



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

**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**

**Julio Isaí Santos Mayorga**

Asesorado por el Ing. César Ariel Villela Rodas

Coasesorado por el Ing. William Eduardo Fagiani Cruz

Guatemala, julio de 2015



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

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

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**JULIO ISAÍ SANTOS MAYORGA**

ASESORADO POR EL ING. CÉSAR ARIEL VILLELA RODAS

COASESORADO POR EL ING. WILLIAM EDUARDO FAGIANI CRUZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, JULIO DE 2015



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Adrian Antonio Soberanis Ibáñez
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
EXAMINADOR	Ing. Víctor Herbert De León Morales
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:

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

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 22 de julio de 2014.



**Julio Isai Santos Mayorga**





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

---

Guatemala, 8 de mayo de 2015

Ingeniero  
Víctor Manuel Monzón Valdez  
Director  
Escuela de Ingeniería Química

Respetable Ingeniero Monzón:

Con un cordial saludo me dirijo a su persona para informarle que he asesorado y aprobado el informe final del Trabajo de Graduación titulado: "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.", elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Química Julio Isai Santos Mayorga, identificado con el número de carné 2011-14510. Considero que el informe desarrollado satisface los requisitos exigidos.

Agradezco la atención a la presente.

Atentamente,

  
Ing. César Ariel Vilela Rodas  
Colegiado No. 1175  
ASESOR

Ing. César Ariel Vilela Rodas  
INGENIERO QUÍMICO  
Colegiado No. 1.175

---

PROGRAMA DE INGENIERÍA  
QUÍMICA ACREDITADO POR  
Agencia Centroamericana de Acreditación de  
Programas de Arquitectura y de Ingeniería  
Período 2009 - 2012







UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

---

Guatemala, 8 de mayo de 2015

Ingeniero  
Víctor Manuel Monzón Valdez  
Director  
Escuela de Ingeniería Química

Respetable Ingeniero Monzón:

Con un cordial saludo me dirijo a su persona para informarle que he co-asesorado y aprobado el informe final del Trabajo de Graduación titulado: **“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 FISCOQUÍMICA DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA.”**, elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Química Julio Isai Santos Mayorga, identificado con el número de carné 2011-14510. Considero que el informe desarrollado satisface los requisitos exigidos.

Agradezco la atención a la presente.

Atentamente,

Ing. William Eduardo Fagiani Cruz  
Colegiado No. 1734  
CO-ASESOR

INGENIERO QUÍMICO  
WILLIAM EDUARDO FAGIANI CRUZ  
COL. 1734

---

PROGRAMA DE INGENIERÍA  
QUÍMICA ACREDITADO POR  
Agencia Centroamericana de Acreditación de  
Programas de Arquitectura y de Ingeniería  
Período 2009 - 2012



ACAAI

Asociación Centroamericana de Acreditación de





Guatemala, 09 junio de 2015.  
Ref. EIQ.TG-IF.033.2015.

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

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **022-2014** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

### INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Julio Isai Santos Mayorga**.  
Identificado con número de carné: **2011-14510**.  
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

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

**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 FISCOQUÍMICA DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **César Ariel Villela Rodas**.

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

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.089.2015

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **JULIO ISAÍ SANTOS MAYORGA** titulado: "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". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

*"Id y Enseñad a Todos"*

  
Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, julio 2015

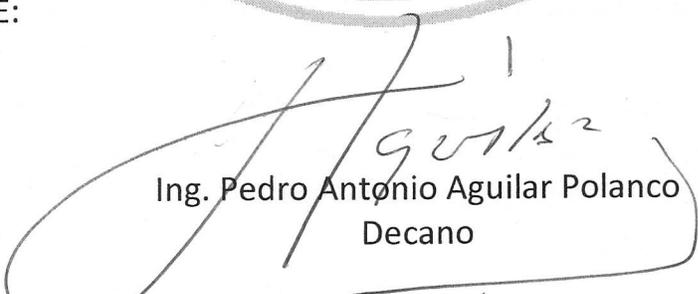
Cc: Archivo  
VMMV/dte





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: **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**, presentado por el estudiante universitario: **Julio Isaí Santos Mayorga**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, 13 de julio de 2015

/gdech





## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por ser el único que provee la sabiduría e inteligencia y por llevar a cabo sus planes en mi vida de forma extraordinaria.
- Mis padres** Julio René Santos Arana y Carmen Mayorga López, por el amor incondicional y el apoyo brindado durante mi formación académica.
- Mi hermana** Heidi Clarissa Santos Mayorga, por inspirarme y motivarme a realizar todas las actividades con excelencia y estar presente en las buenas y en las malas durante mi carrera universitaria.
- El pueblo de Guatemala** Por sus contribuciones para llevar a cabo mis estudios universitarios de forma accesible en la Universidad de San Carlos de Guatemala.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por permitir que en sus instalaciones y planes de estudio se llevara a cabo mi superación intelectual, social y emocional durante mi formación académica.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por la oportunidad y apoyo proporcionado para crecer en las diferentes áreas de mi vida y sobre todo, por proveer las herramientas necesarias para mi proceso de enseñanza-aprendizaje.
<b>Mis padres</b>	Julio René Santos Arana y Carmen Mayorga López, por el apoyo brindado en todos los sentidos durante mi formación como profesional.
<b>Mi hermana</b>	Por estar a mi lado apoyándome y motivándome a seguir adelante cuando más lo he necesitado.
<b>Mis amigos y amigas</b>	Por formar parte de mi vida y confiar en mí como un futuro profesional y amigo de excelencia, y por todos los buenos momentos compartidos durante mis estudios universitarios.

**Ing. César Ariel Villela  
Rodas**

Por el apoyo brindado durante mi formación como ingeniero químico y en el área laboral en el Departamento de Matemáticas de la Facultad de Ingeniería, USAC.

**Ing. William Eduardo  
Fagiani Cruz**

Por el apoyo proporcionado como asesor del trabajo de graduación y por compartir sus conocimientos sin egoísmo alguno durante la carrera.

**Licda. Ingrid Lorena  
Benítez**

Por haberme dado la oportunidad de colaborar en el curso de Ecología y haberme permitido hacer las Prácticas Finales en el LAFIQ.

**Ing. Pablo Andrés  
Aldana Véliz**

Por ser un extraordinario profesor auxiliar en el Laboratorio de Fisicoquímica, cuyo dinamismo y conocimientos me inspiraron para alcanzar la excelencia académica.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
Hipótesis .....	XIV
INTRODUCCIÓN .....	XV
1. ANTECEDENTES .....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Conceptos básicos sobre optimización.....	3
2.1.1. Selección de variables de diseño .....	4
2.1.2. Principios de optimización .....	5
2.2. Optimización desde el punto de vista matemático.....	5
2.3. Conceptos básicos sobre destilación .....	9
2.4. Balance de materia y energía.....	11
2.4.1. Fundamentos de los balances de materia .....	11
2.4.2. Balances de procesos continuos en estado estacionario .....	12
2.4.3. Fundamentos de los balances de energía.....	13
2.4.4. Balances de energía en sistemas abiertos en estado estacionario.....	16
2.5. Eficiencia en la conversión de energía .....	17

2.6.	Fundamentación teórica sobre enseñanza-aprendizaje en laboratorios .....	18
2.6.1.	Clasificación de las prácticas experimentales .....	19
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	21
3.1.	Variables .....	21
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	22
3.3.	Recursos humanos disponibles .....	22
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	22
3.4.1.	Cristalería y equipo .....	22
3.4.2.	Reactivos.....	23
3.5.	Técnica cuantitativa.....	23
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información .....	24
3.6.1.	Limpieza del equipo de destilación.....	24
3.6.2.	Procedimiento experimental para la recolección de la información del sistema de destilación .....	24
3.6.2.1.	Preparación del equipo y medición de variables eléctricas.....	24
3.6.2.2.	Medición de las variables de estudio....	25
3.6.2.3.	Finalización de la práctica .....	26
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	26
3.7.1.	Procesamiento de la información .....	29
3.7.1.1.	Balance de materia (curva de calibración del rotámetro) .....	29
3.7.1.2.	Densidad del agua .....	29
3.7.1.3.	Flujo másico de entrada .....	29
3.7.1.4.	Flujo másico de agua destilada .....	30
3.7.1.5.	Flujo másico de agua de desecho.....	30

3.7.1.6.	Potencia eléctrica .....	30
3.7.1.7.	Balance de energía.....	30
3.7.1.8.	Potencia útil consumida.....	31
3.7.1.9.	Eficiencia energética porcentual .....	31
3.7.1.10.	Energía eléctrica específica.....	31
3.7.1.11.	Análisis estadístico .....	32
3.7.1.11.1.	Media aritmética .....	32
3.7.1.11.2.	Desviación estándar .....	32
4.	RESULTADOS .....	33
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	37
5.1.	Eficiencia energética en función del flujo másico de entrada ..	37
5.2.	Eficiencia energética en función del flujo volumétrico (o caudal) de entrada.....	39
5.3.	Condiciones óptimas de funcionamiento para la energía eléctrica específica mínima .....	41
5.4.	Comparación entre el valor de la energía eléctrica específica mínima real del sistema y el valor proporcionado por el fabricante.....	41
	CONCLUSIONES .....	43
	RECOMENDACIONES .....	45
	BIBLIOGRAFÍA.....	47
	APÉNDICES .....	49



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Valores máximos y mínimos .....	6
2.	Valores máximos y mínimos en un intervalo .....	7
3.	Máximos y mínimos locales y absolutos .....	8
4.	Pendiente de la tangente en un máximo o mínimo .....	9
5.	Eficiencia energética en función del flujo másico de entrada .....	33
6.	Eficiencia energética en función del caudal nominal de entrada .....	34

## TABLAS

I.	Descripción de variables .....	21
II.	Tabla para recolección de información.....	26
III.	Incertezas de los instrumentos de medición .....	28
IV.	Descripción de la figura 5.....	33
V.	Descripción de la figura 6.....	34
VI.	Condiciones óptimas de funcionamiento para la energía eléctrica específica mínima .....	35
VII.	Comparación entre el valor de la energía eléctrica específica mínima real del sistema y el valor proporcionado por el fabricante.....	35



## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$Q_{1n}$	Caudal nominal de entrada [gpm]
$Q_{1r}$	Caudal real de entrada [gpm]
$I$	Corriente eléctrica [A]
$\rho_n$	Densidad de la corriente “n” [kg/m <sup>3</sup> ]
$\Delta V$	Diferencia de potencial eléctrico [V]
$\eta$	Eficiencia energética porcentual [adimensional]
$E_e$	Energía eléctrica [kJ]
$\hat{E}_e$	Energía eléctrica específica [kJ/g]
$H$	Entalpía [kJ]
$\lambda$	Entalpía específica de vaporización [kJ/kg]
$\dot{m}_1$	Flujo másico del agua de entrada [g/s]
$\dot{m}_4$	Flujo másico del agua desechada [g/s]
$\dot{m}_3$	Flujo másico del agua destilada [g/s]
$P_{elec}$	Potencia eléctrica total consumida [W]
$P_{útil}$	Potencia útil consumida [W]
$T_6$	Temperatura de una muestra de la purga [°C]
$T_1$	Temperatura del agua de entrada [°C]
$T_4$	Temperatura del agua desechada [°C]
$T_3$	Temperatura del agua destilada [°C]
$t$	Tiempo [s]
$V_4$	Volumen de agua desechada [mL]
$V_3$	Volumen de agua destilada [mL]
$V_{1c}$	Volumen de salida (calibración) [mL]



## GLOSARIO

<b>Adiabático</b>	Término que se aplica a un proceso en el cual no hay transferencia de calor entre el sistema de proceso y sus alrededores.
<b>Caudal</b>	Cantidad de fluido, medido en volumen, que se mueve por unidad de tiempo.
<b>Destilador de agua</b>	Equipo que se usa para purificar el agua corriente, mediante procesos controlados de vaporización y enfriamiento.
<b>Energía eléctrica</b>	Forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos, cuando se los coloca por intermedio de un conductor eléctrico.
<b>Fisicoquímica</b>	Parte de la química que estudia las propiedades físicas y estructura de la materia, las leyes de la interacción química y las teorías que las gobiernan.
<b>Optimización</b>	Es la selección del mejor elemento (respecto de algún criterio) de un conjunto de elementos disponibles.

<b>Patrón de medida</b>	Se emplea como muestra para medir alguna magnitud o para replicarla.
<b>Purgar</b>	Limpiar o purificar un sistema, eliminando lo que se considera malo o perjudicial.
<b>Reproducibilidad</b>	Medida de la precisión bajo distintas condiciones (distintos operarios, aparatos, laboratorios, etc.).
<b>Rotámetro</b>	Medidor de flujo de área variable.

## RESUMEN

En el presente trabajo se muestran los resultados experimentales de la optimización de la energía eléctrica específica en el proceso de destilación de agua por medio de un destilador clásico, utilizando para ello herramientas de cálculo y software matemático debido a la complejidad de las operaciones algebraicas necesarias para llegar a los resultados.

Se determinó el flujo másico óptimo de entrada de agua al sistema, con el cual se tiene el menor consumo de energía eléctrica por unidad de agua destilada producida en kilojulios por gramo, utilizando como instrumento de medición de caudal un rotámetro con rango de medición de 0 a  $2,0 \pm 0,1$  gpm, el cual permitió tener control sobre el proceso. Se determinó la eficiencia energética en función del flujo másico y volumétrico del agua que entra al sistema. Asimismo, se diseñó una práctica de laboratorio para que el estudiante de ingeniería química aprenda los principios básicos sobre la optimización de sistemas de producción.

Para alcanzar los objetivos se instaló el equipo de destilación y los instrumentos necesarios para medir el volumen y temperatura del agua destilada, volumen y temperatura del agua de desecho, temperatura del agua dentro del tanque (por el sistema de purga), el tiempo, voltaje y amperaje del sistema eléctrico. Las mediciones anteriores se llevaron a cabo para cada flujo nominal de entrada de agua al sistema, a partir de 0,2 gpm hasta 1,0 gpm, con saltos de 0,1 gpm. Se llevó a cabo un total de seis corridas por cada flujo analizado.

A partir de la información obtenida se obtuvieron modelos matemáticos que la describieran y utilizando un software especializado se encontraron los máximos y mínimos absolutos, los cuales corresponden a los puntos óptimos de funcionamiento. Asimismo, se llevó a cabo el análisis de error por precisión y por incertidumbre de los instrumentos de medida.

El modelo matemático que describe el comportamiento de la eficiencia energética respecto del flujo másico de agua de entrada al sistema de destilación, es un polinomio de quinto grado, con un coeficiente de correlación de 0,987. El punto óptimo de funcionamiento, es decir, donde el sistema consume la menor cantidad de energía eléctrica específica, es cuando el flujo másico de entrada de agua al sistema es  $16,84 \pm 3,14$  g/s, alcanzando un consumo mínimo de  $2,769 \pm 0,110$  kJ/g, el cual es mayor a lo que especifica el fabricante, refutando de esta manera la hipótesis nula.

El análisis estadístico se utilizó específicamente para verificar la dispersión de los datos medidos, asumiendo una distribución normal de la variable aleatoria, representando los resultados del análisis como error por precisión (desviación estándar), el cual superó al error por incertidumbre en los instrumentos de medición. En general, el error es menor al 10 % de la magnitud de la medida, por lo cual se concluye que la metodología empleada en el experimento es aceptable, siendo los resultados bastante confiables.

# OBJETIVOS

## General

Optimizar las condiciones de operación en el proceso de destilación de agua para consumir la menor cantidad de energía específica (por unidad de volumen de agua destilada), utilizando un destilador clásico marca Barnstead™ y usar el procedimiento para el proceso de enseñanza-aprendizaje.

## Específicos

1. Calcular la eficiencia energética del destilador por medio de un balance de masa y energía para los diferentes flujos de entrada de agua al sistema analizado.
2. Determinar el valor óptimo del flujo total de agua de alimentación al sistema de destilación en el cual se consume la menor cantidad de energía eléctrica específica.
3. Comprobar la posibilidad de producir agua destilada con un consumo igual o menor que la energía específica indicada por el fabricante del equipo, sin modificar el principio de funcionamiento del mismo.
4. Diseñar una práctica de laboratorio en donde se utilicen como base los objetivos anteriores para ilustrar la optimización de sistemas de producción.

## **Hipótesis**

Existe un flujo másico óptimo de agua que entra al sistema de destilación que provoca un mínimo consumo de energía eléctrica específica (por unidad de agua destilada producida).

### **Hipótesis nula:**

- $H_0$ : es posible consumir un valor mínimo energético de 2,728 kJ por gramo de agua destilada producida (especificación proporcionada por el fabricante).

### **Hipótesis alternativa:**

- $H_a$ : no es posible consumir un valor mínimo energético de 2,728 kJ por gramo de agua destilada producida (especificación proporcionada por el fabricante).

## INTRODUCCIÓN

Los problemas de optimización son comunes en muchas áreas, entre las cuales se encuentran: las matemáticas, ingeniería, economía, medicina y estadística, de allí el gran desarrollo que han experimentado en las últimas décadas. Son especialmente útiles en el estudio de las características de modelos matemáticos utilizados para explicar complejos fenómenos del mundo real.

Se entiende por solución de un problema de optimización un conjunto de valores permitidos de las variables para los cuales se alcanza el valor óptimo de una determinada función. Dicho valor puede ser un mínimo o máximo, de acuerdo con el tipo de variable que se desee optimizar.

La destilación es una operación unitaria y un proceso de separación de componentes en fase líquida. Esta operación unitaria consiste en evaporar la mezcla y posteriormente condensarla; de esta manera se enriquece el vapor en el componente más volátil y el remanente se empobrece del mismo. Lo que permite la separación de los componentes de la mezcla líquida y sólidos es la diferencia de potencial químico entre cada uno de ellos.

El tema de la optimización en el proceso de destilación se puede enfocar desde diferentes puntos de vista. Uno de ellos es el punto de vista energético (como se enfoca en el presente trabajo).



## 1. ANTECEDENTES

Se investigó acerca de la optimización energética en el proceso de destilación de agua y no se encontró resultado alguno. Existen estudios acerca de la optimización en el proceso de destilación binaria en torres o columnas multietapas, pero este es un tema que se encuentra fuera del interés del presente trabajo de investigación, ya que el sistema que se analiza es de destilación simple, y en los trabajos encontrados se optimiza la relación L/D (reflujo – destilado que sale del sistema), la cual no es aplicable a destilaciones monoetapa (simples).

En el 2004, Isaí Cotto Revolorio llevó a cabo un *Estudio para la optimización del sistema de trampas de vapor, de la planta de saponificación, en Colgate Palmolive C. A., S. A.*, en donde se llevó a cabo un análisis termográfico para evaluar las ineficiencias existentes en el proceso anteriormente descrito, utilizando métodos de optimización para eliminar hasta donde fuera posible las pérdidas energéticas y por consiguiente económicas, que presentan por la mala operación del equipo.

En 1995, Manuel Antonio Garzaro Rueda llevó a cabo la *Evaluación de un equipo recuperador de energía en el proceso de ebullición de mosto dentro de una industria cervecera y optimización de los parámetros del proceso de recuperación de energía*, en donde determinó los puntos óptimos de funcionamiento del sistema de recuperación de vapor en el proceso especificado, calculando para esto la eficiencia del sistema, la cual no superó el 62,05 %.

En la Escuela de Ingeniería Química no se cuenta con una práctica en donde se apliquen los conceptos sobre optimización de una variable, utilizando el cálculo como una poderosa herramienta para estos fines. La parte teórica del tema es impartida en el curso Matemática Básica 2, pero en forma generalizada. Es por ello que se busca relacionarlo con sistemas de producción, el cual es un tema que compete en gran manera a la formación del ingeniero químico.

Respecto de la parte didáctica, específicamente en el Laboratorio de Fisicoquímica, se tienen varios trabajos de graduación destinados a las propuestas de prácticas de laboratorio, entre los cuales están los siguientes:

En el 2007, Zaid Jacobo Lou Díaz elaboró un trabajo sobre la *Validación del uso de un reactor modificado de tipo discontinuo para la hidrólisis alcalina del acetato de etilo monitoreada por conductimetría para ser utilizado en estudios de cinética química*, en donde demostró que un equipo abandonado en dicho laboratorio es apto para el estudio experimental de la cinética química.

En el 2010, Luis Rodolfo Castro García, llevó a cabo un *Diagnóstico de la aplicación de un sistema de gestión de calidad a través de la norma ISO/IEC 17025:2005, en el Laboratorio de Fisicoquímica, y validación del ensayo: Determinación de la constante de disociación ácida del rojo de metilo*, en donde evaluó la calidad de una práctica de laboratorio, bajo normas internacionales, concluyendo que el equipo y metodología utilizados son aptos para producir resultados exactos y precisos.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Conceptos básicos sobre optimización**

La optimización es un tema aplicado a distintas áreas del conocimiento, entre las cuales se encuentra la ingeniería. Se utiliza especialmente para explicar y mejorar el funcionamiento de sistemas de alta complejidad en el mundo real, siendo necesario el uso de modelos matemáticos obtenidos por medio de la experimentación.

El objetivo principal de la optimización es determinar el dominio de una función en donde se presentan las mejores condiciones de operación para minimizar los costos y aumentar la producción.

En las últimas décadas la aplicación de métodos de optimización ha ido adquiriendo cada vez más importancia en diversas áreas de la ciencia y la ingeniería, debido al gran número de problemas que pueden resolver. Básicamente, el objetivo de todo problema de optimización es encontrar el valor máximo o mínimo que alcanza una función en un determinado espacio de búsqueda. Un problema puede poseer más de un mínimo, de ahí que se haga distinción entre optimización global y local. Se entiende por óptimo global la mejor solución a un determinado problema, y por óptimo local la mejor solución a un problema dentro de un entorno determinado.

Un problema de optimización se puede definir de forma general, partiendo de un conjunto de variables independientes, una serie de restricciones que definen valores aceptables de las variables y una función de estas variables que

se denominan función objetivo. Se entiende por solución de un problema de optimización cualquier conjunto aceptable de valores de las variables para el cual la función objetivo alcanza un valor óptimo. Formalmente, el proceso de optimización implica maximizar o minimizar la función objetivo dentro de un conjunto de valores factibles de las variables.

Sin embargo, la existencia de una formulación estándar no implica que las diferencias entre los problemas deban ser ignoradas. Para resolver un problema de forma eficiente será importante determinar sus características; de ahí que resulte interesante clasificar los problemas para poder proponer los métodos de resolución adecuados.

### **2.1.1. Selección de variables de diseño**

Para fines de análisis y diseño de procesos es necesario entender la dependencia que guardan entre sí las diferentes variables involucradas. Este aspecto no es trivial, y una manera muy conveniente de explorar esos efectos es comenzar por establecer un modelo matemático del sistema.

El modelo matemático de un proceso consiste en una serie de relaciones que se establecen para cada equipo que forma parte del sistema. Se puede establecer que en general para cada equipo, un modelo consiste de una combinación de las siguientes expresiones:

- Balance de cantidad de movimiento
- Balance de materia
- Balance de energía
- Ecuaciones de diseño
- Relaciones termodinámicas y ecuaciones cinéticas

- Especificación de algunas variables o restricciones particulares

El primer tipo de balances no es de importancia para muchos equipos de proceso, tales como sistemas de reacción y de separación. Por su parte, las ecuaciones básicas de balances de materia y de energía se establecen en estado estable para fines de diseño, o en estado no estacionario para fines de estudios dinámicos y de control.

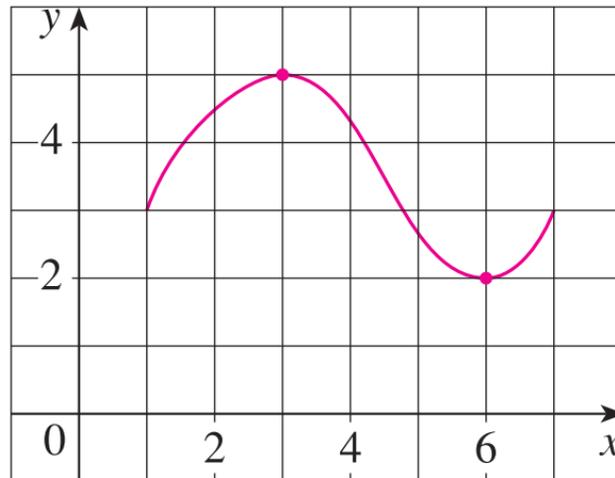
### **2.1.2. Principios de optimización**

En el análisis de sistemas de ingeniería ocurren muchas veces situaciones que provocan efectos conflictivos en cuanto a su economía o algún objetivo establecido. Por ejemplo: en el diseño de columnas de destilación, al aumentar la razón de reflujo, se tiende a disminuir el costo fijo de la columna a expensas de un mayor costo de servicios. Un valor óptimo de la razón de reflujo bajo un objetivo económico sería aquel que minimizara una combinación de ambos costos. En muchas ocasiones, la búsqueda de este valor óptimo no es trivial; de aquí se establece la necesidad de contar con técnicas de optimización para encontrar esos mejores valores de las variables de diseño.

### **2.2. Optimización desde el punto de vista matemático**

Algunas de las más importantes aplicaciones del cálculo diferencial son los problemas de optimización, en los que se pide hallar la forma óptima (la mejor) de hacer algo. Estos problemas se pueden reducir a hallar valores máximos y mínimos de una función. Se presenta a continuación una breve explicación sobre los valores máximos y mínimos de una función.

Figura 1. **Valores máximos y mínimos**



Fuente: STEWART, James. *Cálculo de una variable*. p. 262.

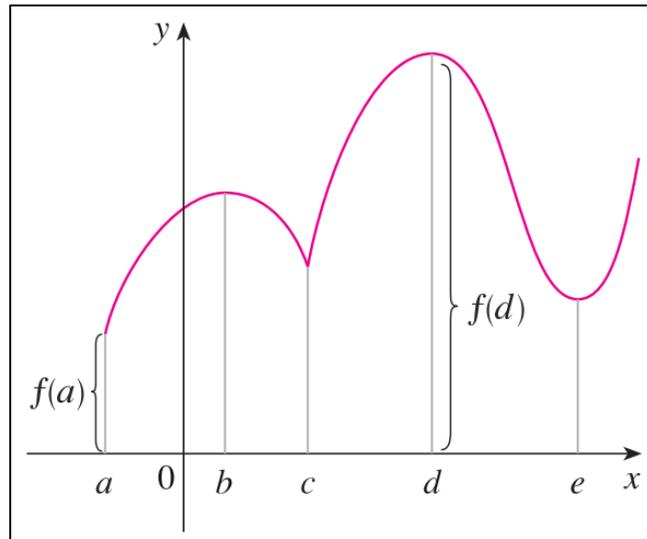
Se ve que el punto más alto en la gráfica de la función  $f$  mostrada en la figura 1 es el punto  $(3,5)$ . En otras palabras, el valor más grande de  $f$  es  $f(3) = 5$ . Del mismo modo, el valor más pequeño es  $f(6) = 2$ . Se dice que  $f(3) = 5$  es el *máximo absoluto* de  $f$  y  $f(6) = 2$  es el *mínimo absoluto*. En general, se usa la siguiente definición:

Sea  $c$  un número en el dominio  $D$  de una función  $f$ . Entonces  $f(c)$  es el

- Valor máximo absoluto de  $f$  en  $D$  si  $f(c) \geq f(x)$  para toda  $x$  en  $D$
- Valor mínimo absoluto de  $f$  en  $D$  si  $f(c) \leq f(x)$  para toda  $x$  en  $D$

Un máximo o mínimo absoluto a veces se denomina máximo o mínimo global. Los valores máximos y mínimos de  $f$  se denominan valores extremos de  $f$ .

Figura 2. **Valores máximos y mínimos en un intervalo**



Fuente: STEWART, James. *Cálculo de una variable*. p. 263.

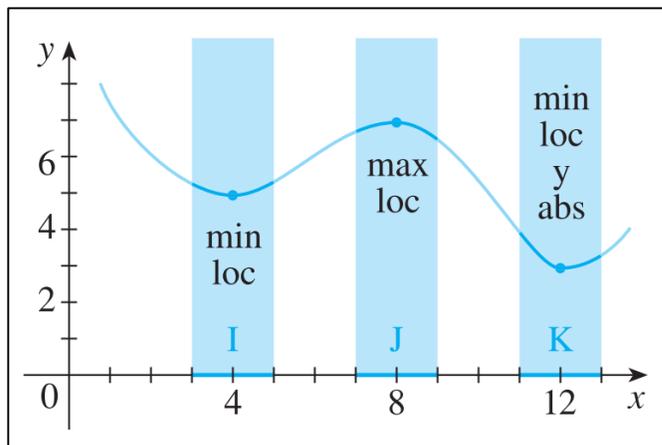
La figura 2 muestra la gráfica de una función  $f$  con máximo absoluto en  $d$  y mínimo absoluto en  $a$ . Se observa que  $(d, f(d))$  es el punto más alto en la gráfica y  $(a, f(a))$  es el punto más bajo. En la figura 2, si se consideran solo valores de  $x$  cercanos a  $b$  [por ejemplo, si se restringe la atención al intervalo  $(a, c)$ ], entonces  $f(b)$  es el más grande de estos valores de  $f(x)$  y recibe el nombre de valor máximo local de  $f$ . Igualmente,  $f(c)$  recibe el nombre de valor mínimo local de  $f$  porque  $f(c) \leq f(x)$  para  $x$  cerca de  $c$  [en el intervalo  $(b, d)$ , por ejemplo]. La función  $f$  también tiene un mínimo local en  $e$ . En general, se tiene la siguiente definición:

El número  $f(c)$  es un

- Valor máximo local de  $f$  si  $f(c) \geq f(x)$  cuando  $x$  es cercana a  $c$
- Valor mínimo local de  $f$  si  $f(c) \leq f(x)$  cuando  $x$  es cercana a  $c$

En la anterior definición (y cualquier otra parte), si se dice que algo es verdadero cerca de  $c$ , se quiere decir que es verdadero en algún intervalo abierto que contenga a  $c$ . Por ejemplo, en la figura 3 se puede ver que  $f(4) = 5$  es un mínimo local porque es el valor más pequeño de  $f$  en el intervalo  $I$ . No es el mínimo absoluto porque  $f(x)$  toma valores más pequeños cuando  $x$  es cercana a 12 (en el intervalo  $K$ , por ejemplo). De hecho,  $f(12) = 3$  es a la vez un mínimo local y el mínimo absoluto. Análogamente,  $f(8) = 7$  es un máximo local, pero no el máximo absoluto porque  $f$  toma valores más grandes cerca de 1.

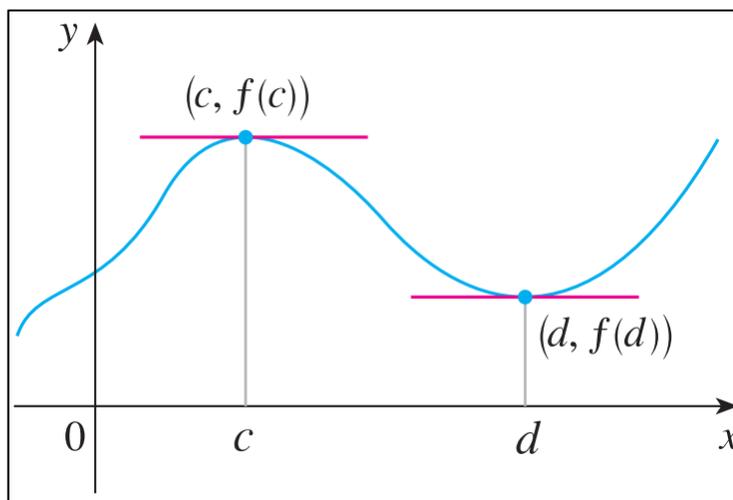
Figura 3. **Máximos y mínimos locales y absolutos**



Fuente: STEWART, James. *Cálculo de una variable*. p. 263.

La figura 4 muestra la gráfica de una función  $f$  con un máximo local en  $c$  y un mínimo local en  $d$ . Se ve que en los puntos máximo y mínimo las rectas tangentes son horizontales y, por tanto, cada una de ellas tiene pendiente cero. Se sabe que la derivada es la pendiente de la recta tangente, de modo que se ve que  $f'(c) = 0$  y  $f'(d) = 0$ . El siguiente teorema dice que esto siempre es cierto para funciones derivables.

Figura 4. **Pendiente de la tangente en un máximo o mínimo**



Fuente: STEWART, James. *Cálculo de una variable*. p. 265.

El caso más simple de solución de un problema de optimización es cuando se pueden usar los principios de cálculo diferencial. La derivada de la función respecto de la variable de interés igualada a cero proporciona el máximo o el mínimo que se busca. Este procedimiento requiere de relaciones matemáticas explícitas y continuas. En muchos casos este requerimiento no se cumple, o las relaciones están dadas en forma de tablas o gráficas y no pueden usarse directamente los principios de cálculo diferencial. Este aspecto es muy común en sistemas ingenieriles y establece la necesidad de técnicas de búsqueda.

### 2.3. **Conceptos básicos sobre destilación**

La destilación es una operación unitaria utilizada para la separación de una mezcla líquida en los componentes que lo conforman. La destilación se logra por medio de la vaporización parcial de dicha mezcla líquida, de tal

manera que la composición del vapor obtenido sea distinta de la composición del líquido de partida, resultando distinta también la composición del líquido residual. Idealmente, por medio de la destilación se puede lograr una separación total de los componentes de una mezcla líquida, llevándola a cabo en varias etapas.

La destilación es el método más antiguo para la purificación de agua. A pesar de que algún tipo de contaminación del agua de alimentación permanece, la destilación es popular porque la ebullición asegura la muerte de los microorganismos en estado vegetativo.

La destilación del agua consiste en separar los componentes basándose en las diferencias en los puntos de ebullición (que por lo regular dicha agua contiene únicamente sustancias no volátiles). Los compuestos con una presión de vapor baja tendrán puntos de ebullición altos y los que tengan una presión de vapor alta tendrán puntos de ebullición bajos. Los tipos de destilación más comunes son:

- La destilación simple
- Destilación fraccionada
- Destilación por arrastre con vapor

En la presente investigación se utilizará la destilación simple, la cual consiste en una única evaporación y condensación del agua, a diferencia de la fraccionada que pasa por un proceso similar o equivalente a realizar la destilación varias veces.

## 2.4. Balance de materia y energía

Es importante en el análisis de un proceso de producción, empezar estableciendo, por medio de balances, las limitaciones que imponen las leyes de conservación de materia y energía.

### 2.4.1. Fundamentos de los balances de materia

Al diseñar un nuevo proceso o analizar uno ya existente, es necesario tener en cuenta ciertas restricciones impuestas por la naturaleza. Por ejemplo, no es posible especificar que se alimenten 1 000 g de plomo a un reactor y produzca 2 000 g de plomo, de oro o de cualquier otra cosa. La base de esta observación es la ley de la conservación de la masa, la cual establece que la masa no se crea ni se destruye. Las relaciones basadas en la ley de conservación de la masa como la que se presenta a continuación, son ejemplos de balances de masa o balances de materia:

$$\textit{Entrada total de masa} = \textit{salida total de masa}$$

El diseño de un nuevo proceso o el análisis de uno ya existente no están completos hasta que se establece que las entradas y salidas de todo el proceso, y de cada unidad por separado, satisfacen las ecuaciones de balance. El balance de una cantidad que se conserva (masa total, masa de una especie determinada, energía, *momentum*) en un sistema (una sola unidad de proceso, un conjunto de unidades o un proceso completo) se puede escribir de manera general como:

$$\textit{Entrada} + \textit{generación} - \textit{salida} - \textit{consumo} = \textit{Acumulación}$$

Las reglas siguientes se aplican para simplificar la ecuación de balance de materia:

- Si la cantidad balanceada es la masa total, establecer que generación = 0 y consumo = 0. Excepto en las reacciones nucleares, es imposible crear o destruir la masa.
- Si la sustancia balanceada es una especie no reactiva (ni reactivo ni producto), establecer que generación = 0 y consumo = 0.
- Si un sistema se encuentra en estado estacionario, establecer que acumulación = 0, sin importar lo que se esté balanceando. Por definición, en un sistema en estado estacionario nada cambia con el tiempo, incluyendo la cantidad de la variable que se balancea.

#### **2.4.2. Balances de procesos continuos en estado estacionario**

En procesos continuos en estado estacionario, el término de acumulación de la ecuación general de balance es igual a cero, por lo cual la ecuación se simplifica como sigue:

$$\textit{Entrada} + \textit{generación} = \textit{Salidas} + \textit{consumo}$$

Si se realiza el balance de una especie no reactiva o de la masa total, los términos de generación y consumo son iguales a cero y la ecuación se reduce a:

$$\textit{Entrada} = \textit{Salida}$$

Es fundamental organizar los datos de manera conveniente para efectuar los cálculos subsecuentes. Lo más recomendable es dibujar el diagrama de flujo del proceso, usando recuadros u otros símbolos para representar las

unidades de proceso (reactores, mezcladores, unidades de separación, etc.) y líneas con flechas para representar las entradas y salidas.

Cuando se emplea de manera adecuada el diagrama de flujo del proceso, esto ayuda a iniciar los cálculos de balance de materia y a mantenerlos en curso. Para ello, el diagrama debe marcarse en su totalidad desde que se dibuja, anotando los valores de las variables de proceso conocidas y los símbolos de las variables desconocidas en cada corriente de entrada y de salida. A partir de esto el diagrama funciona como tablero de resultados para resolver el problema: a medida que se determina cada variable desconocida se anota su valor en el mismo, de modo que el diagrama proporciona un registro continuo del punto donde se encuentra la solución y de lo que aún debe hacerse.

### **2.4.3. Fundamentos de los balances de energía**

Una de las tareas principales del ingeniero al diseñar un proceso consiste en justificar con cuidado la energía que entra y sale de cada unidad de proceso y determinar los requerimientos energéticos totales de este. Para ello, recurre a escribir los balances de energía de manera muy similar a los balances de materia que se describen para explicar los flujos de masa que entran y salen del proceso y de sus unidades.

Suponiendo que un sistema de proceso es cerrado, es decir, no hay transferencia de masa a través de sus fronteras mientras el proceso se realiza, la energía puede transmitirse entre un sistema de este tipo y sus alrededores de dos maneras:

- En forma de calor o energía que fluye como resultado de la diferencia de temperatura entre el sistema y sus alrededores. La dirección del flujo siempre es de la temperatura más alta a la más baja. El calor se define como positivo cuando se transfiere de los alrededores al sistema.
- Como trabajo o energía que fluye en respuesta a cualquier fuerza impulsora que no sea una diferencia de temperatura, como una fuerza, una torque (momento de torsión) o un voltaje.

Se dice que un sistema es abierto o cerrado dependiendo de que la masa cruce o no las fronteras del sistema durante el tiempo cubierto por el balance de energía. Por definición, un sistema de proceso por lotes es cerrado, y los sistemas semicontinuos y continuos son abiertos.

Es posible escribir el balance de energía integral para un sistema cerrado entre dos instantes dados. Como la energía no puede crearse ni destruirse, los términos de generación y consumo del balance general se cancelan, lo cual deja:

$$\textit{Acumulación} = \textit{Entrada} - \textit{salida}$$

Al derivar el balance integral de masa para un sistema cerrado se eliminan los términos de entrada y salida, ya que, por definición, la masa no atraviesa las fronteras de un sistema cerrado. Sin embargo, es posible que se transfiera energía a través de las fronteras como calor o trabajo, de manera que es imposible eliminar en forma automática el lado derecho de la ecuación.

Igual que en los balances de masa, no obstante, el término de acumulación es igual al valor final de la cantidad balanceada (en este caso, la

energía del sistema), menos el valor inicial de esta cantidad. Por tanto, el balance puede escribirse:

$$\begin{aligned} & \textit{Energía final del sistema} - \textit{Energía inicial del sistema} \\ & = \textit{Energía neta transferida al sistema} \end{aligned}$$

Ahora:

$$\textit{Energía inicial del sistema} = U_i + E_{ki} + E_{pi}$$

$$\textit{Energía final del sistema} = U_f + E_{kf} + E_{pf}$$

$$\textit{Energía transferida} = Q - W$$

Donde los subíndices i y f se refieren a los estados inicial y final del sistema y U, E<sub>k</sub>, E<sub>p</sub>, Q y W representan la energía interna, cinética y potencial, el calor transferido al sistema procedente de sus alrededores, y el trabajo realizado por el sistema sobre sus alrededores. En consecuencia, la ecuación del balance energético se transforma en:

$$(U_f - U_i) + (E_{kf} - E_{ki}) + (E_{pf} - E_{pi}) = Q - W$$

$$\Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p = Q - W$$

La ecuación anterior es la forma básica de la primera ley de la termodinámica para un sistema cerrado. Al aplicar esta expresión a un proceso dado, se deben tener en cuenta los siguientes puntos:

- La energía interna de un sistema depende casi por entero de su composición química, su estado de agregación (sólido, líquido o gaseoso) y la temperatura de los materiales del sistema. Es independiente de la presión para el gas ideal y casi independiente de esta para líquidos y

sólidos. Si no hay cambios de temperatura o de fase, ni reacciones químicas en un sistema cerrado y si los cambios de presión son menores de unas cuantas atmósferas, entonces  $\Delta U = 0$ .

- Si el sistema no tiene aceleración,  $\Delta E_k = 0$ . Si el sistema no se eleva ni cae, entonces  $\Delta E_p = 0$ .
- Si el sistema y sus alrededores están a la misma temperatura o si está perfectamente aislado, entonces  $Q = 0$  y el proceso se denomina adiabático.
- El trabajo realizado sobre o por un sistema cerrado se logra por el desplazamiento de sus fronteras contra una fuerza de resistencia, o el paso de corriente eléctrica o de radiación a través de dichas fronteras. Algunos ejemplos del primer tipo de trabajo son el movimiento de un pistón, o la rotación de un eje que se proyecta a través de las fronteras del sistema. Si no hay partes móviles ni corrientes eléctricas ni radiaciones en las fronteras del sistema, entonces  $W = 0$ .

#### **2.4.4. Balances de energía en sistemas abiertos en estado estacionario**

Por definición, hay masa que atraviesa las fronteras de un sistema de proceso abierto a medida que este ocurre. Para introducir masa al sistema es necesario realizar trabajo sobre el mismo y cuando emerge masa del mismo se lleva a cabo trabajo sobre los alrededores. Ambos términos de trabajo deben incluirse en el balance de energía.

Las propiedades de un material de proceso pueden ser extensivas (proporcionales a la cantidad de materia) o intensivas (independientes de esa cantidad). La masa, el número de moles y el volumen (o las velocidades de flujo másico, de flujo molar y de flujo volumétrico de una corriente continua), y la energía cinética, potencial e interna (o las velocidades de transporte de estas cantidades en una corriente continua) son propiedades extensivas, mientras que temperatura, presión y densidad son propiedades intensivas.

Una propiedad específica es una cantidad intensiva que se obtiene dividiendo una propiedad extensiva (o su velocidad de flujo) entre la cantidad total (o velocidad de flujo) del material del proceso. De este modo, si el volumen de un fluido es  $200 \text{ cm}^3$  y la masa de este es  $200 \text{ g}$ , su volumen específico es  $1 \text{ cm}^3/\text{g}$ . De manera similar, si la velocidad de flujo másico de una corriente es  $100 \text{ kg}/\text{min}$  y la de flujo volumétrico es  $150 \text{ L}/\text{min}$ , el volumen específico del material de la corriente es  $(150 \text{ L}/\text{min})/(100 \text{ kg}/\text{min}) = 1,5 \text{ L}/\text{kg}$  si la velocidad a la cual esta corriente transporta a la energía cinética es  $300 \text{ J}/\text{min}$ ; entonces la energía cinética específica del material es  $(300 \text{ J}/\text{min})/(100 \text{ kg}/\text{min}) = 3 \text{ J}/\text{kg}$ .

## **2.5. Eficiencia en la conversión de energía**

Eficiencia es uno de los términos más usados en termodinámica, e indica qué tan bien se realiza un proceso de conversión o transferencia de energía. Asimismo, este término resulta uno de los que en general son mal usados en termodinámica, además de ser una fuente de malas interpretaciones. Esto se debe a que se usa sin una definición adecuada. El desempeño o eficiencia se expresa en términos de la salida deseada y la entrada requerida, de la siguiente manera:

$$\textit{Eficiencia} = \textit{Salida deseada}/\textit{Salida requerida}$$

## **2.6. Fundamentación teórica sobre enseñanza-aprendizaje en laboratorios**

La actividad experimental hace mucho más que apoyar las clases teóricas de cualquier área del conocimiento; su papel es importante en cuanto despierta y desarrolla la curiosidad de los estudiantes, ayudándolos a resolver problemas y a explicar y comprender los fenómenos con los cuales interactúan en su cotidianidad. Una clase teórica de ciencias, de la mano de la enseñanza experimental creativa y continua, puede aportar al desarrollo en los estudiantes de algunas habilidades que exige la construcción de conocimiento científico.

Actualmente se le da prioridad a la dimensión teórica en la enseñanza, dejando de lado la dimensión práctica. El orden de presentación, el tiempo dedicado, la valoración relativa que se concede en la evaluación a los aspectos procedimentales frente a los conceptuales son algunas pruebas del predominio general de lo teórico sobre lo práctico. Es más, lo práctico es visto muchas veces como mera aplicación, consecuencia o ilustración de lo teórico y, en este sentido, no importa tanto el orden secuencial de la acción escolar (comenzar planteando un problema o comenzar por los conceptos básicos) como el valor que se concede a cada uno de los términos, leyes y principios teóricos enseñados.

Los maestros tienden a pensar que el trabajo en el laboratorio facilita siempre el aprendizaje de las ciencias y que los estudiantes entienden lo que hacen. Sin embargo, para la mayoría de los docentes estas prácticas son un tipo de receta que refuerza las clases que se han dado en el aula habitual. Lo importante de las prácticas de laboratorio radica en que los maestros entiendan que estas facilitan la comprensión de conceptos y que deben tener siempre un propósito claro, no solo el de llevarlos a “experimentar”.

### **2.6.1. Clasificación de las prácticas experimentales**

Se refiere a las prácticas de laboratorio como a una forma de comprender y organizar la enseñanza de las ciencias de tal manera que aporte a los estudiantes en cuanto a: la construcción de conocimientos, la adquisición de formas de trabajo científico y al desarrollo de actitudes, habilidades y destrezas propias del trabajo experimental.

En la actualidad son de especial interés: el aporte del trabajo experimental al desarrollo de habilidades para el trabajo en equipo, el establecimiento de relaciones significativas entre las actividades prácticas propuestas y la vida cotidiana de los estudiantes, y las relaciones entre el campo específico de la actividad práctica (biología, química, física) con otros campos del conocimiento.

Se distinguen diferentes categorías de situaciones que se presentan a continuación:

- Problemas-cuestiones: su finalidad no es más que reforzar y aplicar la teoría.
- Problema-ejercicio: generalmente útiles para lograr el aprendizaje de técnicas de resolución ya establecidas (usar la balanza y pipetear, por ejemplo).
- Problema-investigación: los alumnos resuelven con metodología de investigación.

Los estudiantes cuando asisten al laboratorio deben resolver situaciones problema, teniendo un mayor protagonismo, es decir, en las clasificaciones

anteriores el verdadero sentido de una práctica de laboratorio es propender el trabajo científico de una manera más apropiada para estudiantes y profesores.

La práctica diseñada en el presente trabajo de graduación es del tipo “Problema-ejercicio”, principalmente.

### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1. Variables

Se indican a continuación las variables dependientes e independientes que se utilizaron en el experimento.

Tabla I. Descripción de variables

Variable	Dimensional	Independiente	Dependiente
Corriente eléctrica ( $I$ )	A	X	
Caudal de entrada ( $Q_1$ )	gpm	X	
Densidad ( $\rho$ )	kg/m <sup>3</sup>		X
Diferencia de potencial eléctrico ( $\Delta V$ )	V	X	
Eficiencia ( $\eta$ )	-----		X
Energía eléctrica específica ( $\hat{E}_e$ )	kJ/g		X
Entalpía específica ( $\lambda$ )	J/kg		X
Flujo másico de entrada ( $\dot{m}$ )	kg/s	X	
Flujo másico de salida ( $\dot{m}$ )	kg/s		X
Potencia eléctrica ( $P_{elec}$ )	W	X	
Potencia útil ( $P_{\acute{u}til}$ )	W		X
Temperatura ( $T$ )	°C	X	
Tiempo ( $t$ )	s	X	
Volumen ( $V$ )	m <sup>3</sup>		X

Fuente: elaboración propia.

### **3.2. Delimitación del campo de estudio**

El estudio se llevó a cabo específicamente para el destilador de agua marca Barnstead™, modelo A1007, el cual funciona bajo las condiciones del Laboratorio de Físicoquímica, de la Escuela de Ingeniería Química, perteneciente a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

### **3.3. Recursos humanos disponibles**

Investigador: Julio Isaí Santos Mayorga

Asesor: Ing. César Ariel Villela Rodas

Coasesor: Ing. William Eduardo Fagiani Cruz

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

Durante la fase experimental del presente trabajo se utilizaron los siguientes recursos materiales:

#### **3.4.1. Cristalería y equipo**

- Probetas de vidrio de diferentes capacidades:
  - 100 mL
  - 1000 mL
- *Beakers* de *pyrex* de diferentes capacidades:
  - 250 mL
  - 1000 mL
- Pipeta serológica de 10 mL
- Termómetro de alcohol teñido

- Soportes universales
- Destilador clásico marca Barnstead™ modelo A1 007
- Rotámetro
- Cronómetro
- Multímetro
- Cubeta plástica de aproximadamente 20 L

#### **3.4.2. Reactivos**

- Vinagre (ácido acético al 5 % en volumen)
- Agua destilada
- Agua del suministro público

#### **3.5. Técnica cuantitativa**

El presente trabajo de investigación se enfoca en un aspecto netamente cuantitativo, dado que se basó en la medición de magnitudes físicas y a partir de ellas se llegó a resultados numéricos por medio de modelos matemáticos y balances de masa y energía.

Fue necesaria la utilización de Microsoft Office Excel para el procesamiento de la información. De igual forma, se utilizó un software para resolución de problemas matemáticos relacionados con cálculo (maximización y minimización), lo cual ahorró bastante en la parte del tratamiento de la información para llegar a los resultados, sin perder el verdadero significado de los modelos obtenidos.

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

Se presenta a continuación, en forma detallada, el procedimiento utilizado para obtener la información necesaria.

#### **3.6.1. Limpieza del equipo de destilación**

Limpiar el sistema de destilación de tal manera que no existan desviaciones significativas en los resultados debido a impurezas que pueda contener por cualquier motivo, por ejemplo óxidos metálicos. Utilizar vinagre para eliminar los óxidos.

#### **3.6.2. Procedimiento experimental para la recolección de la información del sistema de destilación**

Se presenta a continuación el procedimiento experimental necesario para obtener la información requerida, el cual se separa en tres partes:

##### **3.6.2.1. Preparación del equipo y medición de variables eléctricas**

- Ensamblar correctamente el sistema de destilación con el suministro de agua y conectarlo a la fuente de energía eléctrica, instalando previamente el sistema de medición de magnitudes eléctricas (multímetros);
- Abrir la válvula del suministro público hasta el nivel deseado, con el objetivo de llenar el tanque del destilador;
- Esperar hasta que el nivel del agua dentro del destilador haya llegado al punto en que empieza a rebalsar por el conducto de salida de agua de desecho;

- Cerrar completamente la válvula del suministro público para impedir el paso de agua al sistema;
- Activar las resistencias eléctricas;
- Medir el voltaje y amperaje (un total de seis corridas; esto se debe hacer cada vez que se midan las variables de estudio, ver la siguiente sección);
- Desactivar las resistencias eléctricas y desconectar el amperímetro y voltímetro;
- Conectar nuevamente el sistema eléctrico (sin amperímetro ni voltímetro) y activar las resistencias eléctricas;
- Esperar hasta que empiece a salir agua destilada por el extremo del condensador;
- Abrir la válvula del suministro público de agua, de tal manera que el medidor de flujo indique el primer valor a analizar ( $\dot{V}_{11}$ );
- Esperar a que se establezca el sistema (aproximadamente 10 min).

### 3.6.2.2. Medición de las variables de estudio

- Iniciar simultáneamente la recolección del agua de enfriamiento ( $\dot{m}_3$ ) con la cubeta de 20 L, del agua destilada ( $\dot{m}_4$ ) con la probeta de 100 mL y la cuenta del tiempo ( $t$ );
- Medir la temperatura del agua destilada ( $T_3$ ), del suministro público ( $T_1$ ), de una pequeña muestra de la purga ( $T_6$ ) y del agua de enfriamiento al salir del condensador ( $T_4$ );
- Esperar a que el cronómetro marque 3 min, para retirar inmediata y simultáneamente los recolectores de agua destilada y de agua de enfriamiento; asimismo reiniciar la cuenta del tiempo en el cronómetro;
- Anotar todos los resultados obtenidos en la hoja de datos originales;
- Replicar un total de seis veces (corridas) los pasos anteriores;

- Modificar el flujo de agua que entra al sistema, esperar a que se estabilice el sistema (10 minutos aproximadamente);
- Repetir el procedimiento anterior, de manera que el experimento se lleve a cabo para el flujo de agua entrante al sistema desde 0,2 gpm hasta 1,0 gpm, con un salto de 0,1 gpm.

### 3.6.2.3. Finalización de la práctica

- Apagar el sistema eléctrico del destilador;
- Esperar a que el agua de enfriamiento haga su función después de apagar el sistema eléctrico, para luego cerrar la válvula del suministro público;
- Eliminar el agua remanente por medio del sistema de purga del destilador;
- Desensamblar el sistema de destilación y posteriormente guardarlo.

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

Se detallan a continuación las tablas utilizadas para la recolección de datos:

Tabla II. **Tabla para recolección de información**

Caudal nominal (gpm)	Corrida	V <sub>3</sub> (mL)	V <sub>4</sub> (mL)	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>3</sub> (°C)	T <sub>4</sub> (°C)	T <sub>6</sub> (°C)	ΔV (V)	I (A)	t (s)
0,2	1									
	2									
	3									
	4									
	5									
	6									

Continuación de la tabla II.

Caudal nominal (gpm)	Corrida	V <sub>3</sub> (mL)	V <sub>4</sub> (mL)	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>3</sub> (°C)	T <sub>4</sub> (°C)	T <sub>6</sub> (°C)	ΔV (V)	I (A)	t (s)
0,3	1									
	2									
	3									
	4									
	5									
	6									
0,4	1									
	2									
	3									
	4									
	5									
	6									
0,5	1									
	2									
	3									
	4									
	5									
	6									
0,6	1									
	2									
	3									
	4									
	5									
	6									
0,7	1									
	2									
	3									
	4									
	5									
	6									
0,8	1									
	2									
	3									
	4									
	5									
	6									

Continuación de la tabla II.

0,9	1									
	2									
	3									
	4									
	5									
	6									
1,0	1									
	2									
	3									
	4									
	5									
	6									

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Incertezas de los instrumentos de medición**

Instrumento de medición	Capacidad	Incerteza

Fuente: elaboración propia.

### **3.7.1. Procesamiento de la información**

La información tratada inicialmente es la concerniente a la curva de calibración del rotámetro, ya que fue indispensable conocer el flujo volumétrico y másico del agua entrante al sistema bajo las condiciones del Laboratorio de Fisicoquímica, considerando principalmente el efecto de la temperatura debido a su influencia sobre la densidad de dicho fluido en tratamiento.

#### **3.7.1.1. Balance de materia (curva de calibración del rotámetro)**

El principio utilizado para realizar la curva de calibración fue el de la conservación de la materia, ya que la suma de las corrientes de salida es igual a la única corriente de entrada. Se llevó a cabo una correlación lineal para cumplir con este paso, con la cual se obtuvo un modelo matemático (ver apéndices), siendo este último utilizado para conocer el flujo másico real de la corriente de entrada en los cálculos posteriores. Se detalla el balance de masa en los apéndices del presente trabajo.

#### **3.7.1.2. Densidad del agua**

Se obtuvo un modelo matemático de la densidad del agua para agilizar y automatizar los cálculos en Microsoft Excel. La información para la elaboración de este modelo se extrajo del *Manual del Ingeniero Químico*. (Ver apéndices).

#### **3.7.1.3. Flujo másico de entrada**

Utilizando la curva de calibración del rotámetro, es posible determinar el flujo másico de entrada al sistema usando como factor de conversión la

densidad del fluido (a la temperatura del fluido), la cual también es posible obtenerla con el modelo matemático obtenido según el apartado anterior.

#### **3.7.1.4. Flujo másico de agua destilada**

Dado que se cuenta con la información del volumen de agua destilada recolectado en determinado tiempo, es posible encontrar el flujo volumétrico a partir de estos datos. Sin embargo, es necesario determinar el flujo másico; para lo cual se utiliza el modelo de la densidad encontrado, como se especifica anteriormente (ver apartado 3.7.1.2).

#### **3.7.1.5. Flujo másico de agua de desecho**

Se utiliza un procedimiento análogo al del apartado anterior.

#### **3.7.1.6. Potencia eléctrica**

Las variables eléctricas medidas se utilizarán en esta sección para determinar la potencia eléctrica, la cual está dada directamente por el producto entre la diferencia de potencial eléctrico y la corriente eléctrica.

#### **3.7.1.7. Balance de energía**

El sistema de destilación se analizó cuando se encontraba en estado estable, siendo la única parte útil de la energía eléctrica consumida, la que se utiliza para llevar a cabo el cambio de fase de estado líquido a gaseoso (vaporoso), específicamente del volumen (o flujo volumétrico) del agua destilada obtenida. Para ello se utilizó el valor promedio de la temperatura dentro del tanque de agua del destilador para cada uno de los flujos másicos de

entrada de agua al sistema, utilizando para ello la información de la tabla 2-352 del *Manual del Ingeniero Químico*.

Se hace indispensable realizar el balance de energía debido a que se necesita determinar la eficiencia del sistema, para lo cual es necesario conocer la cantidad de energía eléctrica que realmente se utilizó en el proceso, la cual, por medio del principio de conservación de la energía, se sabe que es la diferencia existente entre la energía total que sale y la que se desperdicia. Se detallan los cálculos de esta sección en los apéndices del presente trabajo.

#### **3.7.1.8. Potencia útil consumida**

La potencia útil consumida se obtiene a partir del flujo másico de agua destilada (que es lo que realmente interesa) y la entalpía de vaporización, la cual se calculó con base en el balance de energía.

#### **3.7.1.9. Eficiencia energética porcentual**

La eficiencia energética porcentual se calcula a partir de la razón entre la potencia útil consumida y la potencial total que entra al sistema por medio de las resistencias eléctricas, la cual se multiplica por cien para expresarla como porcentaje.

#### **3.7.1.10. Energía eléctrica específica**

La energía eléctrica específica se determina por la razón entre la potencia eléctrica total consumida y el flujo másico producido de agua destilada. El valor mínimo que se pueda generar de este parámetro es el fin del presente trabajo.

### **3.7.1.11. Análisis estadístico**

Se utilizará estadística descriptiva como herramienta para validar los resultados obtenidos. Se presentan a continuación los parámetros a utilizar:

#### **3.7.1.11.1. Media aritmética**

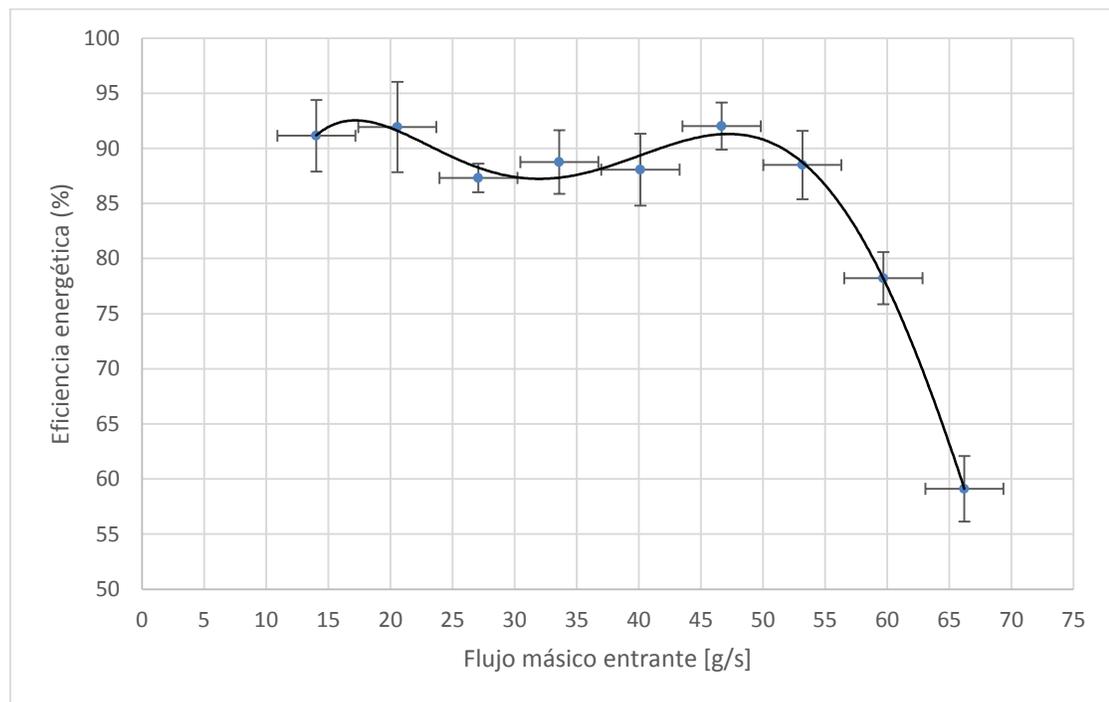
Tomando en cuenta que los valores numéricos de las dimensiones medidas experimentalmente están influidos por la variación de condiciones en el experimento; no se puede tomar como válida una sola medición de cada uno de ellos, sino que debe considerarse como una variable aleatoria; tomando en cuenta lo anterior, se decidió realizar más de una corrida (seis para ser más exactos) para cada uno de los parámetros y de esta manera utilizar un valor promedio (o media aritmética), el cual representa el valor verdadero de la medición, dentro de límites establecidos de error.

#### **3.7.1.11.2. Desviación estándar**

Este parámetro estadístico se utilizará para evaluar el grado de dispersión existente en un grupo de datos medidos, tomando como referencia la media aritmética. Los límites del error se considerarán como el valor de una desviación estándar, es decir, la probabilidad de que un valor aleatorio medido esté dentro de los límites especificados es aproximadamente 65 %.

## 4. RESULTADOS

Figura 5. **Eficiencia energética en función del flujo másico de entrada**



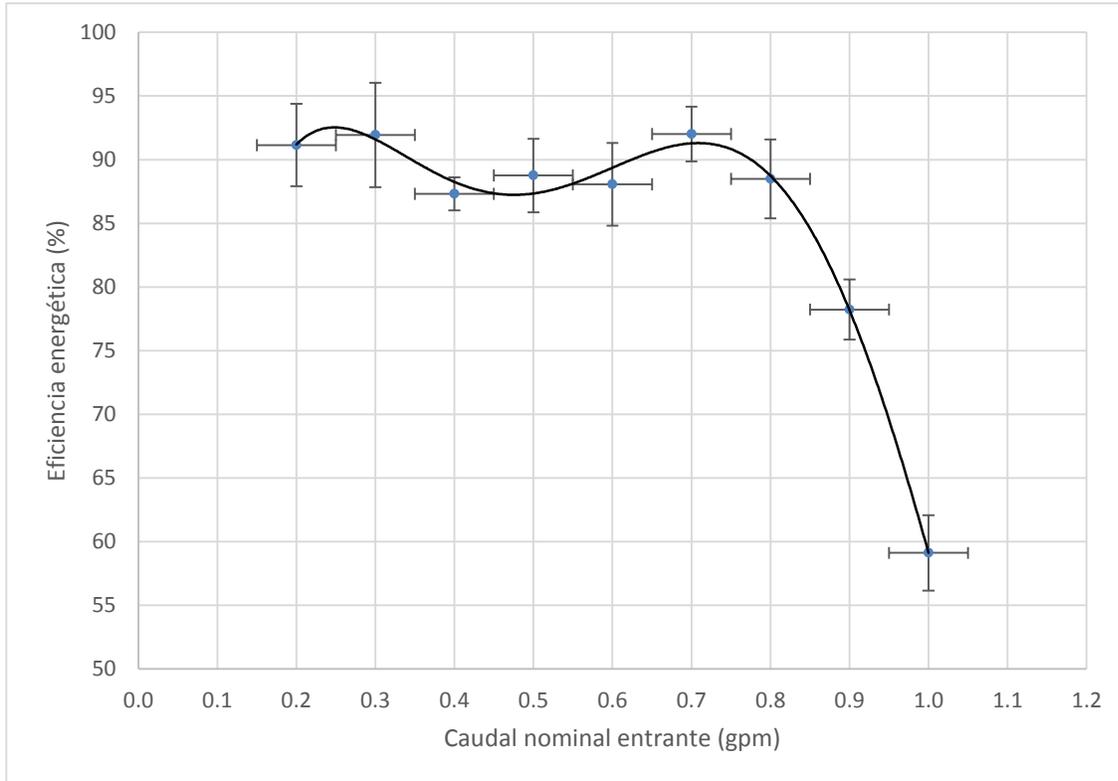
Fuente: elaboración propia, con base en los datos del apéndice 9.

Tabla IV. **Descripción de la figura 5**

Color	Modelo matemático	R <sup>2</sup>	$\Delta x_{\text{máx}}$ [g/s]	$\Delta y_{\text{máx}}$ [%]	Intervalo de validez [g/s]
	$\eta = (1,32\text{E}-06)m_1^5 - (2,94\text{E}-04)m_1^4 + (2,36\text{E}-02)m_1^3 - (8,58\text{E}-01)m_1^2 + (1,40\text{E}+01)m_1 + 8,09\text{E}-01$	0,994	3,145	4,09	[14,04 – 66,22]

Fuente: elaboración propia, con base en los datos de la figura 5.

Figura 6. **Eficiencia energética en función del caudal nominal de entrada**



Fuente: elaboración propia, con base en los datos del apéndice 9.

Tabla V. **Descripción de la figura 6**

Color	Modelo matemático	R <sup>2</sup>	$\Delta x_{\text{máx}}$ [gpm]	$\Delta y_{\text{máx}}$ [%]	Intervalo de validez [gpm]
	$\eta = 1\,562,9 \cdot Q_{1n}^5 - 5\,196,8 \cdot Q_{1n}^4 + 6\,225,2 \cdot Q_{1n}^3 - 3\,356,4 \cdot Q_{1n}^2 + 805,4 \cdot Q_{1n} + 13,9$	0,994	0,05	4,09	[0,2 – 1,0]

Fuente: elaboración propia, con base en los datos de la figura 6.

Tabla VI. **Condiciones óptimas de funcionamiento para la energía eléctrica específica mínima**

	<b>Valor</b>	<b>Incertidumbre</b>
$\hat{E}_{opt}$ [kJ/g]	2,769	$\pm 0,110$
$\dot{m}_{1\ opt}$ [g/s]	17,331	$\pm 3,144$
$Q_{1r\ opt}$ [gpm]	0,248	$\pm 0,050$

Fuente: elaboración propia, con base en los datos del apéndice 11 y 12.

Tabla VII. **Comparación entre el valor de la energía eléctrica específica mínima real del sistema y el valor proporcionado por el fabricante**

<b>Valor experimental [kJ/g]</b>	<b>Valor según fabricante [kJ/g]</b>
$2,787 \pm 0,110$	2,728

Fuente: elaboración propia, con base en los datos del apéndice 11.



## **5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

En el presente trabajo de graduación se tuvo como objetivo principal determinar las condiciones óptimas de funcionamiento del destilador de agua especificado, para lograr una mayor producción con el menor consumo de energía eléctrica. Es por ello que se muestran gráficos en los resultados, en donde se representa la eficiencia energética en función del flujo (tanto másico como volumétrico) de entrada de agua al sistema. Asimismo, se presenta el flujo óptimo de entrada de agua para consumir la menor cantidad de energía eléctrica específica (por unidad másica de agua destilada producida).

Por último se expresa en forma de comparación el valor mínimo de la energía eléctrica específica lograda experimentalmente, respecto del valor proporcionado por el fabricante del equipo. A continuación se interpreta cada una de las gráficas y tablas mencionadas anteriormente.

### **5.1. Eficiencia energética en función del flujo másico de entrada**

En la figura 5 se presenta gráficamente el valor de la eficiencia energética del equipo de destilación en función del flujo másico de agua proveniente del suministro público, la cual posteriormente entra al sistema. Tomar en cuenta que este gráfico es válido únicamente en las condiciones del Laboratorio de Físicoquímica, ya que no existen pruebas de reproducibilidad.

La eficiencia energética indica qué tanto se está aprovechando (para la producción de agua destilada) la energía proveniente de la resistencia eléctrica y posteriormente utilizada para elevar la temperatura y evaporar el agua

contenida en el tanque del destilador, ya que el sistema no es adiabático, lo cual implica pérdidas energéticas.

La eficiencia energética del proceso de producción de agua destilada es relativamente alta (arriba de 90 %), lo cual se debe a que la energía entra al sistema por medio de resistencias eléctricas sumergidas dentro del agua contenida en el tanque, siendo las pérdidas por degradación de la energía a calor las más comunes; las mismas no afectan considerablemente en este preciso caso, ya que ese calor es absorbido por el agua, logrando aumentar la temperatura y evaporarla, siendo esto beneficioso para el proceso.

Las pocas pérdidas que existen se deben a la energía desechada en el agua de enfriamiento y una pequeña porción que se pierde a los alrededores, siendo estas últimas de poca importancia debido a que el fluido que rodea al equipo es el aire, siendo este de mala calidad para transportar el calor.

La información graficada se modeló en un polinomio de quinto grado (ver tabla IV), el cual la describe con bastante exactitud, teniendo un coeficiente de correlación bastante aceptable ( $R^2 = 0,994$ ). Las barras de error por precisión comprenden en su totalidad a la curva del modelo polinomial obtenido, lo cual indica que sí es confiable utilizarlo, ya que dichas barras equivalen a dos veces la desviación estándar de la eficiencia correspondiente a cada flujo másico analizado, teniendo una probabilidad de 95 % de que una medición aleatoria de la eficiencia corresponda a un valor dentro de los límites de error.

El intervalo de validez del polinomio se presenta en la tabla IV, lo cual indica que, aunque el rotámetro esté capacitado para medir un flujo mayor (al especificado) de agua de entrada, el sistema no fue analizado hasta ese nivel debido a que el destilador no lo soporta, produciendo un derrame del fluido al

excederse de 66,22 g/s de agua en la entrada al sistema. Por otro lado, el flujo másico mínimo en el intervalo de validez, corresponde a la medida más pequeña en la escala del rotámetro, siendo un valor independiente de la capacidad del destilador.

En la figura 5 se puede observar que al analizar la línea de tendencia en busca de máximos, existen dos puntos críticos. El destilador funcionará con una eficiencia energética máxima cuando el flujo másico de entrada al sistema sea aproximadamente de 17 g/s. También se observa que cuando el flujo másico de entrada de agua al sistema es aproximadamente de 46 g/s, existe una eficiencia energética muy cercana al máximo absoluto de toda la gráfica, pero con el inconveniente de que el flujo de agua de desecho es más de dos veces mayor, respecto del flujo de agua de desecho en el punto máximo absoluto, teniendo una producción de agua destilada bastante similar en ambos casos (ver apéndice 2, hoja de datos originales).

Cuando la variable de control (flujo de entrada al sistema) excede los 50 g/s, la gráfica muestra un comportamiento poco favorable para los objetivos del presente trabajo, aproximándose rápidamente a cero la eficiencia energética del proceso. Para fines prácticos, la figura 5 muestra únicamente la región de interés de la gráfica, lo cual impide que aparezca el origen en la misma, es decir, el par ordenado (0,0).

## **5.2. Eficiencia energética en función del flujo volumétrico (o caudal) de entrada**

La figura 6 tiene la misma tendencia que la figura 5, pero ambos gráficos no son iguales, ya que las dimensiones de la variable de control (eje horizontal) son distintas: flujo másico y flujo volumétrico (o caudal), respectivamente. El

hecho de que ambas gráficas sean muy parecidas se debe a que la densidad del agua de entrada al sistema de destilación es prácticamente constante conforme varía el flujo de entrada, siendo la variación de esta la única razón por la cual podrían presentarse tendencias distintas en cada uno de los gráficos mencionados.

Al igual que en la figura 5, para la figura 6 el polinomio que describe con alta correlación los datos obtenidos experimentalmente, es de quinto grado. Asimismo, el máximo absoluto es análogo en ambos gráficos, por lo cual no se vuelve a presentar la interpretación en esta sección.

Se presenta la figura 6 en la sección de resultados, debido a que se instaló un rotámetro en la línea de entrada del destilador, refiriéndose como “caudal nominal entrante” al valor (en gpm) que indica la escala de dicho medidor de flujo, el cual permite controlar la cantidad de agua que ingresa al sistema de producción por unidad de tiempo y de esta manera, según la tendencia determinada por la información obtenida por medio de la experimentación, establecer el valor de la lectura del rotámetro en donde existe la más alta probabilidad de producir agua destilada con la mayor eficiencia energética.

Por ello es de suma importancia aclarar que esta figura es válida solamente cuando se utilice el medidor de flujo con el que fue realizado este trabajo de graduación, de lo contrario, se deberá calibrar el medidor de flujo que lo reemplace en determinado momento, de acuerdo con la figura 5, la cual puede servir como patrón de medida.

### **5.3. Condiciones óptimas de funcionamiento para la energía eléctrica específica mínima**

El objetivo principal del presente trabajo es la optimización de la energía eléctrica específica en el proceso de producción de agua destilada, para lo cual se presentan en la tabla VII los valores del flujo másico y volumétrico de entrada de agua al sistema, que permiten que se cumpla lo que se busca, incluyendo también sus respectivas incertezas por precisión, las cuales no exceden al 10 % del valor absoluto de la medida, denotando de esta manera una buena aceptación y confianza en los resultados. El apéndice 11 muestra el valor de la energía eléctrica específica para cada flujo másico de agua de entrada, dado que la temperatura afecta la densidad del agua, por lo tanto el valor especificado del flujo volumétrico puede variar ligeramente de acuerdo con las condiciones ambientales de la experimentación.

Nuevamente es de suma importancia aclarar que el valor del caudal nominal óptimo es válido únicamente para el rotámetro que se utilizó para la elaboración del presente informe. Debido a que el medidor de flujo puede ser reemplazado en cualquier momento, se presenta también el flujo másico óptimo, el cual es independiente del tipo de medidor que se utilice, siendo necesaria la calibración del nuevo instrumento de medición de volumen implementado.

### **5.4. Comparación entre el valor de la energía eléctrica específica mínima real del sistema y el valor proporcionado por el fabricante**

En la tabla VIII se muestra la cantidad mínima de energía que se consume por cada unidad másica de agua destilada producida, en las condiciones en que se encuentra actualmente el destilador clásico marca Barnstead modelo A1007.

Según el fabricante, se debería consumir una cantidad menor de energía específica que el nivel alcanzado experimentalmente, pero se debe tomar en cuenta que las condiciones en que fue probado inicialmente el equipo pueden ser distintas a las condiciones en las que funciona actualmente y el deterioro del mismo también podría afectar. Por ejemplo, según el fabricante, el destilador consume 12 A de corriente eléctrica, pero en las condiciones analizadas, se utilizan únicamente alrededor de 9,5 A (ver hoja de datos originales), lo cual crea una variación en el consumo energético.

Aunque en promedio no se alcance el nivel de producción predicho por el fabricante, si se toma en cuenta la incerteza en las medidas experimentales realizadas para llegar a los resultados, se puede observar que dicho nivel está incluido dentro de los límites del error por precisión, mostrando de esta manera que existe cierta probabilidad de que suceda, aunque normalmente no sea así, si se considera que los datos están posicionados en una distribución normal, estadísticamente hablando.

## CONCLUSIONES

1. Se graficó la eficiencia energética del proceso de destilación de agua en función del flujo que entra al sistema, presentando un comportamiento polinomial de quinto grado con un valor máximo de 92 % cuando el flujo másico de entrada es aproximadamente 17 g/s.
2. El flujo másico de agua de alimentación al sistema de destilación en el cual existe el menor consumo de energía eléctrica por unidad másica de agua destilada producida, es  $17,33 \pm 3,14$  g/s, cuyo error por precisión es menor al 10 % de la magnitud, lo cual indica resultados confiables.
3. El equipo de destilación, en promedio, no produce agua destilada con el mínimo consumo de energía eléctrica específica indicado por el fabricante (2,728 kJ/g), siendo el valor medio actual: 2,769 kJ/g de agua destilada.
4. Se utilizó la metodología establecida en este trabajo de graduación para la elaboración de una práctica (incluida en el apéndice 17) y su implementación en el Laboratorio de Físicoquímica, la cual puede ser comparada con los resultados obtenidos.



## RECOMENDACIONES

1. La utilización del destilador implica que se le debe dar mantenimiento, especialmente por el óxido metálico que acumula; utilizar vinagre para este fin (ya que es ácido acético al 5 % en volumen), procurando que esta sustancia no tenga un contacto muy prolongado tanto con el equipo como con sus alrededores, ya que puede provocar daños; la experiencia dice que el ácido mencionado (aunque esté diluido) elimina la capa de protección anticorrosiva de los lavaplatos del laboratorio.
2. 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, lo cual produce que el agua de enfriamiento salga a una temperatura que puede ser dañina para la piel del operador. Por lo tanto se debe tener cuidado, evitando el contacto con dicho fluido.
3. Evitar el contacto directo con la parte superior del destilador (a partir de la entrada del fluido al condensador), ya que al trabajar en estado estable, dicha parte se encuentra a una temperatura superior a 75 °C, pudiendo provocar daños en la salud del operador.
4. No permitir un ingreso mayor a 66,22 g/s de agua al sistema (aproximadamente 1 gpm a temperatura ambiente), debido a que tiende a derramarse el fluido al pasar por el tubo de entrada del equipo.



## BIBLIOGRAFÍA

1. FELDER, Richard M; ROUSSEAU, Ronald W. *Principios elementales de los procesos químicos*. 3a ed. México: Limusa, 2003. 686 p.
2. FIGUERA, Pau. *Optimización de productos y procesos industriales*. España: Gestión 2000, 2006. 220 p.
3. GEANKOPLIS, Christie, J. *Principios de transportes y operaciones unitarias*. 3a ed. México: Continental, 1998. 678 p.
4. JIMÉNEZ, Arturo. *Diseño de procesos en ingeniería química*. México: Reverté, 2003. 272 p.
5. KERN, Donald Q. *Procesos de transferencia de calor*. México: McGraw-Hill, 1965. 981 p.
6. MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos*. 6a ed. México: Pearson, 2006. 629 p.
7. PERRY, Robert H. *Perry's chemical engineers' handbook*. 7a ed. Estados Unidos: McGraw-Hill, 1999. 2 582 p.
8. ROLLE, Kurt C. *Termodinámica*. México: Pearson Educación, 2006. 611 p.

9. STEWART, James. *Cálculo de una variable, conceptos y contextos*. 4a ed. México: Cengage Learning, 2010. 250 p.
10. TAMAYO, Óscar Eugenio; LÓPEZ, Ana Milena. *Las prácticas de laboratorio en la enseñanza de las ciencias naturales*. Colombia: Manizales, 2012. 21 p.
11. WALPOLE, Ronald E. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. 6a ed. México: Pearson Education, 1999. 703 p.

# APÉNDICES

## Apéndice 1. Metodología de cálculo

En esta sección se detallan los cálculos hechos en el presente trabajo. Se presentan ejemplos basados principalmente en una de las corridas llevada a cabo durante el experimento.

### A. Modelos matemáticos

Se presentan a continuación las herramientas matemáticas utilizadas para analizar la información experimental obtenida:

- Regresión lineal: se utilizó para obtener un modelo matemático de una serie de datos, cuya tendencia es de una línea recta en el plano “xy”. Se utilizó Microsoft Excel 2013 para determinarlo. La serie de datos en la que se utilizó esta herramienta es en la curva de calibración del rotámetro. Se representa de la siguiente manera:

$$y = mx + b$$

Ejemplo: regresión lineal de la curva de calibración del rotámetro, expresando el caudal real en función del caudal nominal, ambos en gpm.

$$Q_{1r} = 1,0432 * Q_{1n} + 0,0139 \quad \text{(Ecuación 1)}$$

- Modelo polinomial de grado mayor o igual a dos: este tipo de modelo se utiliza con bastante frecuencia en el presente trabajo, siendo útil para describir el comportamiento de la densidad del agua en función de la temperatura, la energía específica en función del flujo másico de entrada (o la lectura del rotámetro) y la eficiencia del intercambio energético en función del flujo másico de entrada (y la lectura del rotámetro). La herramienta utilizada para encontrar el modelo polinomial que describiera mejor la información fue Microsoft Excel 2013. La forma general es la siguiente:

$$y = a_n * x^n + \dots + a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0$$

Ejemplo: el modelo polinomial utilizado para expresar la densidad del agua en función de la temperatura es el siguiente:

$$\rho = (1,2376E - 05)x^3 - (5,3064E - 03)x^2 - (1,3295E - 02)x + 1,0005E + 03$$

(Ecuación 2)

## B. Otros cálculos

Se muestran a continuación los cálculos detallados de una de las corridas llevadas a cabo en la experimentación.

Nota: los ejemplos que se presentan en este apartado son los cálculos hechos para la corrida número 1, siendo el flujo nominal igual a 0,2 gpm.

- Caudal real de entrada: se utiliza la ecuación obtenida por medio de la regresión lineal que se mostró en la sección anterior. Ejemplo:

$$Q_{1r} = 1,0377 * (0,2) + 0,0157$$

$$Q_{1r} = 0,2232 \text{ gpm}$$

- Densidad del agua: es necesario calcular la densidad del agua que entra al sistema (proveniente del suministro público,  $\rho_1$ ), del agua destilada (en el momento que sale del condensador,  $\rho_3$ ) y del agua de desecho (cuando abandona el condensador,  $\rho_4$ ). Para ello se utiliza el modelo cúbico presentado en la sección anterior. Ejemplo: densidad del agua destilada que sale del sistema:

$$\rho_1 = (1,2376E - 05)(25 \text{ }^\circ\text{C})^3 - (5,3064E - 03)(25 \text{ }^\circ\text{C})^2 - (1,3295E - 02)(25 \text{ }^\circ\text{C}) + 1,0005E + 03$$

$$\rho_1 = 997,0 \text{ kg/m}^3$$

El resultado anterior debe convertirse a g/mL para que sea dimensionalmente congruente en las operaciones matemáticas que se realizarán posteriormente.

- Flujo másico de agua de agua destilada: dado que hasta este punto ya se cuenta con el volumen recaudado en determinada cantidad de tiempo y con la densidad a la temperatura de salida del sistema, entonces es posible determinar el flujo másico.

$$\dot{m}_3 = \frac{V_3 * \rho_3}{t} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Ejemplo:

$$\dot{m}_3 = \frac{(67 \text{ mL}) * (0,997 \frac{\text{g}}{\text{mL}})}{180 \text{ s}}$$

$$\dot{m}_3 = 0,3711 \text{ g/s}$$

- Flujo másico de agua de entrada al sistema de destilación: se presenta una ecuación con la que se determina el flujo másico de entrada de agua al sistema, el cual depende del caudal real de entrada, siendo necesario convertir este último de gpm a m<sup>3</sup>/s.

$$\dot{m}_1 = Q_{1r} * \rho_1 \quad \text{(Ecuación 4)}$$

Ejemplo:

$$\dot{m}_1 = \left( 0,2232 \frac{\text{gal}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} * \frac{3,78 \text{ L}}{1 \text{ gal}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \right) * \left( 997,0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$\dot{m}_1 = 0,014 \text{ kg/s}$$

El resultado anterior debe ser convertido de kg/s a g/s para que sea congruente dimensionalmente con el resto de las magnitudes y de esta manera poder operarlas entre sí.

- Flujo de agua de desecho: la ecuación para determinar el flujo másico del agua de desecho es análoga a la del agua destilada:

$$\dot{m}_4 = \frac{V_4 * \rho_4}{t} \quad \text{(Ecuación 5)}$$

Ejemplo:

$$\dot{m}_4 = \frac{(2\,420\text{ mL}) * \left(0,993 \frac{\text{g}}{\text{mL}}\right)}{180\text{ s}}$$

$$\dot{m}_4 = 13,35\text{ g/s}$$

- Potencia eléctrica: se utiliza la siguiente ecuación para determinar la potencia eléctrica que consume el destilador:

$$P_{eléc} = \Delta V * I \quad (\text{Ecuación 6})$$

Ejemplo:

$$P_{eléc} = (112,1\text{ V})(9,50\text{ A})$$

$$P_{eléc} = 1065\text{ W}$$

- Balance de energía (entalpía de vaporización): utilizando información del *Manual del Ingeniero Químico* y el siguiente análisis energético, se calcula la entalpía de vaporización del agua a la temperatura dentro del tanque del destilador. El balance energético se desarrolla únicamente para el evaporador del sistema, no tomando en cuenta el destilador, ya que únicamente interesa conocer la eficiencia en la evaporación cuando el sistema se encuentra en estado estable.

*Energía que entra = Energía que sale*

$$E_e + \dot{m}_3 \hat{h}_{\text{suministro público}} = \dot{m}_3 \hat{h}_{\text{vapor}} + \text{Pérdidas}$$

Existen dos etapas en la absorción de energía por parte del fluido dentro del tanque:

- Elevación de la temperatura
- Evaporación del agua

El balance queda expresado de la siguiente forma:

$$E_e = \dot{m}_3\lambda + \dot{m}_3c_p(T_6 - T_1) + \text{Pérdidas} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Para determinar la eficiencia del sistema, es necesario contar con tres de las cuatro cantidades de la ecuación anterior:  $E_e$ ,  $\dot{m}_3\lambda$  y  $\dot{m}_3c_p(T_6 - T_1)$ , ya que lo que realmente interesa es la energía que se utilizó para los fines del proceso, y el total de energía que entró al sistema, la cual tiene un costo. El cambio de entalpía que sufre el volumen de agua destilada cuando el sistema se encuentra en estado estable es la suma del calor sensible y el calor latente absorbidos. La forma de saber la cantidad de fluido que realmente aprovechó esa energía, es midiendo el volumen del agua destilada. Se hace uso del *Manual del Ingeniero Químico* [Ref. 7, tabla 2-352] para obtener el valor de la entalpía de vaporización ( $\lambda$ ), con la siguiente ecuación:

$$\lambda = \hat{h}_v - \hat{h}_l$$

Ejemplo: el valor de la entalpía del líquido a 75 °C es 313,3 kJ/kg, y la del vapor a esa misma temperatura es 2 635,4 kJ/kg. Se presenta a continuación la entalpía de vaporización:

$$\lambda = 2\,635,4 \frac{kJ}{kg} - 313,3 \frac{kJ}{kg}$$

$$\lambda = 2\,322,1 \text{ kJ/kg}$$

Se presentan en los siguientes apartados los demás cálculos que prosiguen al balance de energía del sistema en estado estacionario.

- Potencia útil consumida: la siguiente ecuación se utiliza para determinar la potencia útil del total que ingresa al sistema de destilación.

$$P_{\text{útil}} = \dot{m}_3 * \lambda + \dot{m}_3 c_p (T_6 - T_1) \quad (\text{Ecuación 8})$$

Ejemplo:

$$P_{\text{útil}} = \left(0,3711 \frac{g}{s}\right) * \left[ \left(2\,322,1 \frac{J}{g}\right) + \left(4,184 \frac{J}{g * ^\circ C}\right) (78^\circ C - 21^\circ C) \right]$$

$$P_{\text{útil}} = 950,29 \text{ W}$$

- Eficiencia energética porcentual: relacionando la potencia consumida y la potencia útil en el proceso de destilación, la eficiencia energética porcentual del proceso está dada por:

$$\eta = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{eléc}}} * 100 \% \quad (\text{Ecuación 9})$$

Ejemplo:

$$\eta = \frac{950,29 \text{ W}}{1\,065 \text{ W}} * 100 \%$$

$$\eta = 89,23 \%$$

- Energía eléctrica específica: dado que ya se cuenta con la potencia eléctrica consumida y el flujo másico de agua destilada, es posible calcular la energía eléctrica específica con la siguiente ecuación:

$$\hat{E}_e = \frac{P_{eléc}}{\dot{m}_3} \quad (\text{Ecuación 10})$$

$$\hat{E}_e = \frac{1\,065 \text{ J/s}}{0,3711 \text{ g/s}} = 2\,869,54 \text{ J/g}$$

El resultado anterior se convierte de J/g a kJ/g para que haya una mejor facilidad en el manejo de datos.

### C. Análisis de error

Se analizaron dos tipos de error (o incerteza): por precisión y por incertidumbre de los instrumentos de medición. Primero se muestra la metodología para determinar el valor promedio de la medición y posteriormente la forma en que se calcularon ambos tipos de error.

- Valor promedio: la ecuación utilizada para calcular el valor promedio de una serie de datos es la siguiente:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Ejemplo: el valor promedio de la eficiencia porcentual cuando el caudal nominal de entrada es 0.2 gpm es el siguiente:

$$\bar{\eta} = \frac{89,23 \% + 89,60 \% + 91,25 \% + 92,31 \% + 93,52 \% + 90,94 \%}{6}$$

$$\bar{\eta} = 91,14 \%$$

- Error por precisión: con este fin se utilizó como herramienta la desviación estándar del conjunto de datos. La ecuación es la siguiente:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Ejemplo: la desviación estándar de la eficiencia porcentual está dada por:

$$s = \sqrt{\frac{(89,23 - 91,14)^2 + (89,60 - 91,14)^2 + (91,25 - 91,14)^2 + (92,31 - 91,14)^2 + (93,52 - 91,14)^2 + (90,94 - 91,14)^2}{6 - 1}}$$

$$s = 1,62 \%$$

Dado que el presente trabajo se expresa el error como dos desviaciones estándar, entonces el error por precisión es el siguiente:

$$s = 2 * (1,62 \%) = 3,24 \%$$

- Error por incertidumbre en los instrumentos: dado que cada medición directa lleva implícita la incerteza del instrumento con el que se está realizando, por ello se presenta este tipo de error para conocer qué tanto afecta a los resultados finales. La ecuación general es la siguiente:

$$\Delta y(x_1, x_2, x_3, \dots) = \sum_{x_i} \left| \frac{\partial y}{\partial x_i} \right| * \Delta x_i \quad (\text{Ecuación 13})$$

Ejemplo: el error de la potencia eléctrica está dado por:

$$\Delta P_{eléc} = \left| \frac{\partial(VI)}{\partial V} \right| \Delta V + \left| \frac{\partial(VI)}{\partial I} \right| \Delta I$$

$$\Delta P_{eléc} = I \Delta V + V \Delta I$$

$$\Delta P_{eléc} = (9,50 A)(0,05 V) + (112,1 V)(0,005 A)$$

$$\Delta P_{eléc} = 1,04 W$$

Apéndice 2. Hoja de datos originales (parte 1)

$Q_{1n}$ [gpm]	Corrida	$V_3$ [mL]	$V_4$ [mL]	$\Delta V$ [V]	$I$ [A]	$t$ [s]
0,2	1	67	2420	112,1	9,50	180
	2	67	2470	112,0	9,47	180
	3	68	2440	112,2	9,42	180
	4	69	2650	112,0	9,45	180
	5	70	2520	112,2	9,48	180
	6	68	2510	112,2	9,47	180
0,3	1	70	3320	112,3	9,35	180
	2	70	3520	112,1	9,37	180
	3	67	3690	112,0	9,40	180
	4	68	3510	112,3	9,39	180
	5	67	3520	112,2	9,42	180
	6	68	3510	112,0	9,37	180
0,4	1	65	4870	112,0	9,45	180
	2	66	4880	112,1	9,43	180
	3	65	4850	112,0	9,42	180
	4	65	4870	112,2	9,44	180
	5	65	4880	112,2	9,44	180
	6	66	4850	112,3	9,43	180
0,5	1	66	5990	112,1	9,43	180
	2	65	6000	112,3	9,39	180
	3	67	5950	112,1	9,37	180
	4	67	5990	112,3	9,48	180
	5	68	5970	112,1	9,43	180
	6	66	5970	112,0	9,43	180
0,6	1	65	7150	112,1	9,49	180
	2	66	7180	112,2	9,45	180
	3	66	7210	112,3	9,44	180
	4	68	7180	112,1	9,43	180
	5	67	7190	112,0	9,50	180
	6	65	7150	112,3	9,38	180
0,7	1	69	8520	112,0	9,45	180
	2	69	8490	112,3	9,38	180
	3	68	8550	112,2	9,39	180
	4	70	8450	112,1	9,46	180
	5	68	8450	112,1	9,46	180
	6	69	8490	112,3	9,43	180

Continuación del apéndice 2.

$Q_{1n}$ [gpm]	Corrida	$V_3$ [mL]	$V_4$ [mL]	$\Delta V$ [V]	$I$ [A]	$t$ [s]
0,8	1	66	9720	112,1	9,40	180
	2	67	9750	112,0	9,41	180
	3	66	9690	112,3	9,40	180
	4	68	9600	112,3	9,39	180
	5	65	9620	112,2	9,50	180
	6	66	9610	112,3	9,44	180
0,9	1	59	10620	112,1	9,37	180
	2	58	10610	112,0	9,39	180
	3	59	10600	112,0	9,44	180
	4	60	10620	112,1	9,45	180
	5	57	10620	112,3	9,38	180
	6	59	10610	112,1	9,48	180
1,0	1	44	11930	112,0	9,39	180
	2	44	11910	112,1	9,42	180
	3	43	11930	112,1	9,43	180
	4	46	11950	112,3	9,45	180
	5	44	11900	112,1	9,41	180
	6	46	11920	112,0	9,48	180

Fuente: Laboratorio de Físicoquímica, Escuela de Ingeniería Química, FIUSAC.

### Apéndice 3. Hoja de datos originales (parte 2)

$Q_{1n}$ [gpm]	Corrida	$T_1$ [°C]	$T_3$ [°C]	$T_4$ [°C]	$T_6$ [°C]
0,2	1	21	25	38	78
	2	21	25	38	78
	3	20	25	37	77
	4	20	25	39	76
	5	20	24	38	78
	6	20	24	38	78
0,3	1	21	24	32	77
	2	21	24	32	77
	3	21	24	33	78
	4	21	24	31	75
	5	21	23	32	76
	6	21	23	32	77

Continuación del apéndice 3.

$Q_{1n}$ [gpm]	Corrida	$T_1$ [°C]	$T_3$ [°C]	$T_4$ [°C]	$T_6$ [°C]
0,4	1	21	23	29	76
	2	21	23	28	75
	3	21	23	28	75
	4	21	23	29	77
	5	21	23	29	76
	6	21	23	29	76
0,5	1	22	24	28	75
	2	22	24	28	75
	3	22	24	27	76
	4	22	24	28	74
	5	21	23	28	75
	6	21	23	28	75
0,6	1	22	23	26	74
	2	22	23	26	75
	3	21	23	26	74
	4	21	23	26	74
	5	21	23	26	76
	6	21	23	26	75
0,7	1	20	23	26	75
	2	19	23	26	74
	3	20	23	26	74
	4	20	23	26	75
	5	20	23	26	73
	6	20	23	25	76
0,8	1	21	24	26	75
	2	21	24	26	73
	3	21	24	25	73
	4	21	23	25	74
	5	21	23	25	77
	6	21	23	25	74
0,9	1	22	23	23	74
	2	22	23	25	75
	3	22	23	25	73
	4	21	23	25	73
	5	21	23	24	74
	6	21	23	23	73

Continuación del apéndice 3.

$Q_{1n}$ [gpm]	Corrida	$T_1$ [°C]	$T_3$ [°C]	$T_4$ [°C]	$T_6$ [°C]
1,0	1	22	23	25	72
	2	22	23	24	72
	3	22	23	24	73
	4	21	23	23	71
	5	21	23	23	72
	6	21	23	23	73

Fuente: Laboratorio de Físicoquímica, Escuela de Ingeniería Química, FIUSAC.

#### Apéndice 4. Hoja de datos originales (parte 3)

Instrumento de medición	Capacidad	Incerteza
Probeta	100 mL	$\pm 0,5$ mL
Probeta	1 000 mL	$\pm 0,5$ mL
Termómetro	-10 – 110 °C	$\pm 0,5$ °C
Voltímetro	0,2 – 1 000 V	$\pm 0,05$ V
Amperímetro	0,2 – 20 A	$\pm 0,005$ A
Cronómetro	-----	$\pm 0,5$ s
Rotámetro	0,2 – 2,0 gpm	$\pm 0,1$ gpm

Fuente: Laboratorio de Físicoquímica, Escuela de Ingeniería Química, FIUSAC.

#### Apéndice 5. Densidades

$Q_{1n}$ [gpm]	Corrida	$\rho_1$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_3$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_4$ [kg/m <sup>3</sup> ]
0,2	1	998,0	997,0	993,0
	2	998,0	997,0	993,0
	3	998,2	997,0	993,4
	4	998,2	997,0	992,6
	5	998,2	997,3	993,0
	6	998,2	997,3	993,0

Continuación del apéndice 5.

$Q_{1n}$ [gpm]	Corrida	$\rho_1$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_3$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_4$ [kg/m <sup>3</sup> ]
0,3	1	998,0	997,3	995,0
	2	998,0	997,3	995,0
	3	998,0	997,3	994,7
	4	998,0	997,3	995,4
	5	998,0	997,5	995,0
	6	998,0	997,5	995,0
0,4	1	998,0	997,5	996,0
	2	998,0	997,5	996,2
	3	998,0	997,5	996,2
	4	998,0	997,5	996,0
	5	998,0	997,5	996,0
	6	998,0	997,5	996,0
0,5	1	997,8	997,3	996,2
	2	997,8	997,3	996,2
	3	997,8	997,3	996,5
	4	997,8	997,3	996,2
	5	998,0	997,5	996,2
	6	998,0	997,5	996,2
0,6	1	997,8	997,5	996,8
	2	997,8	997,5	996,8
	3	998,0	997,5	996,8
	4	998,0	997,5	996,8
	5	998,0	997,5	996,8
	6	998,0	997,5	996,8
0,7	1	998,2	997,5	996,8
	2	998,4	997,5	996,8
	3	998,2	997,5	996,8
	4	998,2	997,5	996,8
	5	998,2	997,5	996,8
	6	998,2	997,5	997,0
0,8	1	998,0	997,3	996,8
	2	998,0	997,3	996,8
	3	998,0	997,3	997,0
	4	998,0	997,5	997,0
	5	998,0	997,5	997,0
	6	998,0	997,5	997,0

Continuación del apéndice 5.

$Q_{1n}$ [gpm]	Corrida	$\rho_1$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_3$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_4$ [kg/m <sup>3</sup> ]
0,9	1	997,8	997,5	997,5
	2	997,8	997,5	997,0
	3	997,8	997,5	997,0
	4	998,0	997,5	997,0
	5	998,0	997,5	997,3
	6	998,0	997,5	997,5
1,0	1	997,8	997,5	997,0
	2	997,8	997,5	997,3
	3	997,8	997,5	997,3
	4	998,0	997,5	997,5
	5	998,0	997,5	997,5
	6	998,0	997,5	997,5

Fuente: elaboración propia, utilizando la ecuación 2.

#### Apéndice 6. Flujo másico y energía eléctrica específica

$Q_{1n}$ [gpm]	Corrida	$\dot{m}_1$ [g/s]	$\dot{m}_3$ [g/s]	$\dot{m}_4$ [g/s]	$\hat{E}_e$ [g/s]
0,2	1	13,99	0,3711	13,35	2,8695
	2	13,99	0,3711	13,63	2,8579
	3	13,99	0,3767	13,47	2,8060
	4	13,99	0,3822	14,61	2,7692
	5	13,99	0,3878	13,90	2,7425
	6	13,99	0,3768	13,85	2,8202
0,3	1	20,55	0,3878	18,35	2,7073
	2	20,55	0,3878	19,46	2,7083
	3	20,55	0,3712	20,39	2,8361
	4	20,55	0,3768	19,41	2,7989
	5	20,55	0,3713	19,46	2,8465
	6	20,55	0,3768	19,40	2,7848
0,4	1	27,11	0,3602	26,95	2,9382
	2	27,11	0,3658	27,01	2,8901
	3	27,11	0,3602	26,84	2,9289
	4	27,11	0,3602	26,95	2,9403
	5	27,11	0,3602	27,00	2,9403
	6	27,11	0,3658	26,84	2,8953

Continuación del apéndice 6.

$Q_{1n}$ [gpm]	Corrida	$\dot{m}_1$ [g/s]	$\dot{m}_3$ [g/s]	$\dot{m}_4$ [g/s]	$\hat{E}_e$ [g/s]
0,5	1	33,66	0,3657	33,15	2,8908
	2	33,66	0,3601	33,21	2,9281
	3	33,66	0,3712	32,94	2,8296
	4	33,66	0,3712	33,15	2,8679
	5	33,67	0,3768	33,04	2,8051
	6	33,67	0,3658	33,04	2,8875
0,6	1	40,22	0,3602	39,59	2,9533
	2	40,22	0,3658	39,76	2,8988
	3	40,23	0,3658	39,93	2,8984
	4	40,23	0,3768	39,76	2,8051
	5	40,23	0,3713	39,82	2,8656
	6	40,23	0,3602	39,59	2,9242
0,7	1	46,80	0,3824	47,18	2,7679
	2	46,81	0,3824	47,02	2,7547
	3	46,80	0,3768	47,35	2,7957
	4	46,80	0,3879	46,79	2,7336
	5	46,80	0,3768	46,79	2,8140
	6	46,80	0,3824	47,03	2,7694
0,8	1	53,35	0,3657	53,83	2,8816
	2	53,35	0,3712	53,99	2,8391
	3	53,35	0,3657	53,67	2,8868
	4	53,35	0,3768	53,18	2,7982
	5	53,35	0,3602	53,29	2,9590
	6	53,35	0,3658	53,23	2,8984
0,9	1	59,89	0,3270	58,85	3,2124
	2	59,89	0,3214	58,77	3,2719
	3	59,89	0,3270	58,71	3,2336
	4	59,90	0,3325	58,83	3,1859
	5	59,90	0,3159	58,84	3,3347
	6	59,90	0,3270	58,80	3,2502
1,0	1	66,45	0,2438	66,08	4,3129
	2	66,45	0,2438	65,99	4,3306
	3	66,45	0,2383	66,10	4,4360
	4	66,46	0,2549	66,23	4,1629
	5	66,46	0,2438	65,95	4,3260
	6	66,46	0,2549	66,06	4,1650

Fuente: elaboración propia, con base en las ecuaciones 3, 4, 5 y 10.

Apéndice 7. **Eficiencia, potencia eléctrica consumida y útil**

$Q_{1n}$ [gpm]	Corrida	$P_{elec}$ [W]	$P_{útil}$ [W]	$\eta$
0,2	1	1065,0	950,29	89,23
	2	1060,6	950,29	89,60
	3	1056,9	964,47	91,25
	4	1058,4	977,06	92,31
	5	1063,7	994,71	93,52
	6	1062,5	966,29	90,94
0,3	1	1050,0	991,47	94,43
	2	1050,4	991,47	94,39
	3	1052,8	950,53	90,29
	4	1054,5	959,99	91,04
	5	1056,9	947,65	89,66
	6	1049,4	963,37	91,80
0,4	1	1058,4	919,37	86,86
	2	1057,1	931,98	88,16
	3	1055,0	917,86	87,00
	4	1059,2	920,87	86,94
	5	1059,2	919,37	86,80
	6	1059,0	933,51	88,15
0,5	1	1057,1	930,22	88,00
	2	1054,5	916,13	86,88
	3	1050,4	945,87	90,05
	4	1064,6	942,76	88,56
	5	1057,1	960,22	90,84
	6	1056,2	931,98	88,24
0,6	1	1063,8	914,84	86,00
	2	1060,3	930,45	87,75
	3	1060,1	930,45	87,77
	4	1057,1	958,64	90,69
	5	1064,0	947,65	89,07
	6	1053,4	917,86	87,14
0,7	1	1058,4	975,94	92,21
	2	1053,4	975,94	92,65
	3	1053,6	960,22	91,14
	4	1060,5	990,09	93,36
	5	1060,5	958,64	90,40
	6	1059,0	977,54	92,31

Continuación del apéndice 7.

$Q_{1n}$ [gpm]	Corrida	$P_{elec}$ [W]	$P_{útil}$ [W]	$\eta$
0,8	1	1053,7	931,75	88,42
	2	1053,9	942,76	89,45
	3	1055,6	928,69	87,98
	4	1054,5	958,64	90,91
	5	1065,9	920,87	86,39
	6	1060,1	930,45	87,77
0,9	1	1050,4	830,40	79,06
	2	1051,7	817,67	77,75
	3	1057,3	829,03	78,41
	4	1059,3	844,47	79,72
	5	1053,4	803,57	76,29
	6	1062,7	830,40	78,14
1,0	1	1051,7	617,24	58,69
	2	1056,0	617,24	58,45
	3	1057,1	604,21	57,16
	4	1061,2	645,29	60,81
	5	1054,9	618,26	58,61
	6	1061,8	647,43	60,98

Fuente: elaboración propia, con base en las ecuaciones 6, 8 y 9.

### Apéndice 8. Error por incertidumbre de los instrumentos de medida

$Q_{1n}$ [gpm]	Corrida	$\Delta\dot{m}_1$ [g/s]	$\Delta\dot{m}_3$ [g/s]	$\Delta P_{elec}$ [W]	$\Delta P_{útil}$ [W]	$\Delta\eta$	$\Delta\hat{E}_e$ [kJ/g]
0,2	1	3,144	0,004	1,036	11,284	1,146	0,032
	2	3,144	0,004	1,034	11,284	1,151	0,032
	3	3,144	0,004	1,032	11,347	1,163	0,031
	4	3,144	0,004	1,033	11,393	1,167	0,030
	5	3,144	0,004	1,035	11,491	1,171	0,030
	6	3,144	0,004	1,035	11,366	1,158	0,031
0,3	1	3,144	0,004	1,029	11,459	1,184	0,030
	2	3,144	0,004	1,029	11,459	1,183	0,030
	3	3,144	0,004	1,030	11,287	1,160	0,032
	4	3,144	0,004	1,031	11,302	1,161	0,031
	5	3,144	0,004	1,032	11,258	1,153	0,032
	6	3,144	0,004	1,029	11,336	1,170	0,031

Continuación del apéndice 8.

$Q_{1n}$ [gpm]	Corrida	$\Delta\dot{m}_1$ [g/s]	$\Delta\dot{m}_3$ [g/s]	$\Delta P_{elec}$ [W]	$\Delta P_{\acute{u}til}$ [W]	$\Delta\eta$	$\Delta\hat{E}_e$ [kJ/g]
0,4	1	3,144	0,004	1,033	11,133	1,137	0,034
	2	3,144	0,004	1,032	11,180	1,144	0,033
	3	3,144	0,004	1,031	11,117	1,139	0,034
	4	3,144	0,004	1,033	11,149	1,137	0,034
	5	3,144	0,004	1,033	11,133	1,136	0,034
	6	3,144	0,004	1,033	11,195	1,143	0,033
0,5	1	3,143	0,004	1,032	11,161	1,142	0,033
	2	3,143	0,004	1,031	11,099	1,137	0,034
	3	3,143	0,004	1,029	11,239	1,158	0,032
	4	3,143	0,004	1,036	11,208	1,139	0,032
	5	3,144	0,004	1,032	11,304	1,158	0,031
	6	3,144	0,004	1,032	11,180	1,145	0,033
0,6	1	3,143	0,004	1,035	11,086	1,126	0,034
	2	3,143	0,004	1,034	11,164	1,138	0,033
	3	3,144	0,004	1,034	11,164	1,139	0,033
	4	3,144	0,004	1,032	11,288	1,156	0,031
	5	3,144	0,004	1,035	11,258	1,145	0,032
	6	3,144	0,004	1,031	11,117	1,141	0,033
0,7	1	3,144	0,004	1,033	11,383	1,165	0,030
	2	3,145	0,004	1,031	11,383	1,171	0,030
	3	3,144	0,004	1,031	11,304	1,162	0,031
	4	3,144	0,004	1,034	11,445	1,170	0,030
	5	3,144	0,004	1,034	11,288	1,153	0,031
	6	3,144	0,004	1,033	11,399	1,166	0,030
0,8	1	3,144	0,004	1,031	11,177	1,147	0,033
	2	3,144	0,004	1,031	11,208	1,151	0,032
	3	3,144	0,004	1,032	11,145	1,142	0,033
	4	3,144	0,004	1,031	11,288	1,159	0,031
	5	3,144	0,004	1,036	11,149	1,130	0,034
	6	3,144	0,004	1,034	11,164	1,139	0,033

Continuación del apéndice 8.

$Q_{1n}$ [gpm]	Corrida	$\Delta\dot{m}_1$ [g/s]	$\Delta\dot{m}_3$ [g/s]	$\Delta P_{elec}$ [W]	$\Delta P_{útil}$ [W]	$\Delta\eta$	$\Delta\hat{E}_e$ [kJ/g]
0,9	1	3,143	0,004	1,029	10,712	1,097	0,039
	2	3,143	0,004	1,030	10,665	1,090	0,040
	3	3,143	0,004	1,032	10,697	1,088	0,040
	4	3,144	0,004	1,033	10,774	1,095	0,039
	5	3,144	0,004	1,031	10,603	1,081	0,042
	6	3,144	0,004	1,035	10,712	1,084	0,040
1,0	1	3,143	0,003	1,030	9,749	0,984	0,065
	2	3,143	0,003	1,032	9,749	0,980	0,065
	3	3,143	0,003	1,032	9,701	0,974	0,068
	4	3,144	0,003	1,034	9,873	0,990	0,061
	5	3,144	0,003	1,031	9,763	0,983	0,065
	6	3,144	0,003	1,034	9,902	0,992	0,061

Fuente: elaboración propia, con base en la ecuación 13.

**Apéndice 9. Eficiencia energética promedio con su respectivo error por precisión en función del flujo másico de entrada**

$Q_{1n}$ [gpm]	$\dot{m}_1$ [g/s]	$\eta$ [%]	$\Delta\eta$ (Desv. Est.) [%]	$\Delta\eta$ [%]	$\Delta\dot{m}_1$ [g/s]
0,20	13,99	91,14	3,24	1,17	3,14
0,30	20,55	91,93	4,09	1,18	3,14
0,40	27,11	87,32	1,30	1,14	3,14
0,50	33,66	88,76	2,89	1,16	3,14
0,60	40,22	88,07	3,25	1,16	3,14
0,70	46,80	92,01	2,14	1,17	3,15
0,80	53,35	88,49	3,09	1,16	3,14
0,90	59,90	78,23	2,36	1,10	3,14
1,00	66,46	59,12	2,97	0,99	3,14

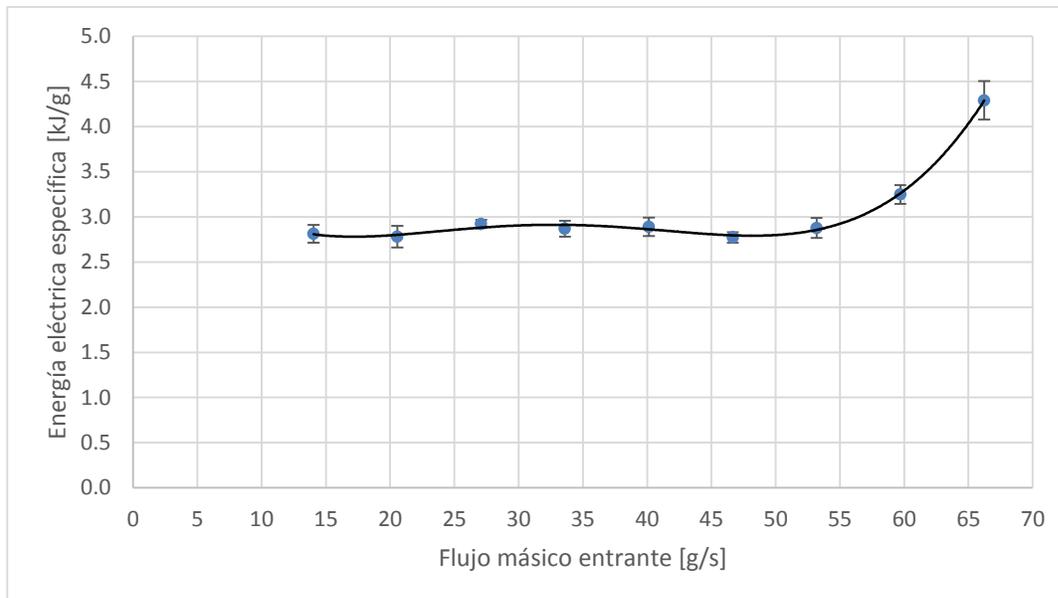
Fuente: elaboración propia, con base en las ecuaciones 11 y 12.

**Apéndice 10. Energía eléctrica específica promedio con su respectivo error en función del flujo másico de entrada**

$Q_{1n}$ [gpm]	$\dot{m}_1$ [g/s]	$\hat{E}_e$ [kJ/g]	$\Delta\hat{E}_e$ [kJ/g] (Desv. Est.)	$\Delta\hat{E}_e$ [kJ/g]	$\Delta\dot{m}_1$ [g/s]
0,2	13,99	2,81	0,10	0,03	3,14
0,3	20,55	2,78	0,12	0,03	3,14
0,4	27,11	2,92	0,05	0,03	3,14
0,5	33,66	2,87	0,09	0,03	3,14
0,6	40,22	2,89	0,10	0,03	3,14
0,7	46,80	2,77	0,06	0,03	3,15
0,8	53,35	2,88	0,11	0,03	3,14
0,9	59,90	3,25	0,10	0,04	3,14
1,0	66,46	4,29	0,21	0,07	3,14

Fuente: elaboración propia, con base en las ecuaciones 11 y 12.

**Apéndice 11. Energía eléctrica específica en función del flujo másico de entrada**



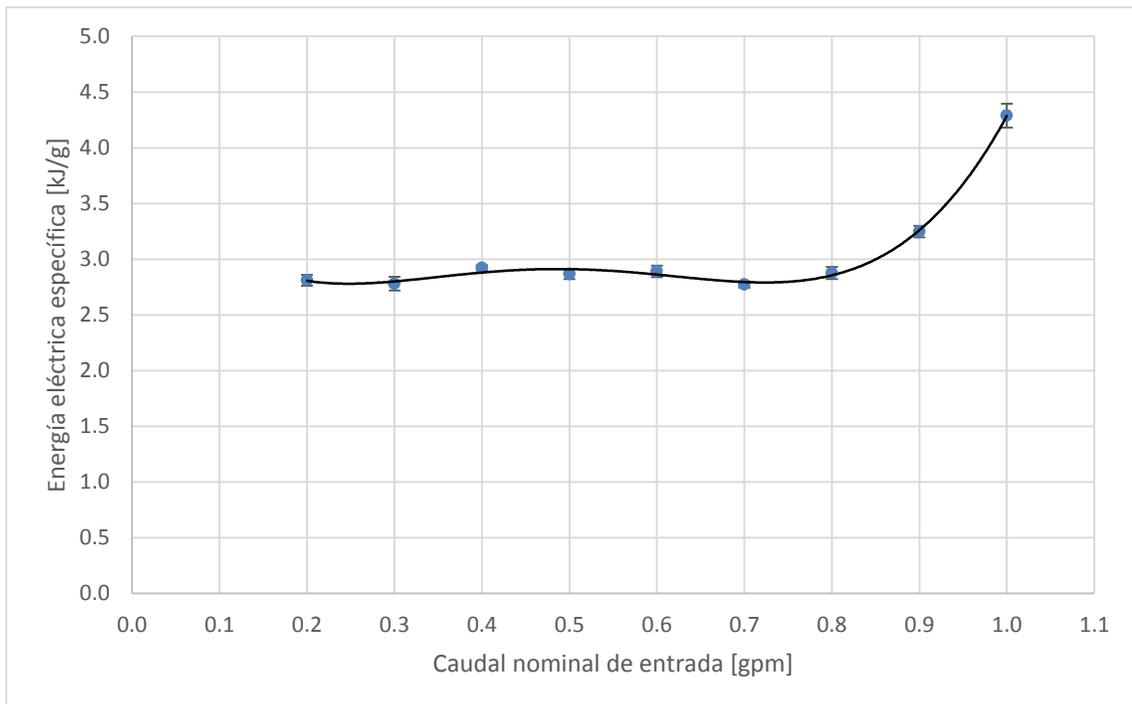
Fuente: elaboración propia, con base en los datos del apéndice 10.

Apéndice 11a. **Descripción del gráfico de la energía eléctrica específica en función del flujo másico de entrada**

Color	Modelo matemático	R <sup>2</sup>	Δy <sub>máx</sub> [kJ/g]	Intervalo de validez [g/s]
	$\hat{E}_e = -(7,46E-09)m_1^5 + (3,40E-06)m_1^4 - (3,61E-04)m_1^3 + (1,52E-02)m_1^2 - (2,69E-01)m_1 + 4,45$	0,997	0,11	[14,04 – 66,22]

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. **Energía eléctrica específica en función del caudal nominal de entrada**



Fuente: elaboración propia, con base en los datos del apéndice 10.

Apéndice 12a. **Descripción del gráfico de la energía eléctrica específica en función del caudal nominal de entrada**

Color	Modelo matemático	R <sup>2</sup>	$\Delta y_{\text{máx}}$ [kJ/g]	Intervalo de validez [gpm]
	$\eta = -8,79*Q_{1n}^5 + 60,77*Q_{1n}^4 - 96,54*Q_{1n}^3 + 60,25*Q_{1n}^2 - 15,61*Q_{1n} + 4,20$	0,997	0,11	[0,2 – 1,0]

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **Modelo de la densidad del agua**

Se presenta en la siguiente tabla la información necesaria para encontrar un modelo matemático para la densidad del agua en función de la temperatura:

Apéndice 13a. **Valores de la densidad en función de la temperatura**

T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
10	999,699	23	997,538	36	993,684
11	999,605	24	997,296	37	993,328
12	999,497	25	997,045	38	992,965
13	999,377	26	996,783	39	992,594
14	999,244	27	996,513	40	992,215
15	999,099	28	996,233	41	991,830
16	998,943	29	995,945	42	991,436
17	998,775	30	995,647	43	991,036
18	998,595	31	995,341	44	990,628
19	998,405	32	995,026	45	990,213
20	998,204	33	994,703	46	989,792
21	997,992	34	994,371	47	989,363
22	997,770	35	994,032	48	988,928

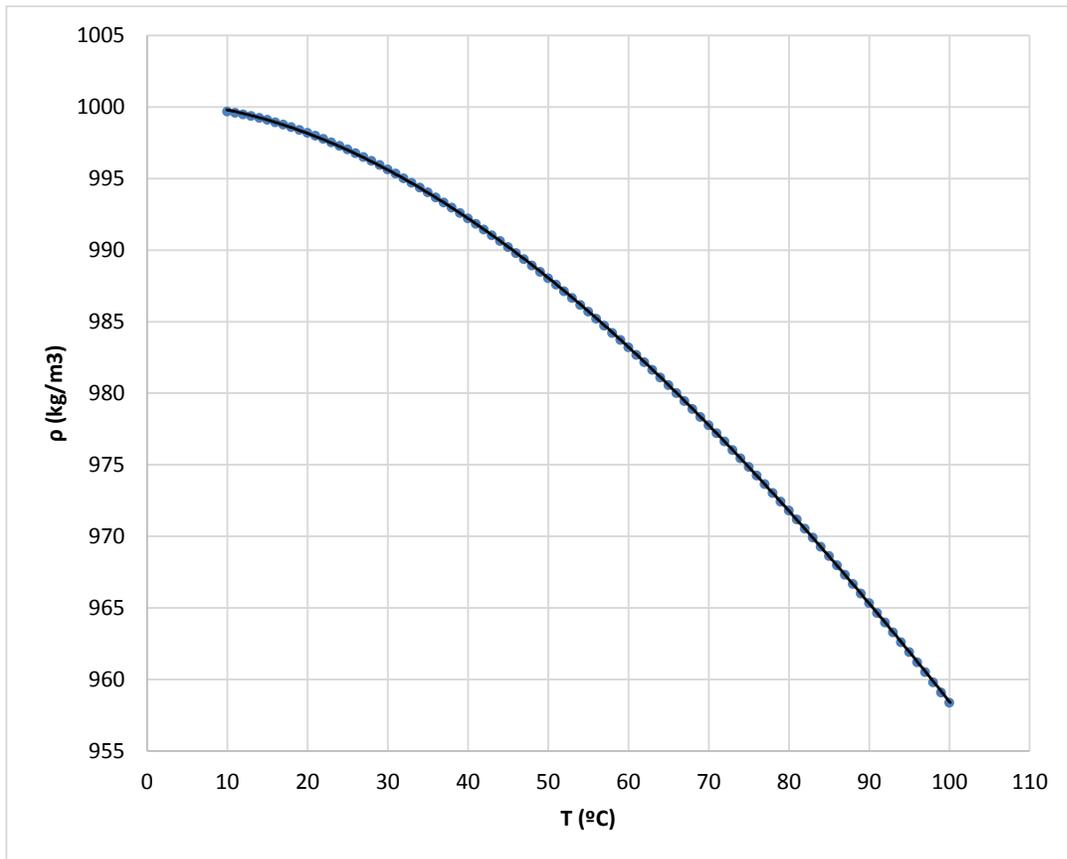
Continuación del apéndice 13a.

$T$ [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$T$ [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$T$ [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
49	988,485	67	979,459	85	968,621
50	988,037	68	978,902	86	967,971
51	987,581	69	978,339	87	967,316
52	987,120	70	977,771	88	966,656
53	986,652	71	977,198	89	965,991
54	986,177	72	976,619	90	965,321
55	985,696	73	976,035	91	964,647
56	985,219	74	975,445	92	963,967
57	984,716	75	974,850	93	963,284
58	984,217	76	974,250	94	962,595
59	983,712	77	973,645	95	961,902
60	983,200	78	973,025	96	961,204
61	982,683	79	972,419	97	960,501
62	982,160	80	971,799	98	959,794
63	981,631	81	971,173	99	959,082
64	981,097	82	970,543	100	958,365
65	980,557	83	969,907		
66	980,011	84	969,267		

Fuente: PERRY, Robert H, *Perry's chemical engineers' handbook*. tabla 2-28.

Se presenta un gráfico con los datos de la tabla anterior, el cual muestra la tendencia de la densidad del agua conforme varía la temperatura.

Apéndice 13b. **Gráfico de la densidad del agua en función de la temperatura**



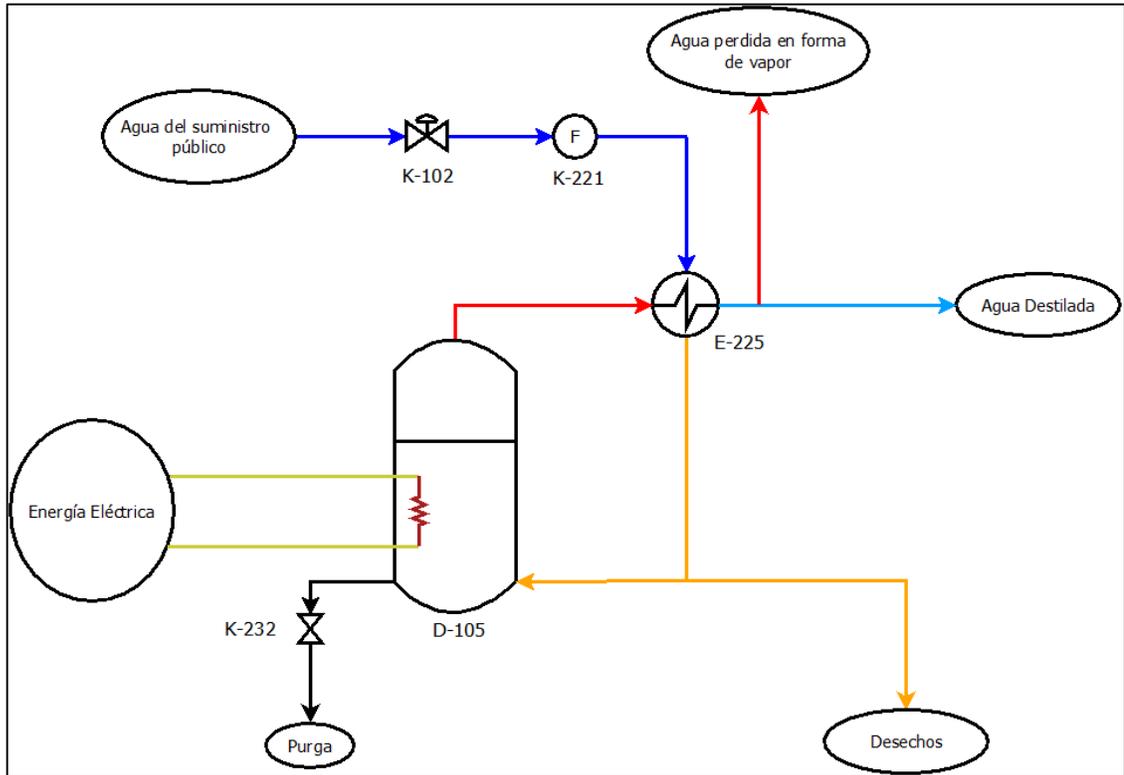
Fuente: elaboración propia con base en los datos del apéndice 13a.

Apéndice 13c. **Descripción del apéndice 13b**

Color	Modelo matemático	R <sup>2</sup>	Intervalo de validez [°C]
	$\rho = (1,238E-05)T^3 - (5,306E-03) T^2 - (1,330E-02)T + 1000$	0,9999	[10 – 100]

Fuente: elaboración propia con base en los datos del apéndice 13b.

## Apéndice 14. Diagrama formal del equipo



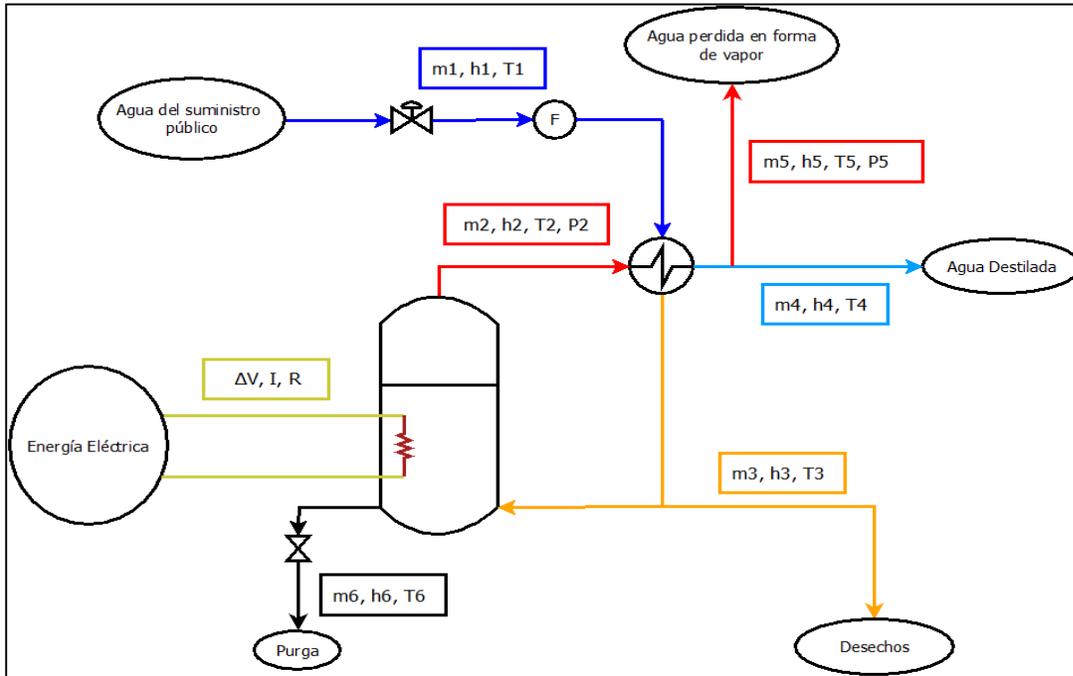
Fuente: elaboración propia con base en la observación del sistema de destilación.

### Apéndice 14a. Especificaciones del diagrama de equipo

Símbolo	Descripción
D-105	Destilador simple
E-225	Condensador de serpentín
K-102	Válvula de globo
K-221	Medidor de flujo
K-232	Válvula de aguja

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 15. Diagrama del equipo para el balance de masa



Fuente: elaboración propia, con base en la observación del sistema de destilación.

## Apéndice 16. Balance de masa (curva de calibración del rotámetro)

Se cuenta con información de las dos salidas de agua del destilador: flujo de agua destilada y flujo de agua de desecho. El rotámetro mide el flujo de entrada de agua al sistema, pero no fue necesario desmontar el equipo para calibrarlo, ya que por medio de un balance de masa es posible determinar el valor del flujo de entrada a partir de los otros flujos conocidos, como se describe a continuación:

*Entrada de materia = Salida de materia*

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_3 + \dot{m}_4 + \text{Purga}$$

Considerando que en el momento de medir las variables de la ecuación anterior, no se purgó el sistema, por lo tanto el balance de masa se puede expresar de la siguiente manera:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_3 + \dot{m}_4 \quad (\text{Ecuación 14})$$

A partir de la ecuación inmediata anterior, se pueden obtener dos magnitudes útiles: flujo másico y flujo volumétrico de entrada.

El flujo másico de agua destilada y de agua de desecho no se midió, pero se puede obtener indirectamente a partir del volumen de agua recolectado en determinada cantidad de tiempo (3 min para este caso), usando como factor de conversión la densidad del fluido a la temperatura de salida (para ello se utiliza el modelo matemático encontrado en el apéndice 8. Por lo tanto se tienen las siguientes relaciones entre variables:

$$\dot{m}_3 = \frac{V_3 * \rho_3}{t}$$

$$\dot{m}_4 = \frac{V_4 * \rho_4}{t}$$

El flujo másico de entrada de agua al sistema, en función de las mediciones hechas en el laboratorio se expresa de la siguiente manera:

$$\dot{m}_1 = \frac{V_3 * \rho_3 + V_4 * \rho_4}{t} \quad (\text{Ecuación 15})$$

Utilizando las unidades y conversiones adecuadas, se tienen los datos presentados en el apéndice 4, obtenidos a partir de la ecuación anterior.

Asimismo se tiene el siguiente modelo, el cual expresa el caudal real de entrada de agua al sistema en gpm, a partir de la ecuación para el flujo másico, estando este último en gramos por segundo y la densidad en gramos por mililitro.

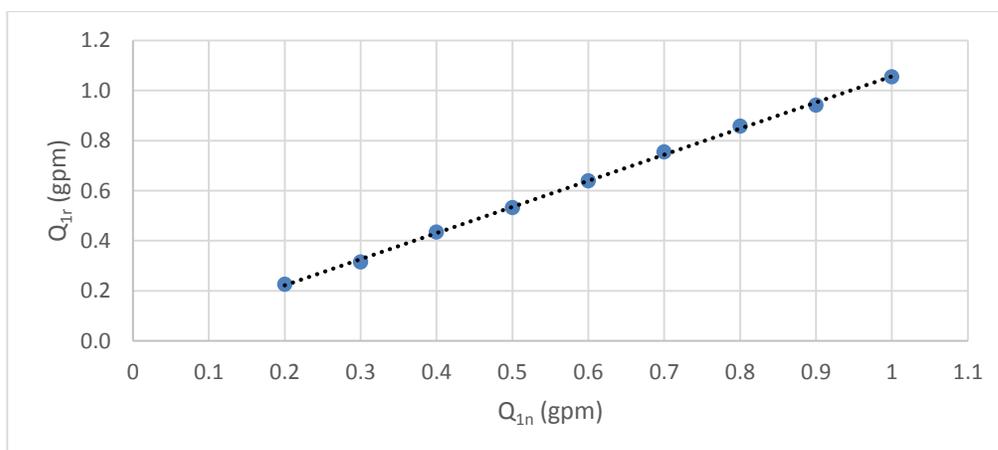
$$Q_{1r} = \frac{\dot{m}_1}{\rho_1} * \frac{1 \text{ gal}}{3780 \text{ mL}} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \quad (\text{Ecuación 16})$$

**Apéndice 16a. Caudal nominal y real de entrada**

$Q_{1n}$ [gpm]	$Q_{1r}$ [gpm]	$\Delta Q_{1n}$ [gpm]	$Q_{1n}$ [gpm]	$Q_{1r}$ [gpm]	$\Delta Q_{1n}$ [gpm]
0,2	0,2266	0,0073	0,7	0,7549	0,0034
0,3	0,3157	0,0103	0,8	0,8581	0,0056
0,4	0,4349	0,0012	0,9	0,9411	0,0007
0,5	0,5331	0,0016	1	1,0554	0,0016
0,6	0,6387	0,0021			

Fuente: elaboración propia con base en las ecuaciones 13 y 16.

**Apéndice 16b. Curva de calibración del rotámetro**



Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 16c. Descripción de la curva de calibración

Color	Modelo matemático	$\Delta Q_{1n \text{ máx}}$ [gpm]	R <sup>2</sup>	Intervalo de validez [gpm]
	$Q_{1r} = 1,0432 \cdot Q_{1n} + 0,0139$	0,0103	0,999	[0,2 – 1,0]

Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 17. Práctica de laboratorio propuesta

#### “Optimización de la energía eléctrica específica de un destilador clásico de agua”.

#### OBJETIVOS

1. Calcular la eficiencia energética del destilador por medio de un balance de masa y energía para los diferentes flujos de entrada de agua al sistema analizado.
2. Determinar el valor óptimo del flujo total de agua de alimentación al sistema de destilación en el cual se consume la menor cantidad de energía eléctrica específica.
3. Comprobar la posibilidad de producir agua destilada con un consumo igual o menor que la energía indicada por el fabricante del equipo, sin modificar el principio de funcionamiento del mismo.

## PROCEDIMIENTO

Preparación del equipo y medición de variables eléctricas:

- Ensamblar correctamente el sistema de destilación con el suministro de agua y conectarlo a la fuente de energía eléctrica, instalando previamente el voltímetro y amperímetro (ver el apéndice 14);
- Abrir la válvula del suministro público de agua hasta el nivel deseado (es solamente para llenar el tanque del destilador; de preferencia si no sobrepasa 1 gpm);
- Esperar hasta que el sistema empiece a rebalsar por el conducto de salida de agua de desecho para luego cerrar la válvula del suministro público;
- Activar las resistencias eléctricas;
- Medir el voltaje y amperaje (llevar a cabo 3 corridas);
- Desactivar las resistencias eléctricas y desconectar el amperímetro y voltímetro (de preferencia si el sistema eléctrico no está conectado al tomacorriente);
- Conectar nuevamente el sistema eléctrico (sin amperímetro ni voltímetro) y activar las resistencias eléctricas;
- Esperar hasta que empiece a salir agua destilada por el extremo del condensador;
- Abrir la válvula del suministro público, de tal manera que el medidor de flujo indique el primer valor a analizar ( $\dot{V}_{11}$ );
- Esperar a que se estabilice el sistema (aproximadamente 10 min).

Medición de las variables de estudio:

- Iniciar simultáneamente la recolección del agua de enfriamiento ( $\dot{m}_3$ ) con la cubeta de 20 L, del agua destilada ( $\dot{m}_4$ ) con la probeta de 100 mL y la cuenta del tiempo ( $t$ );
- Medir la temperatura del agua destilada ( $T_3$ ), del suministro público ( $T_1$ ), de una pequeña muestra de la purga ( $T_6$ ) y del agua de enfriamiento al salir del condensador ( $T_4$ ). (Para la medición de la temperatura de la purga se debe detener el ingreso de agua al sistema, y esperar un momento para que la muestra que se tome represente la temperatura del agua dentro del tanque);
- Esperar a que el cronómetro marque 3 min, para retirar inmediata y simultáneamente los recolectores de agua destilada y de agua de enfriamiento; asimismo reiniciar la cuenta del tiempo en el cronómetro;
- Anotar todos los resultados obtenidos en la hoja de datos originales;
- Replicar un total de tres veces (corridas) los pasos anteriores;
- Modificar el flujo de agua que entra al sistema, esperar a que se estabilice (10 minutos aproximadamente) y repetir el procedimiento anterior, de manera que se repita el experimento para el flujo de agua entrante al sistema desde 0,2 gpm hasta 1,0 gpm, con un salto de 0,2 gpm.

Finalización de la práctica:

- Apagar el sistema eléctrico del destilador;
- Esperar a que el agua de enfriamiento haga su función después de apagar el sistema eléctrico, para luego cerrar la válvula del suministro público;
- Eliminar el agua remanente por medio del sistema de purga del destilador;
- Desensamblar el sistema de destilación y posteriormente guardarlo en su respectivo lugar.

Temas sugeridos: maximización y minimización de una variable, destilación de agua, balance de masa y energía, eficiencia y potencia eléctrica.

## Apéndice 18. Requisitos académicos

### Campos del conocimiento científico y tecnológico

1. **Ciencias naturales y exactas**
2. **Ingeniería y tecnología**
3. Ciencias sociales
4. Ciencias de la salud
5. Ciencias agropecuarias
6. Humanidades

### Disciplinas

Ciencias naturales y exactas	Ingeniería y tecnología	Ciencias sociales	Humanidades
<ol style="list-style-type: none"><li>1. <b>Matemáticas</b></li><li>2. Ciencias físicas</li><li>3. <b>Estadística</b></li><li>4. <b>Ciencias químicas</b></li><li>5. Ciencias biológicas</li><li>6. Ciencias de la Tierra relacionadas con el medio ambiente</li><li>7. Informática</li></ol>	<ol style="list-style-type: none"><li>8. <b>Fisicoquímica</b></li><li>9. <b>Operaciones unitarias</b></li><li>10. <b>Ingeniería aplicada y diseño</b></li></ol>	<ol style="list-style-type: none"><li>11. Economía</li><li>12. Psicología</li><li>13. Sociología</li><li>14. Derecho</li></ol>	<ol style="list-style-type: none"><li>15. Lengua y literatura</li><li>16. Historia</li><li>17. Filosofía</li><li>18. Arte</li><li>19. Deporte</li></ol>

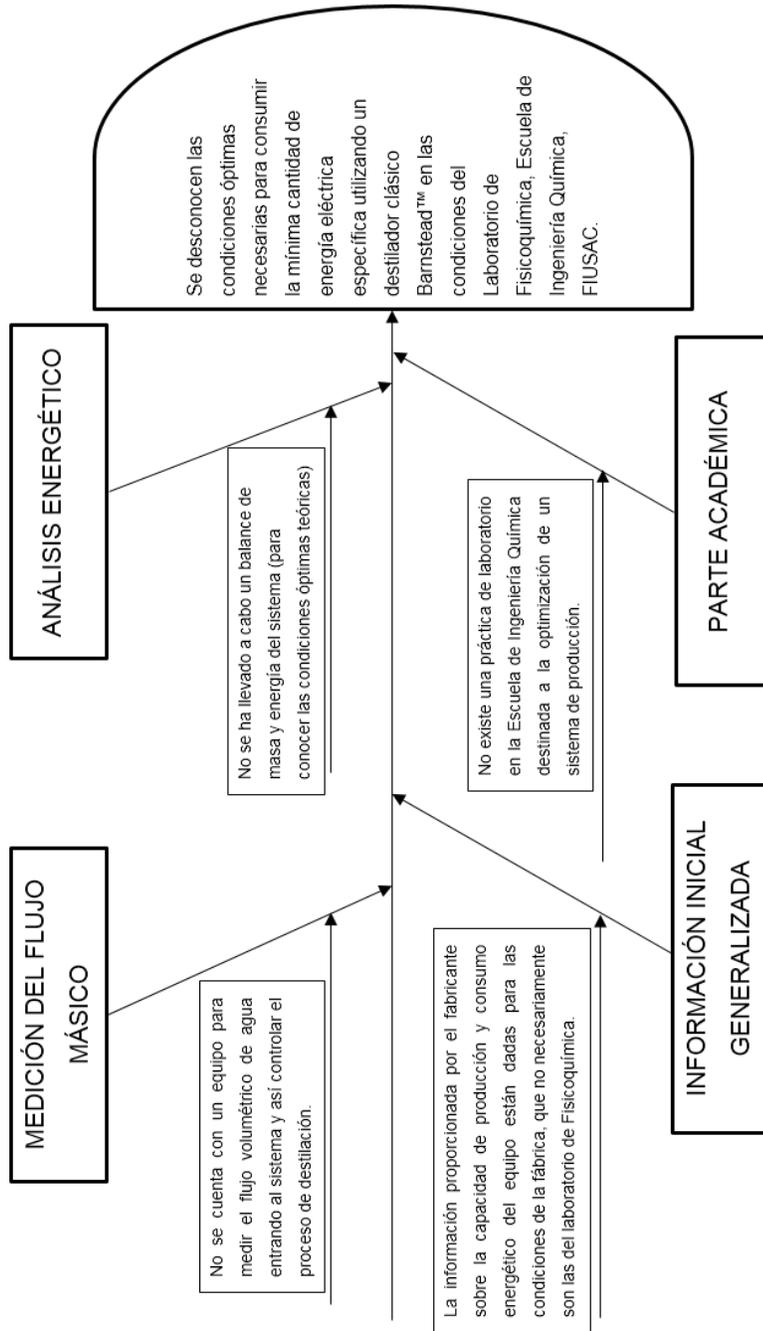
Continuación del apéndice 18.

Subdisciplinas

1. Matemática Básica 2
2. Estadística 1
3. Estadística 2
4. Ingeniería Eléctrica 1
5. Ingeniería Eléctrica 2
6. Fisicoquímica 1
7. Fisicoquímica 2
8. Termodinámica 3
9. Laboratorio de Fisicoquímica 2
10. IQ-1 (Balance de masa y energía)
11. IQ-2 (Flujo de fluidos)
12. IQ-3 (Transferencia de calor)
13. IQ-4 (Transferencia de masa)
14. IQ-5 (Transferencia de masa en unidades continuas)
15. Laboratorio de Ingeniería Química 1
16. Laboratorio de Ingeniería Química 2

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 19. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.