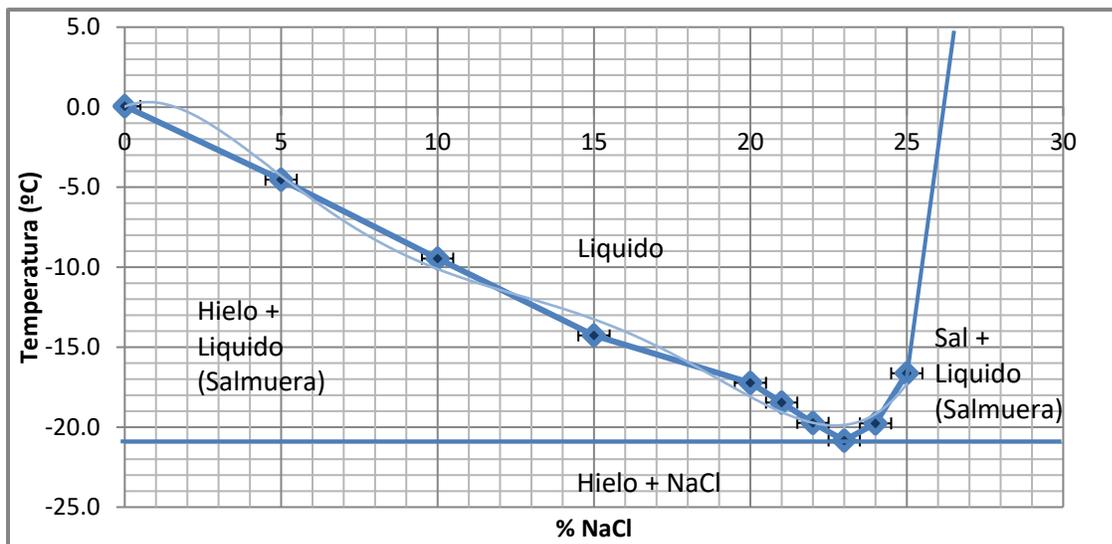
Descripción de la figura 9

Variable Dep.	Variable Indep.	Modelo Matemático	R ²	Incerteza máxima	
				Variable Dep.	Variable Indep.
T(°C)	% _{NaCl}	$T = 5 * 10^{-5}(\%_{NaCl}^5) - 0,0029(\%_{NaCl}^4) + 0,0617(\%_{NaCl}^3) - 0,5342(\%_{NaCl}^2) + 0,5436(\%_{NaCl}) - 0,0013$	0.9923	0.2	0.5

Nota. Descripción de variables involucradas y modelo matemático obtenido de Figura 9. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 10.

Diagrama de fase sólido - líquido de mezclas expuestas al ambiente



Nota. El gráfico ilustra el comportamiento de la temperatura alcanzada por las mezclas de cloruro de sodio-hielo expuestas al ambiente según su composición.. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 19.*Descripción de la figura 10*

Variable Dep.	Variable Indep.	Modelo Matemático	R ²	Incerteza máxima	
				Variable Dep.	Variable Indep.
T(°C)	% _{NaCl}	$T = 5 * 10^{-5}(\%_{NaCl}^5) - 0,0033(\%_{NaCl}^4)$ $+ 0,07(\%_{NaCl}^3)$ $- 0,6078(\%_{NaCl}^2)$ $+ 0,8008(\%_{NaCl})$ $+ 0,0291$	0.9905	0.2	0.5

Nota. Descripción de variables involucradas y modelo matemático obtenido de Figura 10. Elaboración propia, realizado con Excel.

En la tabla 20 se muestra el punto eutéctico de las mezclas de cloruro de sodio-hielo tanto dentro del calorímetro como al contacto con el ambiente.

Tabla 20.*Punto eutéctico de mezclas de cloruro de sodio - hielo*

	Temperatura (°C)	Composición (X _a)
Calorímetro	-21.0	0.23
En contacto con el ambiente	-20.8	0.23

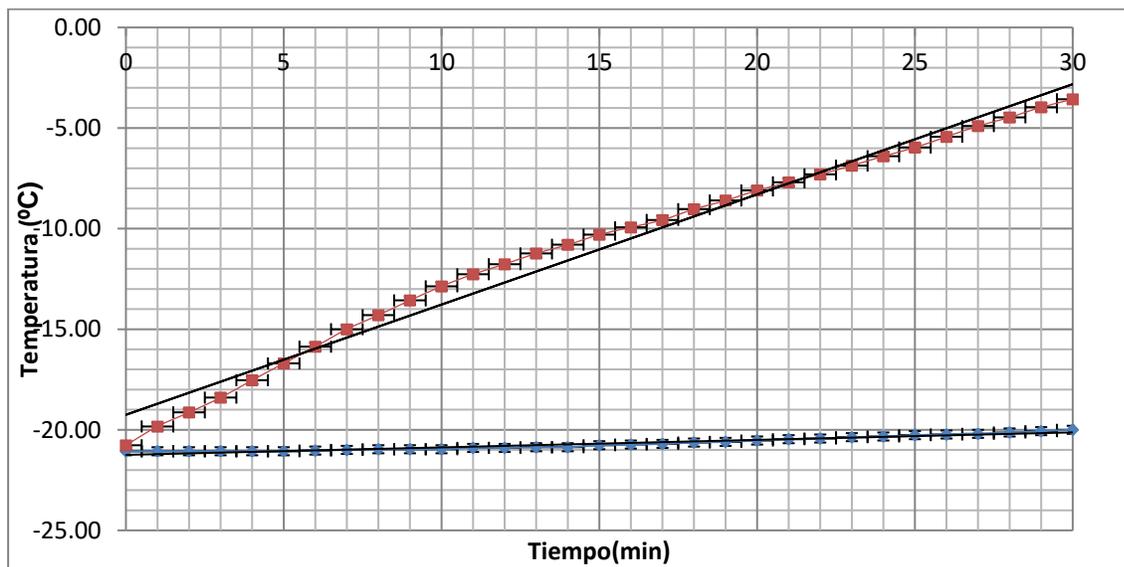
Nota. Temperaturas obtenidas del punto eutéctico. Elaboración propia, realizado con Excel.

4.2. Razón de calentamiento de las mezclas en el punto eutéctico en función del tiempo, modelo de enfriamiento de Newton de las mezclas en el punto eutéctico y la transferencia de calor por conducción según la ley de Fourier

En la figura 11, se muestra el comportamiento de la razón de calentamiento de las mezclas en el punto eutéctico de cloruro de sodio-hielo en función del tiempo.

Figura 11.

Razón de calentamiento en función del tiempo



Nota. Diagrama comparativo de la razón de calentamiento obtenido de las mezclas en el punto eutéctico en función del tiempo. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 21.*Descripción de la figura 11*

	Color	Variable Dep.	Variable Indep.	Modelo Matemático	R ²	Incerteza máxima	
						Variable Dep.	Variable Indep.
Calorímetro		T(°C)	t(min)	$T = 0,5478t - 19,254$	0.982	0.2	0.5
Expuesto al ambiente		T(°C)	t(min)	$T = 0,0373t - 21,247$	0.9467	0.2	0.5

Nota. Descripción de variables involucradas y modelo matemático obtenido de Figura 11. Elaboración propia, realizado con Excel.

Se muestra en la tabla 22, el modelo de calentamiento de Newton de las mezclas de cloruro de sodio-hielo en el punto eutéctico en función del tiempo.

Tabla 22.*Modelo de calentamiento de Newton de las mezclas en el punto eutéctico*

	Modelo
Calorímetro	$T_t = 25 - 46,07 e^{-1,30553 \cdot 10^{-5} \cdot t}$
En contacto con el ambiente	$T_t = 25,1 - 45,9 e^{-2,71226 \cdot 10^{-4} \cdot t}$

Nota. Modelo matemático que permite al ingresar un valor de tiempo, poder predecir la temperatura que se alcanzará en el sistema en ese tiempo. Elaboración propia.

En la tabla 23, se muestra la transferencia de calor por conducción según la ley de Fourier para las mezclas en el punto eutéctico.

Tabla 23.*Transferencia de calor para mezclas en el punto eutéctico*

	$\dot{Q}_x \left(\frac{J}{s}\right)$
Calorímetro	6.27
En contacto con el ambiente	272.36

Nota. Comparativo de energía transferida en forma de calor mediante conducción según la ley de Fourier. Elaboración propia.

4.3. Estimación del ahorro monetario obtenido al implementar del sistema de recirculación de agua

Se muestra en la Tabla 24, el ahorro monetario anual, estimado al implementar el sistema de recirculación de agua para las prácticas de destilación.

Tabla 24.*Ahorro monetario estimado anual*

	Costo anual de agua (GTQ)	Costo anual de electricidad (GTQ)	Costos totales (GTQ)
Sistema de recirculación	0.60	6.57	7.17
Agua de grifo	288.92	0	288.92
Ahorro (GTQ)	281.75		
Ahorro (porcentaje)	97.52		

Nota. Comparativo de costos anuales de operación, sistema tradicional y sistema propuesto de recirculación. Elaboración propia.

4.4. Análisis de varianza de los resultados obtenidos

Análisis de varianza de un factor para la relación entre la temperatura de mezclas en función de la composición y para la comparación entre utilizar un calorímetro y exponer las mezclas al ambiente.

Tabla 25.

Resumen de resultados de ANOVA

Análisis	F	F crítico	Cumplimiento de hipótesis	
			Nula	Alternativa
La temperatura de las mezclas dentro del calorímetro en función de la composición de estas.	2,669.14	2.39		X
La temperatura de las mezclas expuestas al ambiente en función de la composición de estas.	2,531.47	2.39		X
La temperatura de las mezclas dentro del calorímetro en función del tiempo	2.48	1.64		X
La temperatura de las mezclas expuestas al ambiente en función del tiempo	274.68	1.64		X

Nota. Resumen de resultados análisis estadístico mediante análisis de varianza. Elaboración propia, realizado con Excel.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El presente trabajo tuvo como fin principal la realización de una práctica integral en el curso de Fisicoquímica 2 que permita englobar varios temas de interés para el estudiante mientras se reduce el consumo de recursos, a su vez que se sustituyen reactivos potencialmente peligrosos por reactivos inertes.

Para esto se analizaron mezclas binarias homogéneas de cloruro de sodio y hielo, los cuales son reactivos inertes, de amplia disponibilidad y de costo accesible.

Esta mezcla es conocida como salmuera cuando su concentración es superior al 5 %, siendo su principal uso, como materia prima en la fabricación de químicos como cloro, hidróxido de sodio y carbonatos de sodio, su segundo uso principal es como medida anti hielo en calles y carreteras con el fin de mantener la movilidad y seguridad vial durante las condiciones de hielo y nieve en regiones del cinturón de nieve a lo largo del mundo. El cloruro de sodio (NaCl) funde el hielo hasta temperaturas tan bajas como el del punto eutéctico de la mezcla, siendo este de -21.1°C . (Westphal et al., 2012, pp. 355-356)

Las mezclas se realizaron a distintas concentraciones comparando los efectos de la transferencia de calor sobre la temperatura de estas haciendo uso de un calorímetro adiabático y de un sistema abierto.

Asimismo se utilizó el conocimiento obtenido del punto eutéctico de la mezcla para utilizarla en un sistema cerrado de recirculación de agua para refrigerar un sistema de destilación, evaluando el ahorro en costos de operación, para proponer su implementación en la realización de prácticas de laboratorio en el laboratorio de fisicoquímica.

A continuación se interpretan las gráficas y los resultados de los experimentos mencionados anteriormente.

5.1. Diagramas de fase sólido-líquido de mezclas de cloruro de sodio-hielo dentro del calorímetro y expuestas al ambiente

Mediante el experimento realizado se efectuó la equivalencia a las prácticas de calorimetría y equilibrio sólido líquido, ya que se estudian los efectos de la transferencia de calor entre un sistema expuesto al ambiente y uno adiabático en función del tiempo, mientras a su vez se evalúa el efecto de la composición de las mezclas sobre su temperatura de fusión.

Se tenía planificado realizar mezclas del sistema cloruro de sodio-hielo en intervalos de concentración de 5 % hasta llegar al 100 % de cloruro de sodio, pero se encontró que “el punto de saturación es de 26.3 % de cloruro de sodio” (Westphal et al., 2012, p. 321), por lo que, “se requieren temperaturas muy altas para la fusión, además de producirse vapores potencialmente peligrosos de ácido clorhídrico y óxido de sodio” (Lewis & Sax, 2004, p. 3239), y se realizó el diagrama hasta antes del punto de saturación.

Se observó una temperatura mínima al 20 % de cloruro de sodio (NaCl), aumentando de temperatura hacia el 25 %, por lo que, se subdividió este intervalo mediante la realización de mezclas cada 1 %, para de esta manera identificar de

mejor manera el punto eutéctico. En las figuras 5 y 6 se muestran los diagramas de fase sólido-líquido de las mezcla de cloruro de sodio y hielo dentro del calorímetro y expuestas al ambiente respectivamente, obteniéndose según lo observado en estos diagramas y representado en la tabla 20 que el punto eutéctico se encuentra a una composición del 23 % de cloruro de sodio, la temperatura alcanzada dentro del calorímetro fue de $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ y de $-20.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ al estar expuestas al ambiente.

Esta diferencia en temperaturas se debe a que al estar expuestas las mezclas al ambiente absorben calor de los alrededores afectando la temperatura. En el caso del calorímetro, este cuenta con paredes adiabáticas lo que permite que la transferencia de calor con los alrededores sea casi nula por lo que no se afecta la temperatura.

5.2. Razón de calentamiento de las mezclas en el punto eutéctico en función del tiempo, modelo de enfriamiento de Newton de las mezclas en el punto eutéctico y la transferencia de calor por conducción según la ley de Fourier

En la figura 7 se observa que la temperatura de las mezclas expuestas al ambiente aumentó de manera considerable en función del tiempo, en el caso de las mezclas dentro del calorímetro se observó que la temperatura mostró un comportamiento constante. Esto debido a que el calorímetro es considerado un sistema aislado en el que la transferencia de calor respecto de los alrededores es relativamente despreciable. Esto se confirma al observar los datos de la tabla 23 donde se muestra que la transferencia de calor mediante conducción tuvo un valor de 6.2686 J/s en el caso de las mezclas dentro del calorímetro, mientras que de 272.3565 J/s para las mezclas expuestas al ambiente.

Mediante el modelo de enfriamiento de Newton, que puede ser aplicado tanto para modelar el comportamiento de enfriamiento como de calentamiento de cuerpos en relación a la temperatura del medio, se obtuvieron modelos útiles para predecir el comportamiento de la temperatura de las mezclas en el punto eutéctico en función del tiempo, observándose estos modelos en la tabla 22.

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

Al utilizar el equipo de circuito cerrado de agua de enfriamiento, se evidenció que no existe consumo de agua significativo, por lo que, los costos monetarios los representa la energía eléctrica requerida para funcionar tanto el triturador de hielo como la bomba de agua. Para determinar estos costos se consideraron las tarifas de EMPAGUA (6.27 GTQ/m³) y EEGSA (1.34 GTQ/kWh). Además, se consideró una duración de la práctica de 4 horas, realizándose 48 prácticas al año. Según se muestra en la Tabla 15, los costos anuales por el consumo de los respectivos recursos fue de 7.17 GTQ al utilizar el equipo de refrigeración y 288.92 GTQ al utilizar agua del grifo. Utilizar el equipo de refrigeración representa entonces un ahorro de 97.52 % respecto al costo de utilizar agua del grifo.

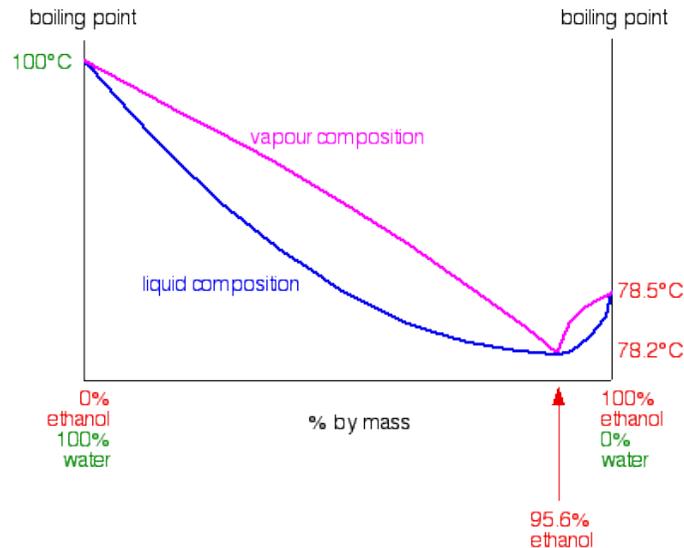
La recirculación de agua enfriada en un calorímetro, utilizando mezclas eutécticas, para la reducción en el consumo de agua, en el uso de condensadores, mediante el uso de un sistema de bombeo, fue realizada con resultados positivos, se efectuó una destilación de alcohol al 50 %, la cual duró 3 horas, con un volumen total de agua a recircular de 2 L, utilizando 3 recipientes conteniendo 200 g de mezcla cada uno, se obtuvo, que la temperatura inicial del agua a recircular fue de 12 °C, al ser enfriada por las mezclas eutécticas y de 24 °C al finalizarse la destilación, por lo que es factible la implementación de este

sistema en el desarrollo de las prácticas de laboratorio que involucren el uso de sistemas de destilación para de esta manera reducir el costo económico y de recursos.

Se puede observar en la figura 8 el Diagrama de fase Líquido-vapor para la mezcla etanol-agua, donde se observa que la temperatura más alta requerida para realizar la destilación es de 100 °C y la menor 78.2 °C, y se puede de esta manera corroborar el hecho que aun después de finalizada la destilación de 3 horas, el sistema de enfriamiento esta aun en la capacidad de remover el calor necesario para enfriar el sistema, por lo que es seguro para su implementacion aun si las destilaciones duraran más tiempo y que se mantiene un gradiente de temperatura de más de 54 °C durante todo el proceso.

Figura 12.

Diagrama de fase Líquido - vapor para la mezcla etanol – agua



Nota. Diagrama en que se observa la temperatura a la cual se da el cambio de fase de la mezcla etanol-agua. Obtenido de J. Clark (2020). *Fractional Distillation of Non-ideal Mixtures* [Destilación fraccionada de mezclas no ideales]. (<https://chem.libretexts.org/@go/page/78268>), consultado el 18 de marzo de 2023. De dominio publico.

5.4. Diferencia significativa de las temperaturas de las mezclas

Se determinó si las temperaturas de las mezclas eran dependientes o independientes a tanto la composición como el tiempo, es decir, si la variable respuesta presenta un efecto significativo ante tal variable de control. Caso en el cual, únicamente puede determinarse mediante herramientas estadísticas aplicado al conjunto de datos calculados y obtenidos en las muestras.

Por ello, se realizó un análisis de varianza (denominado como ANOVA), para determinar si las temperaturas encontradas para cada conjunto de muestras

correspondían con esta dependencia o no, mediante la prueba de distribución de Fisher, basada en el empleo de estimaciones poblacionales y grados de libertad de la agrupación de datos.

En la tabla 25, puede observarse el resumen de resultados de análisis ANOVA que confirma que las temperaturas de las muestras son significativamente diferentes entre sí, concluyendo que poseen una dependencia con la concentración de estas y con el tiempo y por ende, se puede afirmar el cumplimiento de las hipótesis alternativas descritas en la sección de hipótesis.

Esto se puede comprobar al observar que el valor F para las mezclas dentro del calorímetro y expuestas al ambiente, en función de su composición tienen valores de 2,669.14 y 2,531.47 respectivamente, para cada caso es mayor al F crítico del estudio, para un nivel de significancia establecido del 5 %.

Esto se puede comprobar al observar que el valor F para las mezclas dentro del calorímetro y expuestas al ambiente, en función del tiempo tienen valores de 2.48 y 274.68 respectivamente, para cada caso es mayor al F crítico del estudio, para un nivel de significancia establecido del 5 %.

CONCLUSIONES

1. El punto eutéctico de las mezclas se determinó a concentración de 23 % de cloruro de sodio con temperatura de $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ dentro del calorímetro y de $-20.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ al estar expuestas al ambiente, mostrando concordancia el punto eutéctico establecido por la teoría.
2. La transferencia de calor al ambiente de las mezclas en el calorímetro es relativamente baja, comparado con las muestras expuestas al ambiente, mostrándose una transferencia de calor por conducción de 6.2686 J/s en el caso de las mezclas dentro del calorímetro, mientras que de 272.3565 J/s para las mezclas expuestas al ambiente.
3. El sistema de recirculación de agua de enfriamiento planteado para su implementación en las prácticas de destilación es viable, representando un ahorro del 97.52 % respecto al sistema convencional de flujo continuo de agua del grifo.
4. La práctica integral es posible implementarla en el laboratorio de fisicoquímica, con la limitante del punto de saturación de 26.3 % cloruro de sodio en hielo, esto no afecta al estudio planteado, ya que se buscaba la aplicación del aprovechamiento energético del punto eutéctico de las mezclas, en un sistema de refrigeración por recirculación.
5. Existe diferencia significativa en la temperatura de las mezclas al variar la composición de estas, así como al variar el tiempo dentro del calorímetro y de exposición al ambiente.

RECOMENDACIONES

1. Sustituir el cloruro de sodio por cloruro de calcio en caso de necesitar una mezcla para aplicaciones que requieran temperaturas más bajas.
2. Determinar el efecto de utilizar diversos tipos de sales con contaminantes añadidos sobre la temperatura de las mezclas
3. Asegurar la homogeneidad de las mezclas en el estado líquido, evitando que aun existan cristales de hielo o cloruro de sodio no disueltos, que pudieran afectar la composición de la mezcla y por lo tanto la temperatura alcanzada.

REFERENCIAS

- Cancinos, J. (2017). *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*. [Tesis de licenciatura], Universidad de San Carlos de Guatemala. Repositorio institucional.
- Cengel, Y. (2007). *Transferencia de calor y masa*. McGraw-Hill Interamericana.
- Cengel, Y. & Boles, M. (2011). *Termodinámica*. McGraw-Hill Interamericana.
- Gonzales, J., Lira, L., y Sanchez, A. (del 27 al 29 de octubre de 2010). Calorimetría adiabática y sus aplicaciones [sesión de simposio]. *Simposio de metrología*. Centro Nacional de Metrología, México.
- González, A. (2002). *Desarrollo de una propuesta de sistema de gestión ambiental de acuerdo a la norma iso 14001:2004 como herramienta de educación ambiental en el laboratorio de fisicoquímica de la escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala Facultad de ingeniería*. Guatemala. [Tesis de licenciatura], Universidad de San Carlos de Guatemala. Repositorio institucional.
- Lewis, R.J., & Sax, N. I. (2004). *Sax's dangerous properties of industrial materials* [Propiedades peligrosas del Sax de los materiales industriales]. J. Wiley & Sons, Hoboken.

Martínez, E., Lacaze, J., Cisneros, M., y Valtierra, S. (2004). Efecto del estroncio en las temperaturas de reacción eutécticas y microestructuras de solidificación de una aleación Al-Si tipo A319. *Revista Facultad de Ingeniería*, 12(2), pp. 21-26. Universidad de Tarapacá Arica, Chile.

Petrucci R. H., Harwood W. S., & Herring F. G. (2002). *Química General: principios y aplicaciones modernas*. Pearson Prentice Hall.

Robustillo, M. D., Barbosa, D., Meirelles, A. J. A., y Pessoa Filho, P. A. (2014). *Estudio del equilibrio sólido-líquido de mezclas binarias formadas por miristato de etilo y compuestos representativos del diesel de petróleo*. Blucher Chemical Engineering Proceedings. Sao Paulo.

Santos, J. (2017). *Optimización de la energía eléctrica específica consumida en el proceso de destilación de agua en un destilador clásico marca barnstead™ modelo a1007, utilizando el procedimiento para 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*. [Tesis de licenciatura], Universidad de San Carlos de Guatemala. Repositorio institucional.

Westphal, G., Kristen, G., Wegener, W., Ambatiello, P., Geyer, H. & Epron, B. (2012). Sodium Chloride. Ullmann's *Encyclopedia of Industrial Chemistry* [Cloruro de sodio. Enciclopedia de Química Industrial Ullmann]. Vol. 33. J. Wiley & Sons.

APÉNDICES

Apéndice 1.

Metodología de cálculo

1.1. Cálculo de datos promedio

Para realizar las gráficas de temperatura en función del tiempo se determinó el promedio de los datos tabulados, el promedio se calculó de la siguiente forma:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad [\text{Ecuación No. 1}]$$

Ejemplo: determinar la temperatura promedio del punto eutéctico de las muestras dentro del calorímetro, si las temperaturas respectivas fueron de $T(^{\circ}\text{C}) = -21.1, -20.9$ y -21.1

$$x = \frac{(-21.1 + -20.9 + -21.1)(^{\circ}\text{C})}{3} = -21^{\circ}\text{C}$$

Los datos de las gráficas de Temperatura en función de composición de mezcla, entalpía, entropía y capacidad calorífica se calcularon de la misma manera.

1.2. Cálculo de la entalpía del calorímetro en función de la temperatura

Para determinar el cambio de entalpía para el calorímetro se realizó la deducción de la relación entre el cambio de entalpía y el calor para un proceso isobárico.

$$\Delta U = Q + W \quad [\text{Ecuación No. 2}]$$

Continuación del apéndice 1.

$$H = U + PV \text{ [Ecuación No. 3]}$$

Para un proceso infinitesimal la ecuación No. 2 y 3 se definen como:

$$\begin{aligned} dU &= dq - PdV \\ dH &= dU + PdV - VdP \end{aligned}$$

Realizando las sustituciones correspondientes se obtiene:

$$\begin{aligned} dH &= dq - PdV + PdV \\ dH &= dq \text{ [Ecuación No. 4]} \end{aligned}$$

Donde q se define mediante la siguiente relación:

$$q_p = m \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT \text{ [Ecuación No. 5]}$$

A partir de la ley de la conservación de la energía se establece que al ser un sistema adiabático:

$$q_{cal} + q_{H_2O i} + q_{H_2O \uparrow} = 0 \text{ [Ecuación No. 6]}$$

Para caracterizar el comportamiento de la entalpía del calorímetro en función de la temperatura, se determinó una entalpía de referencia ($H_{ref} = 0$ KJ) a la temperatura inicial del agua en el calorímetro, esto para encontrar un valor puntual de entalpía. A partir de la relación entre las ecuaciones No. 4, 5 y 6 se obtiene el cambio de entalpía del calorímetro.

$$\Delta H_{cal} = - \left[m_{H_2O \uparrow} \int_{T_{\uparrow}}^{T_{eq}} C_{p,H_2O} dT + m_{H_2O,cal} \int_{T_i}^{T_{eq}} C_{p,H_2O} dT \right]$$

Continuación del apéndice 1.

Ejemplo: calcular el cambio de entalpia para 100 g de agua en un calorímetro adiabático de pared doble a 23.4°C al añadirsele 50 g de agua a 85°C. La temperatura de equilibrio es 41.1°C. El calor específico del agua se rige por el modelo matemático $C_{p_{H_2O}}\left(\frac{J}{g^{\circ}C}\right) = 4 * 10^{-5}T^2 - 0.0025T + 4.2188$

$$\Delta H_{cal} = - \left[50g \int_{85^{\circ}C}^{41.1^{\circ}C} (4 * 10^{-5}T^2 - 0.0025T + 4.2188) \left(\frac{J}{g^{\circ}C}\right) dT \right. \\ \left. + 100g \int_{23.4^{\circ}C}^{41.1^{\circ}C} (4 * 10^{-5}T^2 - 0.0025T + 4.2188) \left(\frac{J}{g^{\circ}C}\right) dT \right]$$

$$\Delta H_{cal} = 1877.36 J$$

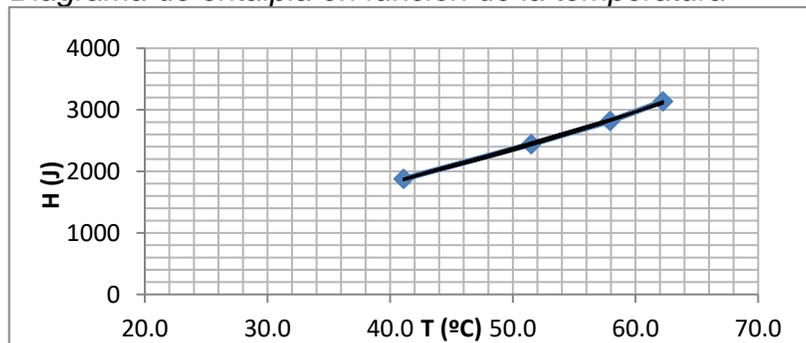
Se determinó H1 al despejar de la siguiente relación $\Delta H1 = H1 - H_{ref}$, tomando $H_{ref}=0$

$$H1 = 1877.36 J$$

1.3. Cálculo de la capacidad calorífica del calorímetro

Realizado a partir de relacionar los datos de entalpia y temperatura.

Diagrama de entalpia en función de la temperatura



Nota. Representación gráfica de entalpia como función de estado del calorímetro en función de la temperatura.

Continuación del apéndice 1.

Descripción del diagrama de entalpía en función de temperatura

Variable Dep.	Variable Indep.	Modelo Matemático	R ²	Incerteza máxima	
				Variable Dep.	Variable Indep.
H(J)	T(°C)	$H = 0.571T^2 + 0.1356T + 909.22$	0.9995	0.75	0.2

Nota. Variables involucradas, modelo matemático, correlación e incerteza respecto a diagrama de entalpía en función de temperatura.

A partir de diagrama de entalpía en función de temperatura se obtuvo un modelo matemático para la entalpía.

El modelo obtenido es:

$$H(T) = 0.571 T^2 + 0.1356 T + 909.22$$

Para un proceso isobárico la capacidad calorífica se define como:

$$C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p \quad [\text{Ecuación No. 5}]$$

La derivada de este modelo obtenido corresponde a la capacidad calorífica. Obteniéndose:

$$C_p = \frac{dH}{dT} = (1.142 T + 0.1356) \frac{J}{^\circ C}$$

Ejemplo: determinar la capacidad calorífica del calorímetro para un temperatura de 25 °C.

$$C_p = (1.142 T + 0.1356) \frac{J}{^\circ C}$$

$$C_p = (1.142 (25) + 0.1356) \frac{J}{^\circ C}$$

$$C_p = 28.69 \frac{J}{^\circ C}$$

Continuación del apéndice 1.

1.4. Cálculo de la entalpía del calorímetro en función de la temperatura

Para determinar el cambio de entalpía para el sistema NaCl-hielo dentro del calorímetro se partió desde el concepto que:

$$q_{cal} = C_{pCal}\Delta T = -q_{Sistema} \quad [\text{Ecuación No. 7}]$$

Donde C_{Cal} es la capacidad calorífica de tanto el calorímetro como el agua que contiene por lo que es una práctica común dividir esta capacidad calorífica de la forma siguiente:

$$q_{cal} = (C_{pH_2O} + C_{pCal})\Delta T = -q_{Sistema} \quad [\text{Ecuación No. 8}]$$

La parte del agua puede subdividirse en masa por calor específico para obtenerse la siguiente ecuación:

$$q_{cal} = m_{H_2O}C_{pH_2O}\Delta T + C_{pCal}\Delta T = -q_{Sistema} \quad [\text{Ecuación No. 9}]$$

Efectuando la sustitución dada por la ecuación 4, se obtiene:

$$\Delta H_{Sistema} = - \left[m_{H_2O} \int_{T_i}^{T_{eq}} C_{p,H_2O} dT + \int_{T_i}^{T_{eq}} C_{pCal} dT \right] \quad [\text{Ecuación No. 10}]$$

Ejemplo: calcular el cambio de entalpía del sistema NaCl-hielo si 100g de esta mezcla a $-21\text{ }^\circ\text{C}$ se introducen al calorímetro conteniendo 200g de agua a $24.6\text{ }^\circ\text{C}$. La temperatura de equilibrio es $10.8\text{ }^\circ\text{C}$. El calor específico del agua se rige por el modelo matemático $C_{pH_2O}(\frac{J}{g^\circ C}) = 4 * 10^{-5}T^2 - 0.0025T + 4.2188$ mientras que la capacidad calorífica del calorímetro es obtenida del modelo $C_{pCal}(\frac{J}{g^\circ C}) = (1.142T + 0.1356)$

$$\Delta H_{Sist} = - \left[200g \int_{24.6^\circ C}^{10.8^\circ C} (4 * 10^{-5}T^2 - 0.0025T + 4.2188) \left(\frac{J}{g^\circ C}\right) dT + \int_{24.6^\circ C}^{10.8^\circ C} (1.142T + 0.1356) \left(\frac{J}{g^\circ C}\right) dT \right]$$

$$\Delta H_{Sist} = 11,838.92 J$$

Continuación del apéndice 1.

1.5. Cálculo de calor específico del sistema NaCl-hielo

A partir de la ecuación 5 para un proceso a presión constante se obtiene la expresión:

$$Cp = \frac{\Delta H}{M * \Delta T}$$

Ejemplo: determinar el calor específico del sistema NaCl-hielo en el punto eutéctico si se tomaron 100g de esta mezcla a temperatura de -21 °C y se colocó dentro del calorímetro conteniendo 200g de agua a , alcanzándose la $T_{eq}=10.8$ °C el cambio de entalpia calculado anteriormente a estas condiciones fue de 11,838.917 J.

$$Cp_{Eu} = \frac{11,838.92 J}{100g(10.8 - (-21))^\circ C}$$

$$Cp = 3.72 \frac{J}{g^\circ C}$$

1.6. Cálculo de entropía del sistema NaCl-hielo

Según la segunda ley de la termodinámica, el cambio de entropía para un proceso a presión constante se define como:

$$\Delta S = \int_{T_i}^{T_{eq}} \frac{Cp(T)}{T} dT$$

Ejemplo: determinar el cambio de entropía si se tienen 100g del sistema NaCl-hielo a $T_i=-21$ °C (252.15 K) y alcanza $T_{eq}=10.8$ °C (283.95 K), el calor específico del sistema NaCl-hielo es de $3.723 \frac{J}{g K}$.

$$\Delta S = 100g \int_{252.15K}^{283.95K} \frac{3.723 \frac{J}{g K}}{T} dT$$

$$\Delta S = 44.326 \frac{J}{K}$$

Continuación del apéndice 1.

1.7. Cálculo de la razón de enfriamiento del agua

El modelo de enfriamiento de Newton resulta en una ecuación diferencial definida como:

$$\frac{dT}{dt} = -k(T - T_a)$$

Para una ecuación diferencial de la forma $dT/dt = kT$, las únicas soluciones son las funciones exponenciales:

$$\Delta T_t = \Delta T_i * e^{-kt}$$

Por lo que

$$T_t = T_{amb} + (T_i - T_{amb}) * e^{-kt}$$

Ejemplo: determinar el modelo de enfriamiento de Newton para el calorímetro, si los datos promedio obtenidos fueron $T_i = -21.07$ °C y $T_{30min} = -20$ °C, siendo la temperatura ambiente de 25 °C.

$$k = \frac{\ln \frac{T_t - T_{amb}}{T_i - T_{amb}}}{t}$$
$$k = \frac{\ln \frac{-20 - 25}{-21.07 - 25}}{-30 \text{min} \left(\frac{60 \text{s}}{1 \text{min}} \right)} = 1.3055 * 10^{-5}$$

Al obtener el valor de k se estableció el modelo de enfriamiento de Newton para las mezclas en el calorímetro.

$$T_t = 25 - 46.07 e^{-1.3055 * 10^{-5} * t}$$

1.8. Cálculo de la transferencia de calor por conducción según el modelo de Fourier

La ley de Fourier de conducción de calor indica que la tasa de conducción de calor en una dirección es proporcional al gradiente de temperatura en esa misma dirección (Cengel & Boles 2011).

Continuación del apéndice 1.

$$\dot{Q}_{cond} = -k A \frac{\Delta T}{\Delta X}$$

La transferencia de calor a través de un tubo de pared gruesa, en que las temperaturas interiores y exteriores se mantienen constantes se pueden expresar de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_{cond} = -k2\pi r l \frac{dT}{dr}$$

Integrando para los límites r_1 y r_2 se obtiene:

$$\dot{Q}_{cond} = -\frac{k2\pi l(T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

Ejemplo: Determinar la transferencia de calor por conducción para el calorímetro cuya conductividad térmica es de $0.03 \frac{W}{mK}$ (Dato obtenido de <https://www.comsol.com/blogs/predicting-how-long-coffee-stays-warm-in-a-vacuum-flask/>), si la temperatura de la mezcla en su interior es de $-21.1 \text{ }^\circ\text{C}$ (252.05 K), temperatura ambiente de $25.8 \text{ }^\circ\text{C}$ (298.95 K), radio interior de 0.036m, radio exterior 0.0425m y altura de 0.12.

$$\dot{Q}_{cond} = -\frac{0.03 \frac{W}{mK} 2\pi(0.12m)(252.05 - 298.95)K}{\ln\left(\frac{0.0425m}{0.036m}\right)} = 6.39 \text{ W} = 6.39 \frac{J}{s}$$

La unidad de Watt (W) es una unidad de energía derivada del sistema internacional de unidades definida como 1 J/s por lo tanto.

$$\dot{Q}_{cond} = 6.3913 \text{ W} = 6.3913 \frac{J}{s}$$

Continuación del apéndice 1.

1.9. Costo de energía eléctrica

Para el cálculo del consumo de energía eléctrica se empleó la siguiente ecuación.

$$C_{EE} = t \left(\frac{\text{Pot}}{1000} \right) \left(\frac{GTQ}{kWh} \right)$$

Ejemplo: determinar el costo de energía eléctrica de las 48 destilaciones efectuadas al año con duración de 4 horas cada una utilizando el sistema de recirculación, si el picador de hielo utilizado tiene una potencia de 250 W utilizándose durante 30s y una bomba de recirculación de agua de 25 W durante 4 horas.

$$C_{EE} = 48 \text{Practicas} * \left(\frac{4h}{\text{Practica}} \right) \left(\frac{25W}{1000} \right) \left(\frac{1.34 GTQ}{kWh} \right) \\ + 48 \text{Practicas} \left(\frac{30s}{\text{Practica}} \right) \left(\frac{1h}{3600s} \right) \left(\frac{250W}{1000} \right) \left(\frac{1.34 GTQ}{kWh} \right)$$

$$C_{EE} = 6.57 GTQ$$

1.10. Costo de agua potable

En el cálculo del costo del consumo de agua durante la destilación se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$C_A = t \left(\frac{\dot{v}}{1000} \right) \left(\frac{GTQ}{m^3} \right)$$

$$C_{AR} = t \left(\frac{v}{1000} \right) \left(\frac{GTQ}{m^3} \right)$$

Ejemplo: Determinar el costo de agua potable de las 48 destilaciones efectuadas al año con duración de 4 horas cada a un flujo de 4L/min y compara con el costo utilizando el sistema de recirculación, si este recircula 2L de agua por práctica.

$$C_A = 48 \text{practicas} \left(\frac{4h}{\text{practica}} \right) \left(\frac{4L/\text{min}}{1000} \right) \left(\frac{60\text{min}}{h} \right) \left(\frac{6.27GTQ}{m^3} \right) \\ C_A = 288.92GTQ$$

Continuación del apéndice 1.

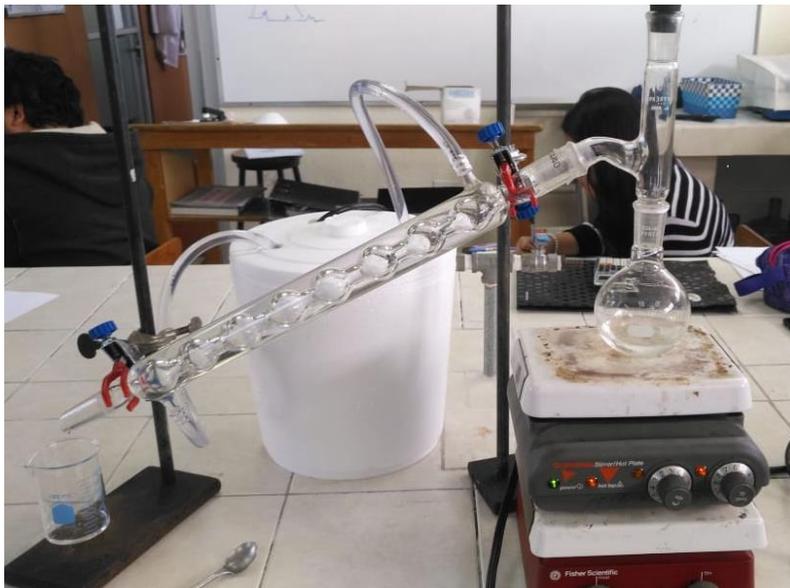
$$C_{AR} = 48 \text{ practicas} \left(\frac{2L}{\text{practica}} \right) \left(\frac{1m^3}{1000L} \right) \left(\frac{6.27GTQ}{m^3} \right)$$
$$C_{AR} = 0.60GTQ$$

Nota. Cálculos realizados apartir de los datos obtenidos en las mediciones realizadas durante la parte experimental del estudio. Elaboracion propia, realizado con Microsoft Word.

Apéndice 2.

Fotografías del desarrollo del trabajo

Sistema de recirculación de agua de refrigeración para el equipo de destilación



Nota. Sistema de destilación propuesto mediante recirculación de agua enfriada utilizando mezclas en el punto eutéctico.

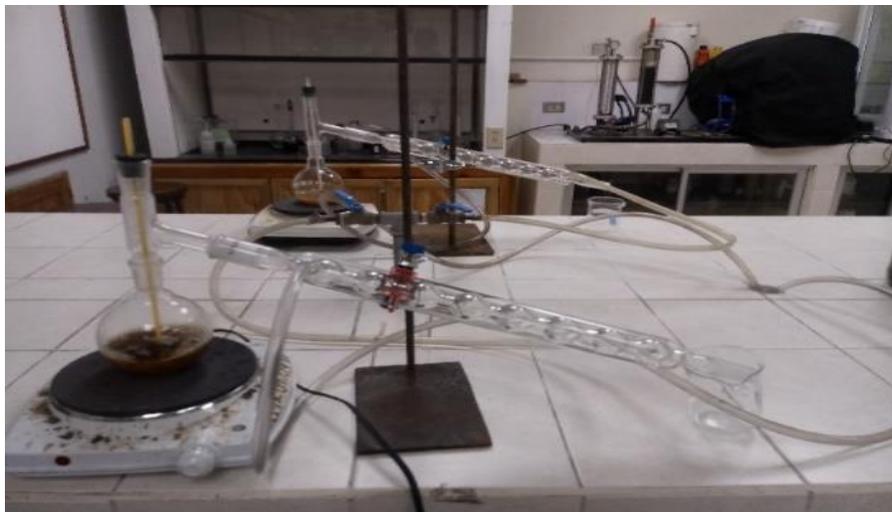
Continuación del apéndice 2.

Interior sistema de recirculación de agua de refrigeración para destilación



Nota. Detalle del interior del sistema de recirculación de agua enfriada utilizando mezclas en el punto eutéctico.

Equipo de destilación convencional



Nota. Sistema de destilación escala laboratorio tradicional, de flujo continuo de agua de grifo.

Continuación del apéndice 2.

Mediciones de temperatura en calorímetro



Nota. Detalle de medición de temperatura mezclas dentro del calorímetro para determinación del punto eutéctico.

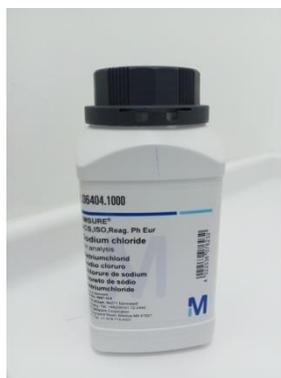
Muestras expuestas al ambiente



Nota. Detalle de medición de temperatura mezclas de mezclas expuestas al ambiente para determinación del punto eutéctico.

Continuación del apéndice 2.

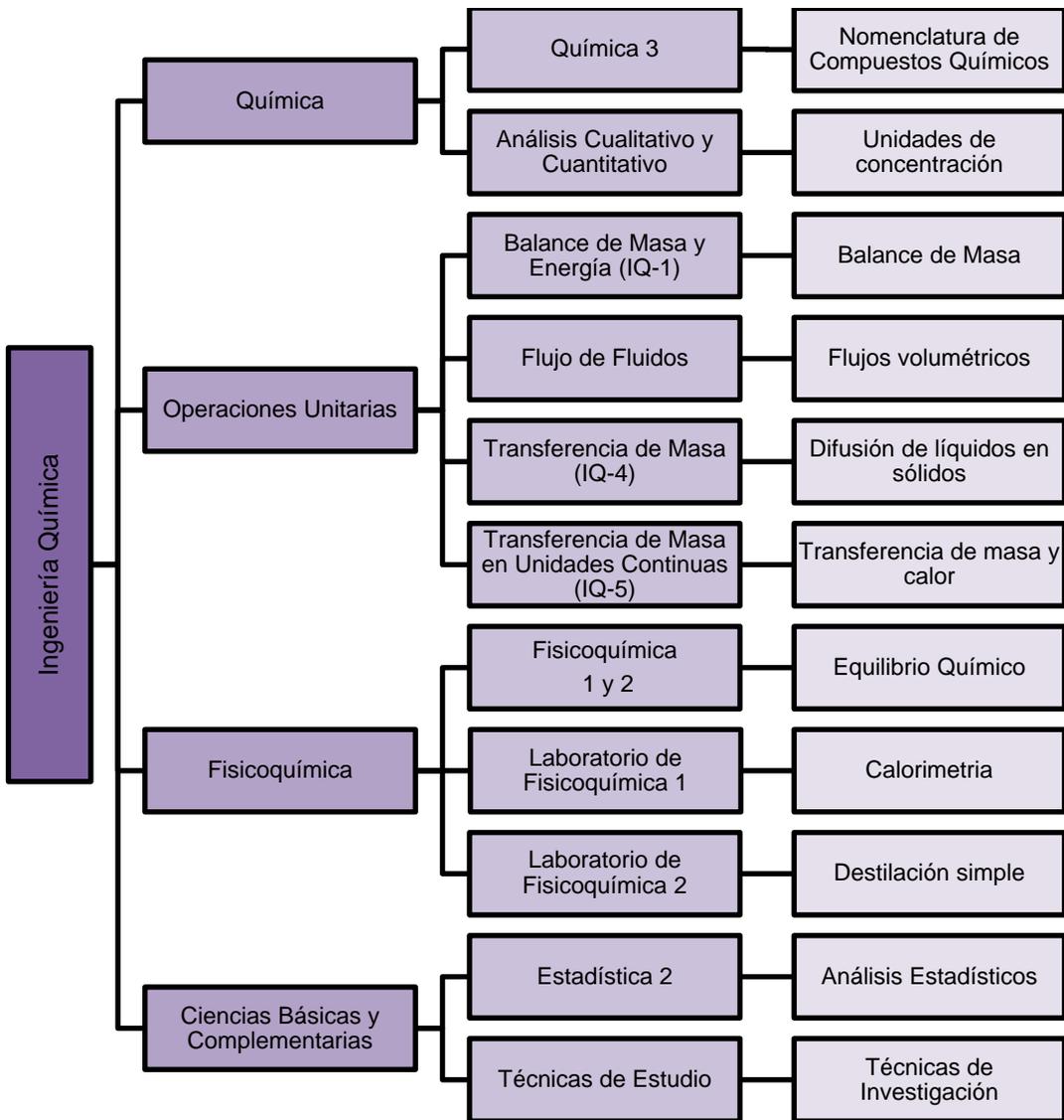
Cloruro de sodio grado reactivo utilizado



Nota. Cloruro de sodio grado reactivo utilizado en la fase experimental para realización de mezclas con hielo para determinación del punto eutéctico. Elaboración propia.

Apéndice 3.

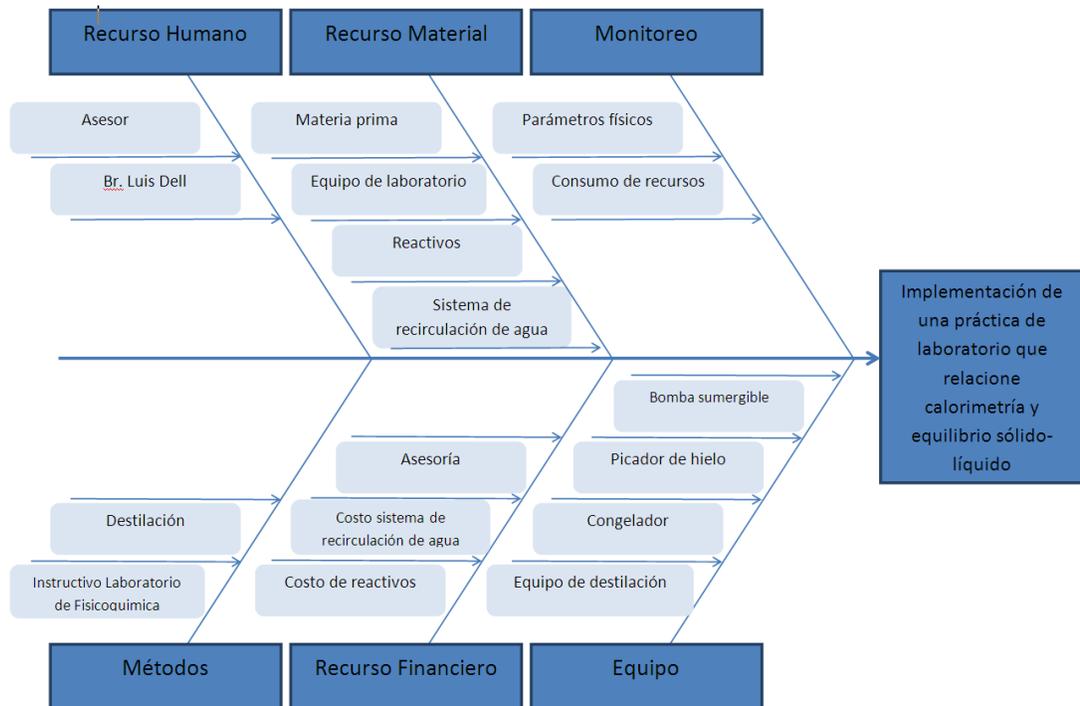
Tabla de requisitos académicos



Nota. Diagrama de cursos y conocimientos de la carrera de ingeniería química involucrados en el estudio. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

Apéndice 4.

Diagrama de Ishikawa



Nota. Herramienta en la que se identifica el problema y sus posibles soluciones. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

