



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

**DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE
EVAPORACIÓN DOBLE EFECTO UBICADO EN EL LABORATORIO DE
OPERACIONES UNITARIAS, USAC**

Carlos Eduardo Morales Chávez

Asesorado por el Ing. José Manuel Tay Oroxom

Guatemala, octubre de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE
EVAPORACIÓN DOBLE EFECTO UBICADO EN EL LABORATORIO DE
OPERACIONES UNITARIAS, USAC**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

CARLOS EDUARDO MORALES CHÁVEZ
ASESORADO POR EL ING. JOSÉ MANUEL TAY OROXOM

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

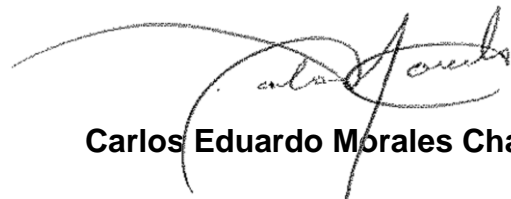
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. José Manuel Tay Oroxom
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl De León De Páz
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE EVAPORACIÓN DOBLE EFECTO UBICADO EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS, USAC

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha noviembre de 2010.



Carlos Eduardo Morales Chávez

Guatemala, 20 de febrero de 2012

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
Director Escuela de Ingeniería Química
Su Despacho

Por medio de la presente le hago constar que he revisado y aprobado el trabajo de graduación del estudiante Carlos Eduardo Morales Chávez con número de carné 2003-12556 titulado "Diseño experimental para la operación de un sistema de evaporación doble efecto ubicado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC".

Atentamente,



Ing. Qco. José Manuel Tay Oroxom
Asesor

José Manuel Tay Oroxom
Ma. Ingeniero Químico
Colegiado No. 121



Guatemala, 18 de abril de 2012
Ref. EI.Q.TG-IF.019.2012

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

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta TG-083-2010-IF le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Carlos Eduardo Morales Chávez**

Identificado con número de carné: **2003-12556**

Previo a optar al título de INGENIERO QUÍMICO.


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

DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE EVAPORACIÓN DOBLE EFECTO UBICADO EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS, USAC

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero: **José Manuel Tay Oroxom**.

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. Orlando Posadas
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación


ESCUELA DE
INGENIERIA QUIMICA

C.c.: archivo





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, **CARLOS EDUARDO MORALES CHÁVEZ** titulado: **"DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE EVAPORACIÓN DOBLE EFECTO UBICADO EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS, USAC"**. 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, octubre de 2012

Cc: Archivo
VMMV/ale

Universidad de San Carlos
De Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.494.2012

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE EVAPORACIÓN DOBLE EFECTO UBICADO EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS, USAC**, presentado por el estudiante universitario **Carlos Eduardo Morales Chávez** autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, octubre de 2012

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Mi madre** Magda Chávez, por su entrega, guía, confianza y ejemplo de amor incondicional.
- Mis padres** Jorge Morales y Armando Rodríguez por ser los dos maestros de vida que me inspiran a ser cada día una persona de sin límites.
- Mi hermanos** Jonathan Morales, Armando Rodríguez e Ian Morales, por su cariño y confianza puesta en mí. Ustedes son semillas que iluminan mi camino.
- Mi abuela** Patricia Franco, por estar presente en el día a día. Gracias por tus oraciones, cuidados y amor.
- Mis abuelos** Hilda Villacorta y Candelario Chávez en su memoria. Gracias por los ejemplos de vida que tengo de ustedes.
- Mi familia** Por brindarme su alegría y apoyo. Mis tíos: Roberto Chávez, Mercedes Villacorta y Gustavo Paniagua; mis primos Alejandro Chávez, Patricia Chávez, Gustavo de la Cerda, Hilda María de la Cerda, Cristina Paniagua y Andrea Paniagua; y mi sobrino Gabriel Morales.

Mis amigos

En quienes confío y me brindan su confianza, con quienes he compartido, caminado y me han acompañado en muchas situaciones de mi vida. Mi más sincero aprecio.

A Dios, fuente de luz, verdad y amor infinito, reflejo de todas las personas que me acompañan en este paréntesis llamado vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Magda Chávez	Por su esfuerzo, consejos, dedicación y compañía durante toda mi vida.
Ing. José Manuel Tay	Por su asesoría, apoyo y guía en la realización del presente proyecto. Ejemplo de calidad de docencia.
Ing. Orlando Posadas	Por la revisión técnica del presente trabajo de graduación.
Colegio Salesiano Don Bosco	Por todo los valores que sembraron en mí y las experiencias forjaron mi formación.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por abrirme sus puertas, despertar en mí la curiosidad y permitirme formarme como profesional de la ingeniería.
Pueblo de Guatemala	Por la oportunidad de brindarme mi educación superior.

INDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Evaporación.....	3
2.2. Tipos de evaporadores	4
2.2.1. Evaporadores de circulación natural.....	4
2.2.1.1. Evaporador de tubos horizontales	5
2.2.1.2. Evaporador de tubos verticales	6
2.2.1.3. Evaporador vertical de tubos largos	7
2.2.2. Evaporadores de circulación forzada.....	9
2.2.3. Evaporadores de película agitada	10
2.3. Procesos de evaporación.	11
2.3.1. Evaporación simple efecto.....	11
2.3.2. Evaporación múltiple efecto.....	12
2.3.2.1. Modelos de alimentación	12
2.3.2.1.1. Alimentación directa	12
2.3.2.1.2. Alimentación inversa.....	13
2.3.2.1.3. Alimentación mixta.....	14

	2.3.2.1.4.	Alimentación paralela	15
	2.3.2.2.	Límites de temperatura.....	16
	2.3.2.3.	Capacidad.	17
	2.3.2.4.	Economía de vapor.	17
2.4.		Evaporación al vacío.....	18
2.4.1.		Función del vacío	19
2.4.2.		Condensadores	20
	2.4.2.1.	Condensador de superficie.....	20
	2.4.2.2.	Condensador de contacto	20
	2.4.2.2.1.	Condensador barométrico	23
	2.4.2.2.2.	Condensador de bajo nivel.....	23
3.		MARCO METODOLÓGICO	25
3.1.		Variables	25
3.2.		Delimitación del área de estudio	27
3.3.		Recursos disponibles	28
3.4.		Técnica aplicada	29
3.5.		Recolección y ordenamiento de información.....	31
3.6.		Tabulación y procesamiento de la información	33
3.7.		Análisis estadístico.....	34
4.		RESULTADOS.....	37
4.1.		Manual de operación.....	37
	4.1.1.	Descripción del equipo	38
	4.1.1.1.	Componentes	38
	4.1.1.2.	Insumos de la operación	44
	4.1.2.	Diagrama de flujo	46

4.1.3.	Precauciones	49
4.1.4.	Verificaciones previas a la operación.....	50
4.1.5.	Secuencia de arranque.....	52
4.1.6.	Consideraciones en el control de la operación	55
4.1.7.	Secuencia de paro	57
4.2.	Prácticas experimentales propuestas	59
4.2.1.	Práctica A	59
4.2.2.	Práctica B	61
4.2.3.	Práctica C	63
4.3.	Diseño experimental.	65
4.3.1.	Descripción del problema	65
4.3.2.	Preguntas referentes a la investigación	65
4.3.3.	Justificación	67
4.3.4.	Descripción de variables involucradas.....	68
4.3.5.	Elección del diseño experimental	71
4.3.6.	Planteamiento de hipótesis.....	76
4.3.7.	Número de corridas a realizar.....	76
4.3.8.	Ecuaciones para obtención de resultados	77
4.4.	Balances de masa y energía.	80
4.4.1.	Balance del evaporador operando con el condensador de superficie.....	81
4.4.2.	Balance del evaporador operando con el condensador barométrico	85
4.5.	Resultados experimentales de la práctica B.....	88
4.5.1.	Gráficos del comportamiento de variables durante toda la operación de la práctica B.....	89
4.5.2.	Resultados en estado estable de la práctica B	93
4.6.	Resultados experimentales de la práctica C.....	95

4.6.1.	Gráficos del comportamiento de variables durante toda la operación de la práctica C	96
4.6.2.	Resultados en estado estable de la práctica C	100
5.	INTERPRETACION DE RESULTADOS	103
5.1.	Desarrollo y programación de la práctica	103
5.2.	Implementación de la práctica	105
5.3.	Manual de operación	106
5.4.	Prácticas propuestas y resultados experimentales	108
5.5.	Evaluación didáctica.....	110
	CONCLUSIONES.....	113
	RECOMENDACIONES	115
	BIBLIOGRAFÍA.....	117
	APÉNDICES.....	119
	ANEXOS.....	163

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Evaporador de tubos horizontales	5
2.	Evaporador vertical con circulación natural	6
3.	Evaporador de tubos largos con recirculación.....	8
4.	Evaporador de circulación Forzada.....	9
5.	Evaporador múltiple efecto con alimentación directa	13
6.	Evaporador múltiple efecto con alimentación inversa	14
7.	Evaporador múltiple efecto con alimentación mixta	15
8.	Evaporador múltiple efecto con alimentación paralela	16
9.	Condensador de charolas a contracorriente.....	21
10.	Condensador de chorros múltiples.....	22
11.	Procedimiento gráfico del desarrollo de la práctica	30
12.	Unidad de evaporación doble efecto	37
13.	Separador del evaporador.....	39
14.	Vista en planta de la calandria	40
15.	Trampas de vapor e Intercambiadores de calor de tubos concéntricos .	40
16.	Calandria del evaporador	41
17.	Condensador de superficie.....	42
18.	Condensador barométrico	43
19.	Suministro de agua	45
20.	Tubería de alimentación de vapor	46
21.	Diagrama de flujo de la unidad de evaporación	48
22.	Recolección de condensado	49
23.	Esquema del circuito de conducción de vapor	50

24.	Procedimiento gráfico de la secuencia de arranque	54
25.	Válvulas de la alimentación de agua (V-118a y V-118b).....	55
26.	Visor y medidor de nivel.....	56
27.	Válvula de compuerta V-114b.....	57
28.	Procedimiento gráfico de la secuencia de paro	58
29.	Diagrama del procedimiento de la Práctica A	60
30.	Diagrama del procedimiento de la Práctica B	62
31.	Diagrama del procedimiento de la Práctica C	64
32.	Esquema del sistema de evaporación doble efecto	81
33.	Esquema del sistema de evaporación doble efecto al vacío.....	85
34.	Comportamiento de las temperaturas del sistema de evaporación durante la operación en la práctica B.....	89
35.	Comportamiento de las presiones del sistema de evaporación durante la operación en la práctica B.....	90
36.	Comportamiento del condensado de vapor vivo durante la operación en la práctica B	91
37.	Comportamiento del condensado de vapor del primer efecto durante la operación en la práctica B.....	92
38.	Capacidad del evaporador en la práctica B	93
39.	Comportamiento de las temperaturas del sistema de evaporación durante la operación en la práctica C	96
40.	Comportamiento de las presiones del sistema de evaporación durante la operación en la práctica C.....	97
41.	Comportamiento del condensado de vapor vivo durante la operación en la práctica C	98
42.	Comportamiento del condensado de vapor del primer efecto durante la operación en la práctica C.....	99
43.	Capacidad del evaporador en la práctica C.....	100

TABLAS

I.	Definición operacional de variables.....	25
II.	Definición de variables a manipular.....	26
III.	Tabla de recolección de datos experimentales	31
IV.	Tabla recolección de la información didáctica	32
V.	Tabla de tabulación de datos experimentales	33
VI.	Descripción de variables experimentales en estado inestable	68
VII.	Descripción de variables experimentales en estado estable	69
VIII.	Factores perturbadores	70
IX.	Definición de variables a manipular en la práctica	70
X.	Variables de respuesta.....	71
XI.	Valores de masa y tiempos de parámetro en función del tiempo de operación	73
XII.	Valores de unidades de rotámetro, presión y temperatura en función del tiempo de operación	74
XIII.	Valores de flujos máxicos del sistema.....	75
XIV.	Valores de temperaturas y presiones del sistema.....	75
XV.	Flujos máxicos de condensados y economía de vapor obtenidos en la práctica B	93
XVI.	Coeficientes de transferencia de calor obtenidos en la práctica B	94
XVII.	Pérdidas de calor del evaporador por radiación en la práctica B	94
XVIII.	Resumen de resultados experimentales de la práctica B y rango de variables	95
XIX.	Flujos máxicos de condensado y economía de vapor obtenidos en la práctica C.....	100
XX.	Coeficientes de transferencia de calor obtenidos en la práctica C.....	101
XXI.	Pérdidas de calor del evaporador por radiación en la práctica C.....	101

XXII. Resumen de resultados experimentales de la práctica C y rango de variables 102

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Área de transferencia de calor de la calandria, (m^2)
λ_1	Calor latente de vapor del primer efecto, (kJ/kg)
λ_2	Calor latente de vapor del segundo efecto, (kJ/kg)
λ_s	Calor latente de vapor vivo, (kJ/kg)
C_p	Capacidad calorífica del agua, (kJ/kg K)
q_1	Capacidad de evaporación del primer efecto, (kJ/s)
q_2	Capacidad de evaporación del segundo efecto, (kJ/s)
q_t	Capacidad del evaporador doble efecto, (kJ/s)
U_1	Coefficiente de transferencia de calor del primer efecto, ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
U_2	Coefficiente de transferencia de calor del segundo efecto, ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
U_{med}	Coefficiente de transferencia de calor medio del evaporador doble efecto, $W/(m^2 \text{ } K)$
d	Diámetro externo del tubo, (m)
ΔT_1	Diferencia de temperatura en entre el condensado y el evaporador 1, ($^\circ C$)
ΔT_2	Diferencia de temperatura en entre el condensado y el evaporador 2, ($^\circ C$)
e	Economía vapor
E_e	Energía de entrada al sistema de evaporación, (kJ/s)
E_s	Energía de salida del sistema de evaporación, (kJ/s)

E_p	Pérdidas de energía por radiación, (kJ/s)
E_{p1}	Pérdidas de energía por radiación del primer efecto, (kJ/s)
E_{p2}	Pérdidas de energía por radiación del segundo efecto, (kJ/s)
h_s	Entalpía específica del líquido saturado a la presión de la calandria del primer efecto, (kJ/kg)
h_1	Entalpía específica del líquido saturado a la presión de la calandria del segundo efecto, (kJ/kg)
H_s	Entalpía específica del vapor a la presión de la calandria del primer efecto, (kJ/kg)
H_1	Entalpía específica del vapor a la presión de la calandria del segundo efecto, (kJ/kg)
W_{c1}	Flujo másico de agua de enfriamiento en el condensador de superficie, (kg/s)
W_{c3}	Flujo másico de agua de enfriamiento en el condensador barométrico, (kg/s)
W_{c2}	Flujo másico de agua de enfriamiento en los intercambiadores de tubos concéntricos, (kg/s)
W_{f1}	Flujo másico de alimentación de agua al primer efecto, (kg/s)
W_{f2}	Flujo másico de alimentación de agua al segundo efecto, (kg/s)
W_f	Flujo másico de alimentación de agua al sistema de evaporación, (kg/s)
W_1	Flujo másico de condensación del primer efecto, (kg/s)
W_2	Flujo másico de condensación del segundo efecto, (Kg/s)
W_s	Flujo másico de condensación de vapor vivo, (kg/s)
$W_{entrada}$	Flujo másico de entrada al sistema, (kg/s)
W_{salida}	Flujo másico de salida del sistema, (kg/s)
L	Longitud de tubo, (m)
m_s	Masa de condensado de vapor vivo, (kg)

m_1	Masa de condensado del primer efecto, (kg)
m_2	Masa de condensado del segundo efecto, (Kg)
P	Presión absoluta, (kPa)
p_{atm}	Presión atmosférica local, (psi)
p_v	Presión de vacío, (inHg)
p_1	Presión de vapor en la calandria del segundo efecto (psi)
p_s	Presión de vapor vivo en la calandria del primer efecto (psi)
p	Presión manométrica, (psi)
T_{f1}	Temperatura de alimentación en el primer efecto, (°C)
T_{f2}	Temperatura de alimentación en el segundo efecto, (°C)
T_f	Temperatura de alimentación en el sistema de evaporación doble efecto, (°C)
T_1	Temperatura de ebullición del agua en el primer efecto, (°C)
T_2	Temperatura de ebullición del agua en el segundo efecto, (°C)
T_s	Temperatura de saturación del vapor vivo, (°C)
t_s	Tiempo de condensación de vapor vivo, (s)
t_1	Tiempo de condensación del primer efecto, (s)
t_2	Tiempo de condensación del segundo efecto, (s)
t_{op}	Tiempo de operación (min)
$UnRot$	Unidades de rotámetro

GLOSARIO

Alimentación	Líquido o solución que es ingresa al evaporador.
Capacidad de evaporación	Es la velocidad de transferencia de calor a través de la superficie de la calandria en un evaporador.
Capacidad calorífica	Cantidad de energía necesaria para aumentar la temperatura de una sustancia en un grado centígrado.
Calandria	Parte del evaporador donde se realiza la transferencia de calor entre el vapor de calentamiento y el líquido o solución que se va a evaporar.
Calor latente	Cantidad de calor que es absorbida o liberada por una sustancia al cambiar de un estado de fase a otro.
Calor sensible	Cantidad de calor que es absorbida o liberada por una sustancia sin cambiar de estado de fase.

Condensador	Equipo de transferencia de calor que tiene como objetivo licuar vapor eliminando el calor latente.
Condensador barométrico	Condensador de contacto directo en que la descarga de condensado se efectúa a través de una columna barométrica formando un sello hidráulico.
Convección natural	Mecanismo de transferencia de calor que se desarrolla en los fluidos debido a que el aumento de temperatura provoca un movimiento por la diferencia de densidad.
Cuerpo del evaporador (separador)	Parte del evaporador donde se realiza la ebullición y separación del soluto con el solvente de la solución concentrada.
Economía de vapor	Relación entre la masa de vapor que se genera en cada efecto y la masa de vapor vivo que ingresa al sistema.
Evaporación	Operación Unitaria que consiste en una serie de técnicas que son aplicadas para que una solución concentrada constituida por un soluto no volátil y un solvente volátil se separen siendo uno de éstos el producto deseado.

Evaporación al vacío	Se refiere al proceso en el que un evaporador trabaja a presión inferior a la presión atmosférica.
Evaporación instantánea (Evaporación flash)	Vapor generado cuando un condensado está a una presión alta y sufre un cambio a una presión menor a la que se encontraba inicialmente.
Evaporador	Equipo formado por un intercambiador de calor (calandria) y un separador diseñado para concentrar una solución a través del fenómeno de ebullición.
Evaporador múltiple efecto	Conjunto de evaporadores en una misma instalación operando de tal forma que el vapor procedente de un efecto sirve de medio de calefacción para el siguiente efecto.
Evaporador simple efecto	Equipo de evaporación que consiste en un arreglo simple de un solo evaporador.
Intercambiador de calor	Dispositivo diseñado para transferir calor entre dos o más fluidos a diferentes temperaturas.
Trampa de vapor	Dispositivo diseñado para descargar el condensado sin permitir que el vapor escape de la línea de vapor o intercambiador de calor.

Transferencia de calor

Flujo de energía térmica que se realiza entre dos o más cuerpos o sustancias debido a una diferencia de temperatura.

Vacuómetro

Dispositivo de medida que sirve para medir presiones por debajo de la presión atmosférica en recipientes cerrados.

Vapor vegetal

Vapor que se genera en cada efecto en el proceso de evaporación múltiple.

Vapor vivo

Vapor procedente de la caldera que ingresa al primer efecto del evaporador.

RESUMEN

Se desarrolló un diseño para la implementación de una práctica experimental de evaporación en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

La práctica fue realizada en un equipo de evaporación doble efecto conectado a un condensador barométrico, los cuales se encuentran instalados en el laboratorio. Para su implementación, se hizo un mantenimiento general, se habilitó y se verificó el funcionamiento del equipo. Posteriormente, se realizó un estudio para establecer el diseño experimental y los objetivos a ejecutar en la práctica para ser incluida en el programa del curso de Laboratorio de Ingeniería Química Uno.

Se realizaron pruebas experimentales con los estudiantes del curso durante un semestre académico y se realizó el manual de operación del equipo. En la experimentación se realizaron balances de masa y energía, se obtuvo la economía de vapor, coeficientes de transferencia de calor y pérdidas de energía durante la operación. Adicionalmente, se hizo un cuestionario de evaluación didáctica el cual fue respondido por todos los estudiantes del curso.

La práctica fue desarrollada satisfactoriamente haciendo un aporte al proceso de formación académica de los estudiantes de Ingeniería Química.

OBJETIVOS

General

Diseñar una práctica experimental para la operación de un sistema de evaporación doble efecto ubicado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Específicos

1. Habilitar el evaporador doble efecto que se encuentra ubicado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.
2. Implementar una práctica de laboratorio en la que el estudiante de la carrera de ingeniería química pueda utilizar los conocimientos adquiridos al momento de experimentar con un sistema de evaporación de múltiple efecto.
3. Realizar pruebas experimentales de acuerdo a un diseño experimental establecido con los estudiantes del curso de Laboratorio de Ingeniería Química Uno.
4. Elaborar un manual de operación del equipo.

INTRODUCCIÓN

La experimentación en el aprendizaje de las ciencias aplicadas es de suma importancia ya que permite al estudiante tener un contacto directo con los fenómenos relacionados al área del cual se desea especializar. Para la enseñanza de la ingeniería química se recurre a la experimentación de operaciones genéricas de los procesos industriales, de las cuales se cultivan las destrezas para su posterior desarrollo en el campo profesional.

Los laboratorios de operaciones unitarias son espacios en que los estudiantes tienen la oportunidad de iniciar su actividad experimental de ingeniería, además, son el primer acercamiento real al manejo de variables que involucra una operación unitaria. La asignatura del Laboratorio de Operaciones Unitarias constituye una aplicación de los principios de flujo de fluidos, transferencia calor y transferencia de masa, así como cinética química y equilibrio químico.

La evaporación es una de las operaciones unitarias experimentadas en varias universidades alrededor del mundo, las cuales utilizan en su mayoría un evaporador de simple efecto, de doble efecto o de película ascendente. El Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala cuenta en sus instalaciones un evaporador doble efecto, en el cual se efectuaron pruebas experimentales y se desarrolló una práctica experimental para ser incluida en el programa del curso de Laboratorio de Ingeniería Química Uno.

1. ANTECEDENTES

Se han realizado diferentes estudios para la implementación de prácticas experimentales aplicadas a un laboratorio de operaciones unitarias, las cuales incluyen diferentes tópicos de interés en la ingeniería química.

- La función docente en el diseño y montaje del evaporador de película ascendente en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Trabajo de graduación presentado por Héctor Garrido Atanacio, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1991.
- Propuesta de una práctica experimental de control automático del proceso de transferencia de calor, en el intercambiador de tubos concéntricos del Laboratorio de Operaciones Unitarias en la Universidad de San Carlos. Trabajo de graduación presentado por David Cerezo Toledo. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2005.
- Elaboración de un manual de prácticas de transferencia de masa y energía usando el software Super ProDesigner. Trabajo de graduación presentado por Oscar Leonel Flores Sierra, Universidad Rafael Landívar, Facultad de Ingeniería, 2006.
- Aplicación del diseño experimental en el desarrollo de las prácticas internas, en el área de operaciones unitarias. Trabajo de graduación presentado por Memphis Sofonias Reyes Mazariegos. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2009.

- Diseño de la práctica simulada de refrigeración en el laboratorio de operaciones unitarias, Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Trabajo de graduación presentado por Adolfo Macario Castro. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2009.

Se realizó una investigación relacionada con el proceso de evaporación múltiple efecto:

- Diseño de un simulador por computadora de procesos de evaporación en una línea de evaporadores de múltiple efecto. Trabajo de graduación presentado por José Alberto Franco Fernández. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2006.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Evaporación

La evaporación consiste en una serie de técnicas que son aplicadas para que una solución concentrada constituida por un soluto no volátil y un solvente volátil se separen siendo uno de éstos el producto deseado. Las técnicas incluyen el diseño y la utilización de equipos, así como el manejo y control de variables para un mejor desempeño en la operación. Entre las aplicaciones de la evaporación están; la concentración de soluciones acuosas de sal, azúcar, hidróxido de sodio, glicerina, leche y jugo de naranja.

Para que se logre la separación, se transfiere calor a la solución hasta que alcance su temperatura de ebullición, así el solvente se volatiliza y el soluto permanece en la solución aumentando su concentración. El fluido utilizado para el transporte de energía es el vapor de agua procedente de una caldera, el cual se le denomina vapor vivo.

El vapor vivo ingresa al sistema de evaporación a través de un intercambiador de calor. La función del intercambiador de calor es de proveer al sistema una la superficie de contacto para que exista una transferencia de calor por conducción entre el vapor vivo y la solución concentrada.

En la mayoría de los evaporadores, la solución se ubica en el lado de los tubos del intercambiador de calor, mientras que el vapor vivo es ubicado en el lado de la coraza. El vapor vivo al tener contacto con la superficie del intercambiador de calor se condensa cediendo calor latente a la solución.

En la solución concentrada el calor se transfiere por convección y la separación de vapor de la fase líquida concentrada se realiza en el separador. El vapor que se separa de la solución se le denomina vapor vegetal. Dependiendo del proceso, el vapor vegetal es llevado a un condensador, una bomba de vacío u otro evaporador.

El evaporador es utilizado también como cristizador, y por lo tanto su diseño puede estar influenciado por la especificación del tamaño del cristal, la forma y la pureza, siempre y cuando no atenten con la separación de líquido-vapor. Este proceso está fuera del alcance del presente trabajo.

2.2. Tipos de evaporadores

La selección del tipo de evaporador más adecuado para una aplicación concreta dependerá de factores como el rendimiento requerido, la viscosidad de los alimentos y la sensibilidad al calor del producto. También se toma en cuenta si los materiales pueden ocasionar incrustaciones y formaciones de espumas.

2.2.1. Evaporadores de circulación natural

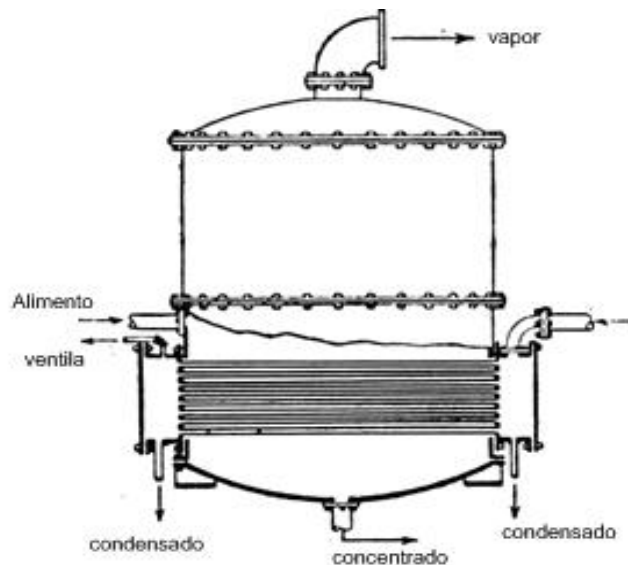
Los evaporadores de circulación natural fueron los primeros en desarrollarse y son los más usados en la industria. El principio que del funcionamiento de este tipo de evaporadores es el aprovechamiento de la densidad entre el líquido y el vapor que se va generando mientras se efectúa el proceso, lográndose así una mayor transferencia de calor. Los tubos de transferencia de calor pueden estar dispuestos de manera vertical u horizontal, con el líquido ya sea dentro o fuera de los tubos.

2.2.1.1. Evaporador de tubos horizontales

Es un evaporador que cuenta con un banco horizontal de tubos. El vapor de agua entra y se condensa dentro de los tubos. La solución que se desea concentrar se localiza fuera de los tubos y se encuentra en ebullición.

Es un evaporador sencillo que funciona de la misma manera que un intercambiador de concha y tubos. Este tipo de evaporadores es utilizado cuando se trabaja con líquidos poco viscosos y con un alto coeficiente de transferencia de calor.

Figura 1. Evaporador de tubos horizontales



Fuente: KERN, Donald. Procesos de transferencia de calor. p. 466.

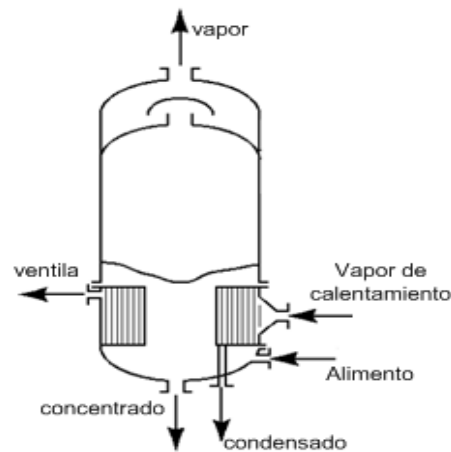
Una de las ventajas de este tipo de evaporadores es que ocupan poco espacio superior, además son sencillos de construir y su costo es bajo. Una de sus desventajas es que su costo de operación tiende a elevarse.

2.2.1.2. Evaporador de tubos verticales

También llamado evaporador de calandria, es un evaporador que cuenta un banco de tubos verticales colocado entre dos espejos remachados en bridas al cuerpo del evaporador. En el centro de los espejos se ubica un rebosadero, que tiene un diámetro aproximadamente la mitad de la suma de los diámetros de todos los tubos.

Se diferencia con el evaporador de tubos horizontales en que el vapor se hace pasar en el exterior de los tubos y la solución a concentrar en el interior de los mismos. Este tipo de evaporador es muy utilizado en la industria azucarera.

Figura 2. **Evaporador vertical con circulación natural**



Fuente: KIRK-OTHMER. Encyclopedia of chemical technology, Vol. 9. p. 472.

La circulación es producida por la disminución de la densidad del líquido en ebullición, por lo que éste se eleva a través de los tubos por circulación natural, y fluye hacia abajo por el espacio central del evaporador. La circulación

natural de la solución concentrada incrementa el coeficiente de transferencia de calor.

Una de las desventajas de este evaporador es que se necesita colocar deflectores en el espacio de vapor para que sea mejor distribuido en los tubos. La circulación y la transferencia de calor en este tipo de evaporador se ven afectadas fuertemente por el nivel del líquido.

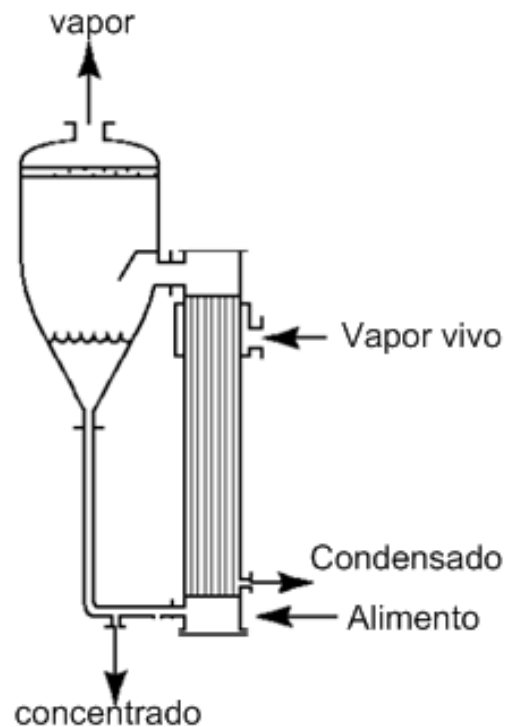
2.2.1.3. Evaporador vertical de tubos largos

Es un evaporador compuesto por un intercambiador de calor de concha y tubos de paso simple orientado verticalmente y un separador en donde el vapor se desprende del líquido concentrado. La mezcla entra por la parte inferior y asciende a través del intercambiador, mientras el líquido recibe calor por la condensación del vapor del lado de la coraza, comienza la ebullición y forma burbujas en su seno, el cual tiene como resultado el aumento de la velocidad lineal y la velocidad de transmisión de calor. En la parte superior del banco de tubos, las burbujas crecen rápidamente y salen con gran velocidad por la parte superior.

Este tipo de evaporador se utiliza cuando la capacidad calorífica del fluido que se desea evaporar es muy baja comparada con la energía que puede proporcionar el vapor de calentamiento; en éste evaporador se pretende que la solución concentrada pase a través del banco de tubos durante un período de tiempo corto. La longitud de los tubos ayuda a obtener velocidades elevadas del líquido, por lo que el coeficiente aumenta.

En algunos casos, cuando la relación entre la velocidad de alimentación y la evaporación es baja, se opera como una unidad de recirculación que va desde el separador hasta el fondo del intercambiador.

Figura 3. **Evaporador de tubos largos con recirculación**



Fuente: KIRK-OTHMER. Encyclopedia of chemical technology, Vol. 9. p. 472

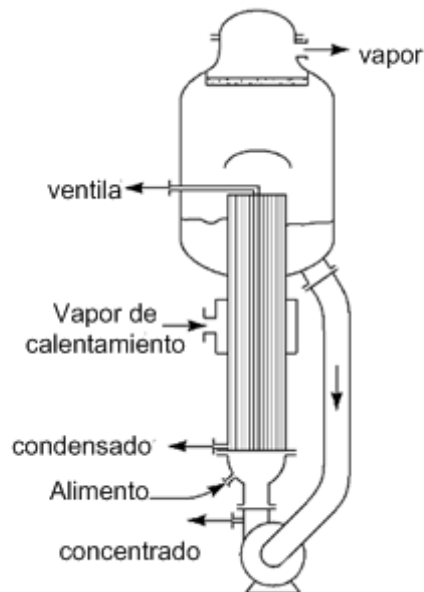
Estos evaporadores son especialmente efectivos para concentrar líquidos que tienden a formar espuma. La espuma se rompe cuando la mezcla de líquido y vapor de alta velocidad choca contra las paredes deflectoras de la carga de vapor.

2.2.2. Evaporadores de circulación forzada

Consiste en un intercambiador de calor regularmente de tipo concha y tubos, un separador o cuerpo del evaporador y una bomba para hacer circular el líquido a través del calentador. El sistema trabaja de tal manera que la ebullición no se lleva a cabo en el intercambiador, es decir que el líquido solamente absorbe calor sensible.

La evaporación se produce hasta que la solución entra al separador. Para mantener el aumento de la temperatura hasta cierto límite razonable, se recirculan grandes cantidades de líquido en relación con la cantidad evaporada.

Figura 4. **Evaporador de circulación forzada**



Fuente: KIRK-OTHMER. Encyclopedia of chemical technology, Vol. 9. p. 472.

La mayoría de intercambiadores de calor usados en un evaporador de circulación forzada suelen ser de tipo concha y tubos, a menudo es de un solo paso dispuesto verticalmente o de pasos múltiples dispuesto horizontalmente. El intercambiador de calor se encuentra a una distancia suficiente por debajo del nivel del líquido en el cuerpo del evaporador para que la carga hidrostática impida que se dé la ebullición en los tubos.

Una de las configuraciones más comunes en los evaporadores de circulación forzada son los que tienen un intercambiador de calor externo vertical de un solo paso y una entrada tangencial al cuerpo.

Este evaporador es utilizado cuando la solución concentrada es de alta viscosidad por lo que el coeficiente global de transferencia de calor es muy bajo. Aunque pueden no ser los más económicos para muchos usos, los evaporadores de circulación forzada son apropiados para gran variedad de aplicaciones.

2.2.3. Evaporadores de película agitada

Este tipo de evaporador emplea una superficie de calentamiento que consiste en un tubo enchaquetado de forma cónica y un agitador. El líquido es rociado por la parte superior del tubo y a medida que desciende el material es agitado por las aspas. La solución sale por el fondo y el vapor en la parte superior.

El evaporador está diseñado para aumentar la transferencia de calor por medio de la convección forzada. Este tipo de evaporador tiene entre es aplicado en materiales muy viscosos, tales como látex de caucho, gelatina, antibióticos y jugos de frutas.

2.3. Procesos de evaporación

Un evaporador no es solamente referido al tipo de configuración del cual ha sido construido, sino también a la manera en que se lleva a cabo el proceso de evaporación. A continuación se presentan los dos tipos de procesos en el que se puede realizar la evaporación.

2.3.1. Evaporación simple efecto

Es un proceso de evaporación que consiste en un arreglo simple de un solo evaporador. El evaporador es alimentado por vapor proveniente de una fuente externa (una caldera de vapor), el cual al pasar por el intercambiador de calor se condensa cediendo su calor latente al líquido que se desea concentrar. El vapor vegetal generado es llevado a un condensador.

La solución es precalentada para que la temperatura en la que es alimentada sea cercana al punto de ebullición. Si la solución que se va a evaporar es bastante diluida y es parecida al agua, al adicionar un kilogramo de vapor, se obtendrá aproximadamente un kilogramo de vapor de la solución.

El alto consumo de vapor limita el uso de estos evaporadores, ya que el costo de operación se eleva, por lo que son usados en casos donde no se requiere mucha capacidad. Estos evaporadores pueden ser operados de manera continua, semicontinua o intermitente con muy poca diferencia en sus requerimientos de energía. El evaporador simple efecto produce casi la misma cantidad de vapor del que consume, con la diferencia que la temperatura del vapor vegetal es menor a la del vapor vivo, y por lo tanto produce éste último se encuentra a menor presión.

2.3.2. Evaporación múltiple efecto

Es un proceso de evaporación en el cual se conecta dos o más evaporadores, de tal manera que el vapor vegetal generado por uno, ocupa el lugar del vapor vivo en el siguiente evaporador y así sucesivamente.

El evaporador múltiple efecto se refiere a un conjunto completo de equipos en una misma instalación, en la que un efecto es una sección del evaporador. Cada efecto es calentado por vapor a cierta presión, y éste a su vez, produce vapor a una presión inferior a la otra sección. La manera en que se utiliza el vapor ocasiona un ahorro de energía considerable comparada con la evaporación de simple efecto.

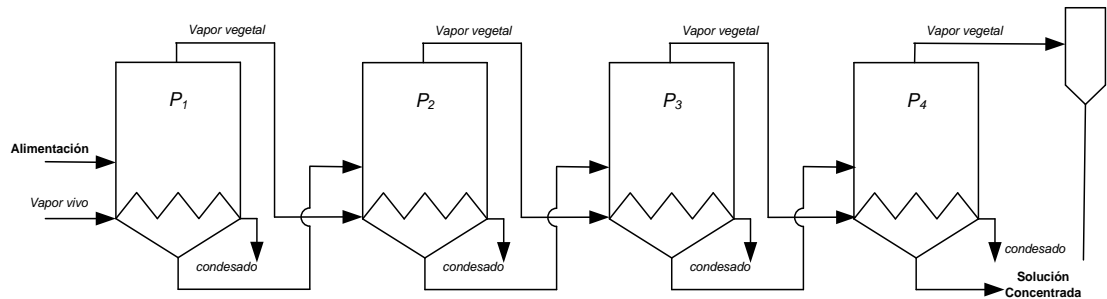
2.3.2.1. Métodos de alimentación

En un evaporador múltiple efecto, los efectos son numerados en dirección al flujo de vapor. El primer efecto es aquel en el cual ingresa el vapor de caldera. La secuencia en que se alimenta la solución líquida a través del evaporador puede ser hacia adelante (o directa), hacia atrás (o inversa), paralela o mixta.

2.3.2.1.1. Alimentación directa

En la figura 5 muestra cuatro evaporadores conectados en serie en los cuales se observa que la dirección del flujo de vapor coincide con el flujo de la solución. Cuando el líquido fluye en la misma dirección que el vapor se dice que la alimentación es directa o hacia adelante.

Figura 5. **Evaporador múltiple efecto con alimentación directa**



Fuente: elaboración propia.

En el primer efecto ingresa el vapor vivo y solución diluida. La alimentación del líquido se logra mediante el uso de una bomba. En este efecto el solvente empieza su ebullición por lo que vapor producido es introducido en el intercambiador del segundo efecto. De igual manera sucede con el vapor producido en los demás efectos. En el último efecto, el vapor vegetal es conducido a un equipo de vacío, el cual puede ser un condensador o una bomba de vacío.

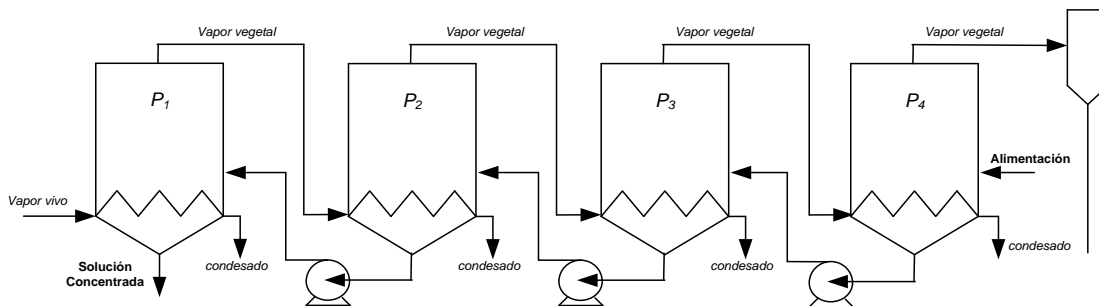
El flujo del líquido se realiza de un efecto a otro si utilizar ningún medio mecánico para movilizarlo, esto es debido a que en cada efecto la presión decrece. Se requieren solamente válvulas entre cada efecto para regular el flujo.

2.3.2.1.2. **Alimentación inversa**

El arreglo de los evaporadores es similar al que se mencionó anteriormente, con la diferencia que la alimentación de la solución diluida se

lleva a cabo en el último efecto. Cuando el líquido fluye en dirección contraria al flujo de vapor se dice que la alimentación es inversa o hacia atrás.

Figura 6. **Evaporador múltiple efecto con alimentación inversa**



Fuente: elaboración propia.

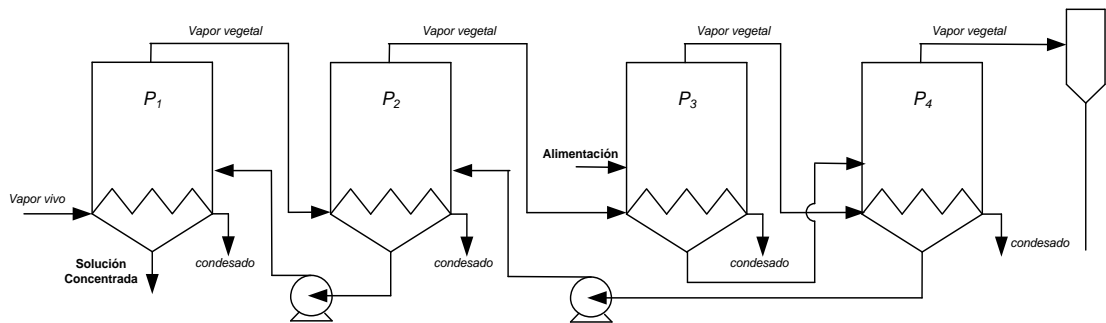
A medida que la solución avanza en el evaporador, la presión aumenta, por lo que es necesario el uso de una bomba para transportar la solución entre cada efecto. Aunque esta disposición tiene un alto costo, su aplicación principal se realiza cuando los líquidos son muy viscosos. Como la presión del primer efecto es la más elevada, la temperatura de éste será la mayor del sistema, por lo tanto la viscosidad del líquido concentrado a la salida del proceso será menor.

2.3.2.1.3. Alimentación mixta

En este arreglo, la alimentación se introduce en un efecto intermedio, por lo que la solución diluida es transportada como alimentación directa hasta el último efecto, para después ser trasladada de manera inversa hacia los primeros efectos para obtener la solución concentrada en el primer efecto.

En la alimentación mixta el alimento se aplica cuando la solución concentrada muy viscosa, por lo que se facilita su manejo a la temperatura más alta del sistema.

Figura 7. **Evaporador múltiple efecto con alimentación mixta**



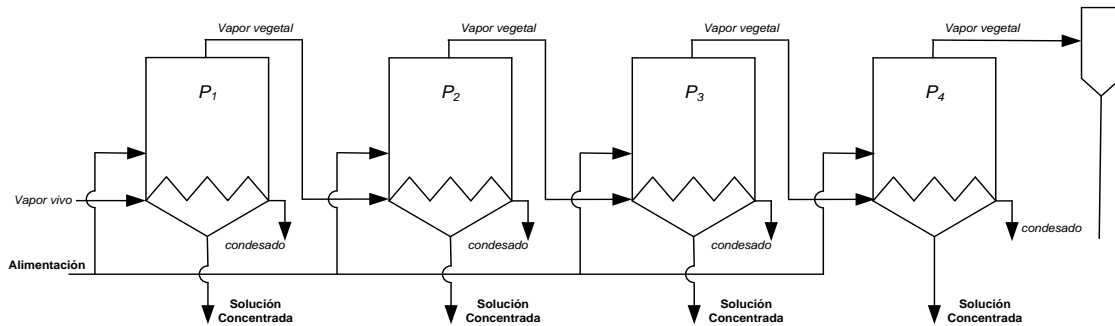
Fuente: elaboración propia.

2.3.2.1.4. **Alimentación paralela**

En esta disposición, la alimentación se introduce a cada efecto del evaporador. La diferencia de la alimentación paralela con los otros métodos de alimentación es que no existe transporte de líquido entre los efectos, por lo que a uno se le extrae la solución concentrada. El flujo de vapor vegetal se transporta de la misma manera en que los otros arreglos lo hacen.

La alimentación paralela es utilizada en procesos en los cuales la alimentación está casi saturada, por lo que la finalidad principal es un aumento mínimo de la concentración para formar cristales.

Figura 8. **Evaporador múltiple efecto con alimentación paralela**



Fuente: elaboración propia.

2.3.2.2. Límites de temperatura

Para que exista la transferencia de calor es necesario contar con una diferencia de temperatura entre el vapor y el líquido. Para asegurar la evaporación, se requiere que la temperatura de ebullición del líquido en cada efecto sucesivo sea menor que la temperatura del vapor que ingresa al efecto.

El vapor de un efecto se utiliza para calentar otro efecto que está a una temperatura de ebullición menor, y el vapor de éste efecto se utiliza para calentar otro efecto que estará a una temperatura de ebullición aún más baja; por lo tanto se desea que la temperatura del vapor en el primer efecto sea lo más alta posible para que cuando se realice la de condensación en el último efecto, se desarrolle una diferencia considerable de la temperatura para lograr calentar la solución.

El límite superior de la temperatura está fijado por la presión del vapor que proviene de la caldera; además pueden influir factores como la suciedad, corrosión, degradación del producto o las características del líquido.

El límite inferior de temperatura está determinado por la temperatura y la disponibilidad de agua de enfriamiento o por la necesidad de vapor a baja temperatura para algún otro uso.

Otros factores que pueden afectar este límite corresponden generalmente a un alto vacío, viscosidad de la solución concentrada, grandes cantidades de vapor que debe ser separado del producto, o el costo de la eliminación de los gases incondensables.

2.3.2.3. Capacidad

La capacidad de un sistema de evaporación se expresa a través de la siguiente ecuación:

$$Q = U * A * (\Delta T) \quad \text{Ecuación 1}$$

(Referencia 6)

La ecuación 1 determina la cantidad de calor Q necesario en la operación, donde U es el coeficiente de transferencia de calor, A es la superficie donde se realiza la transferencia de calor y ΔT es la diferencia de temperatura entre el vapor de agua que se condensa y la temperatura del líquido en ebullición.

2.3.2.4. Economía del vapor

La economía de vapor es la relación entre la masa de vapor que se genera en cada efecto y la masa de vapor vivo ingresado al sistema. Debido a que el condensado que se recupera en cada efecto es casi la cantidad de vapor vivo que se ingresó al sistema, la economía de vapor aumenta aproximadamente en proporción al número de efectos utilizados.

$$e = \frac{\sum M_i}{M_{vv}} \quad \text{Ecuación 2}$$

La ecuación 2 determina la economía de vapor e del sistema de evaporación, donde $\sum M_i$ es la sumatoria de la masa de vapor generado por cada efecto y M_{vv} es la masa de vapor vivo consumido por el evaporador.

En la práctica, la relación entre el número de efectos, la economía de vapor y los requerimientos energéticos para el calentamiento de la superficie de contacto no son exactos, y sólo pueden ser determinados para un proyecto específico a través de balances de masa y energía, así como la consideración de la diferencia total de la temperatura y el desenvolvimiento de las temperaturas en cada efecto.

La economía de vapor por lo general no es igual a la cantidad de efectos que tenga el evaporador, esto debido a la influencia de la carga del calor sensible si la alimentación está a una temperatura distanciada del punto de ebullición. La relación puede aproximarse al número de efectos siempre que se incluyan medios eficaces para el precalentamiento de la alimentación.

2.4. Evaporación al vacío

La evaporación al vacío se refiere al proceso en el que un evaporador trabaja a presión inferior a la presión atmosférica. La generación de vacío en los evaporadores es de suma importancia según el tipo de proceso que se realice. En el evaporador múltiple efecto, los cuerpos siguientes al primer efecto se trabajan al vacío para asegurar la operación.

2.4.1. Función del vacío

La razón por la cual se trabaja en vacío se explica observando el diagrama de fases del disolvente. Si se disminuye la presión, la temperatura a la cual hierve un líquido también disminuye, y se puede hacer la separación sin peligro que el soluto se descomponga térmicamente. Esto es debido a que la fuerza sobre las partículas disminuye, por lo que la energía que debe suministrarse para que lleguen a saturación debe ser menor.

En un sistema de evaporación se hace vacío al final del último efecto, eliminando vapor del sistema a través de la condensación. La baja presión que se obtiene, hace que las partículas escapen con mayor facilidad.

A pesar que se requiere una menor energía cuando se trabaja con vacío, la energía consumida en el último efecto tiene que obtenerse con mayor rapidez, resultando así un mayor requerimiento energético que es obtenido de la solución que se está concentrando. Para compensar esa energía extraída de la solución, la condensación de las partículas de vapor es más rápida produciendo bajas presiones en el efecto que proporciona el vapor.

Gracias a este efecto en cadena, es posible tener bajas presiones en todo el sistema de evaporación múltiple efecto. Debido a las pérdidas energéticas del sistema, las presiones no son las mismas en todos los efectos, sino que aumenta conforme se acerca al primer efecto.

La importancia de generación de vacío radica en la relación de la presión con la temperatura de ebullición del solvente. El vacío permite disminuir el punto de ebullición de la solución y, por lo tanto, aumentar la diferencia de

temperatura entre el vapor condensante y la solución, favoreciendo así la transferencia de calor.

2.4.2. Condensadores

Son equipos de transferencia de calor que tiene como objetivo licuar vapor eliminando el calor latente. La condensación de agua produce un vacío parcial en un ambiente sellado, esto debido a la disminución de volumen que el vapor experimenta en la condensación. Para llevar a cabo la operación, se utiliza agua como refrigerante.

2.4.2.1. Condensador de superficie

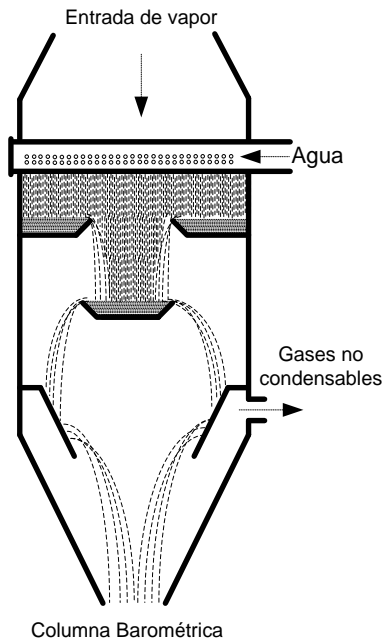
El condensador de superficie es un intercambiador de calor en donde el vapor y el refrigerante entran en contacto térmico a través de una superficie. Este tipo de evaporadores es comúnmente usado en centrales térmicas.

Regularmente son empleados cuando no se desea que se mezcle el condensado con el agua de enfriamiento. Por lo general, estos condensadores son intercambiadores de concha y tubos, en donde el vapor pasa por la concha y el refrigerante por los tubos.

2.4.2.2. Condensador de contacto

El condensador de contacto directo es una cámara de mezcla en donde el vapor y el refrigerante tienen contacto directo. Este tipo de condensadores tienen una forma tal que el área de paso decrece proporcionalmente a la disminución del volumen. La cámara cuenta con equipo de remoción de los gases no condensables que entran al vapor o al agua.

Figura 9. **Condensador de charolas a contracorriente**

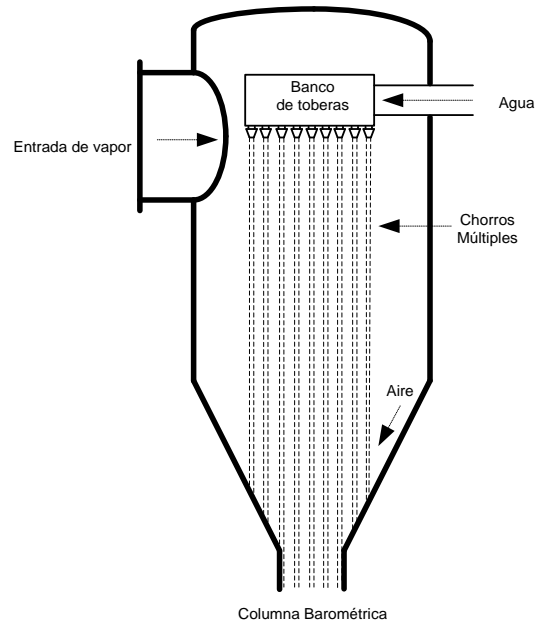


Fuente: elaboración propia.

Existen dos maneras en las que se direccionan los flujos dentro del condensador. Cuando el vapor entra por o cerca de la parte superior, y fluye hacia con la corriente de agua de manera descendente hacia la salida, el condensador es de corriente paralela.

Cuando el vapor entra cerca de la parte inferior, se eleva a través de la corriente de agua, el condensador está a contracorriente. Este arreglo se usa en casos donde el agua es escasa o existe la dificultad para que el vapor entre por la parte superior.

Figura 10. **Condensador de chorros múltiples**



Fuente: elaboración propia.

Al interior del condensador se procura dispersar el agua de refrigeración para lograr una mejor mezcla con el vapor y así lograr la condensación. Existen condensadores que en su interior están dispuestas charolas a manera que el agua descienda en forma de cortina o chorros sobre el vapor.

Otra manera de distribuir el agua es a través de chorros múltiples. En este condensador, los chorros de agua salen a alta velocidad por el efecto que hacen las toberas en los extremos de los chorros, con el fin de arrastrar y remover los gases no condensables a medida que sucede la condensación.

2.4.2.2.1. Condensador barométrico

La característica principal del condensador barométrico es que la descarga del condensado se hace a través de una columna barométrica, la cual funciona como sello hidráulico.

Para evacuar el condensado sin perder el vacío, es necesario mantener una carga hidráulica para equilibrar la presión absoluta de vapor en el condensador y la presión atmosférica. A presión atmosférica, la carga hidrostática equivale a 10,34 metros (34 pies); y a un vacío teóricamente completo, la carga hidrostática equivale a cero.

El condensador barométrico es empleado en gran parte de la industria como un medio económico para condensar vapor, remover gases incondensables y generar vacío. Desde hace varios años se usa en la industria de alimentos para procesar aceite comestible, leche y azúcar entre otros. Por su operación a bajo costo, este tipo de condensador se utiliza la mayoría de aplicaciones de la ingeniería de procesos como generador de vacío.

2.4.2.2.2. Condensador de bajo nivel

El condensador utiliza una bomba para evacuar el condensado. Con este arreglo, en lugar de sellar el condensador con la columna barométrica, la carga la proporciona la bomba.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Las variables se encuentran definidas de acuerdo al sistema de evaporación doble efecto:

Tabla I. Definición operacional de variables

No	Variable	Dimensional	Factor potencia de diseño		Factores perturbadores	
			constantes	variables	controlables	De ruido
Análisis del Equipo						
1	Presión del vapor de entrada	PSI	X			
2	Número de Efectos	-		X		
3	Flujo másico del vapor de calentamiento.	kg/s	X			
4	F. másico de condensado, primer efecto	kg/s	X			
5	Temperatura de evaporador 1	°C	X			
6	Flujo másico de vapor, segundo efecto	kg/s		X		
7	F. másico de condensado, segundo efecto	kg/s		X		
8	Temperatura de evaporador 2	°C		X		
9	Presión de vacío, Segundo efecto	in Hg		X		

Continuación de la tabla I.

10	T. de condensado, Condensador barométrico	°C		X		
11	F. másico de condensador barométrico	kg/s		X		
12	F. másico de alimentación a evaporadores	kg/s		X		
Análisis de Ambiente externo						
12	Temperatura ambiente	°C				X
13	Presión atmosférica	atm				X

Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Definición de variables a manipular**

No	Variable	Dimensional	Rango de Variación
1	Número de efectos	-	1 – 2
2	Flujo másico de alimentación a los evaporadores	UnRot	45 – 200

Fuente: elaboración propia.

Las variables de respuesta son:

- Lecturas en termómetros instalados en los separadores del evaporador los cuales indican las temperaturas de ebullición del líquido.
- Lecturas en manómetros instalados en calandrias los cuales indican la presiones de vapor en condensación.

- Lecturas en un vacuómetro instalado a la salida del segundo efecto el cual indica el vacío generado por el condensador barométrico.
- Recolección y cálculo de flujos máxicos de condensación se a través de instrumentos de medición de masa y tiempo.

3.2. Delimitación del área de estudio

La metodología planteada estuvo delimitada por un sistema de evaporación doble efecto conectado a un condensador barométrico. El equipo se encuentra instalado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, el cual cuenta con las siguientes características.

- Dos evaporadores
- Dos intercambiadores de concha y tubos
- Dos intercambiadores de tubos concéntricos
- Un condensador barométrico
- Dos tanques abiertos
- Una bomba centrífuga
- Un eyector de vacío
- Dos trampas de vapor

El equipo está diseñado para ser operado únicamente con agua, por lo que no se realizó ningún tipo de separación. La finalidad de la operación del evaporador se realizó únicamente para fines didácticos.

3.3. Recursos disponibles

Recursos humanos

- Investigador: Carlos Eduardo Morales Chávez
- Asesor: José Manuel Tay Oroxom
- Estudiantes: estudiantes del curso de Laboratorio de Ingeniería Química Uno, código 428

Recursos materiales

Localización: Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos.

Equipo:

- Evaporador de doble efecto
- Condensador Barométrico
- Instrumentos de medición

Insumos:

- Agua
- Diesel
- Caldera

Otros Materiales:

- Hojas
- Equipo de computación
- Impresora

3.4. Técnica aplicada

El presente estudio fue de tipo experimental didáctico, ya que se relacionaron las variables involucradas del proceso de evaporación doble efecto para la realización de un diseño experimental.

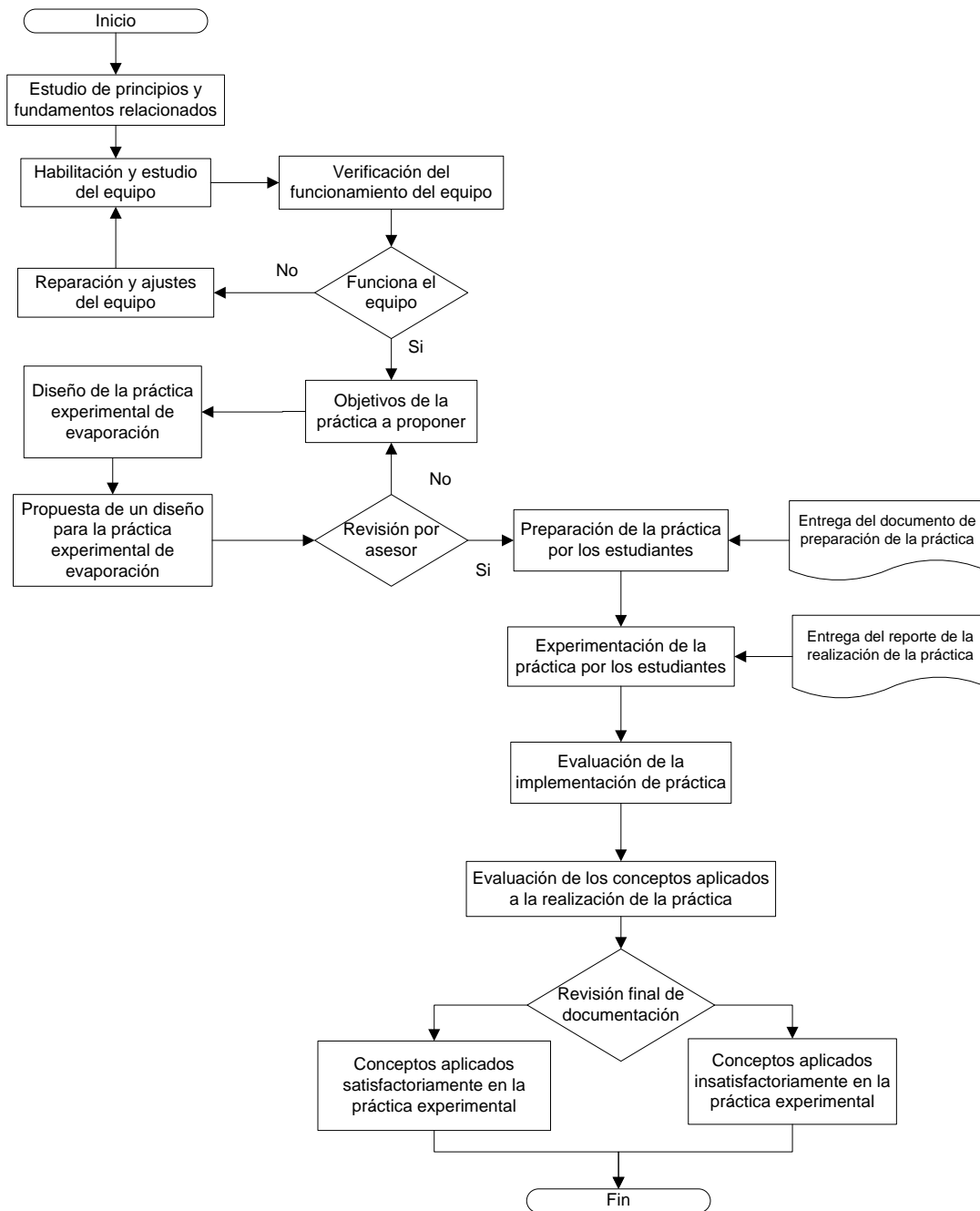
Técnica cuantitativa

Se llevó a cabo pruebas experimentales por parte de los estudiantes en el equipo de evaporación doble efecto, en las cuales se obtuvieron resultados por medio de ecuaciones y tabulación de datos.

Técnica cualitativa

Se realizó un estudio descriptivo sobre el impacto de la metodología y la didáctica del equipo. Se utilizó la encuesta para conocer la opinión de los estudiantes que ejecutaron en la práctica propuesta.

Figura 11. Procedimiento gráfico del desarrollo de la práctica



Fuente: elaboración propia.

3.5. Recolección y ordenamiento de la información

Información experimental

La recolección de datos se realizó en base al diseño experimental apropiado, tomando en cuenta la definición operacional de variables. Se indicó el tipo de variable y se realizó una clasificación en función de los objetivos del diseño de la práctica a realizar. El tratamiento de datos y el número de repeticiones para la obtención de resultados se define en el diseño experimental.

Tabla III. **Tabla de recolección de datos experimentales**

Corrida	Tiempo de Operación	Variable operacional no. 1	Variable operacional no. 2	Variable operacional N
Estado inestable				
1	$t_{op,1}$	$X_{1,1}$	$X_{1,2}$	$X_{1,N}$
2	$t_{op,2}$	$X_{2,1}$	$X_{2,2}$	$X_{2,N}$
3	$t_{op,3}$	$X_{3,1}$	$X_{3,2}$	$X_{3,N}$
4	$t_{op,4}$	$X_{4,1}$	$X_{4,2}$	$X_{4,N}$
n	$t_{op,n}$	$X_{n,1}$	$X_{n,2}$	$X_{n,N}$
Estado estable				
1	$t_{op,n+1}$	$X_{n+1,1}$	$X_{n+1,2}$	$X_{n+1,N}$
2	$t_{op,n+2}$	$X_{n+2,1}$	$X_{n+2,2}$	$X_{n+2,N}$
3	$t_{op,n+3}$	$X_{n+3,1}$	$X_{n+3,2}$	$X_{n+3,N}$
4	$t_{op,n+4}$	$X_{n+4,1}$	$X_{n+4,2}$	$X_{n+4,N}$
5	$t_{op,n+5}$	$X_{n+5,1}$	$X_{n+5,2}$	$X_{n+5,N}$

Fuente: elaboración propia.

Información didáctica

La recolección de datos cualitativos acerca de la didáctica de la práctica experimental y del equipo se obtuvo a partir de un cuestionario de evaluación proporcionado a los estudiantes al finalizar el informe de la práctica realizada. El cuestionario fue respondido por los 36 alumnos que formaron parte del curso de Laboratorio de Ingeniería Química Uno en el primer semestre del 2011.

El cuestionario fue diseñado para conocer la calidad de aprendizaje en el desarrollo de la práctica, la aplicación didáctica utilizando el equipo en la experimentación y la importancia que tiene la implementación de la práctica. La recolección y el ordenamiento de los datos se muestran en la tabla IV.

Tabla IV. **Tabla recolección de la información didáctica**

Pregunta X_1	
Respuesta	Cantidad de respuestas
<i>Opción 1</i>	X_1
<i>Opción 2</i>	X_2
<i>Opción 3</i>	X_3
<i>Opción 4</i>	X_4
Total de respuestas	$\sum X_i$

Fuente: elaboración propia.

3.6. Tabulación y procesamiento de la información

Información experimental

El procesamiento de la información experimental se realizó a través de una hoja de cálculo del programa Microsoft Excel, los cuales son en base a los objetivos de la práctica experimental propuesta. Se realizaron cálculos de flujo másico de condensados y alimentación, economía de vapor, capacidades de evaporación, área de transferencia de calor, coeficientes de transferencia de calor y pérdidas de energía por radiación. La tabulación de los datos calculados se muestra en la tabla V.

Tabla V. **Tabla de tabulación de datos experimentales**

Corrida	Variable no. 1	Variable no. 2	Variable N
1	$X_{1,1}$	$X_{1,2}$	$X_{1,N}$
2	$X_{2,1}$	$X_{2,2}$	$X_{2,N}$
3	$X_{3,1}$	$X_{3,2}$	$X_{3,N}$
4	$X_{4,1}$	$X_{4,2}$	$X_{4,N}$
5	$X_{5,1}$	$X_{5,2}$	$X_{5,N}$
Promedio	X_1	X_2	X_N
Desviación estándar	d_1	d_2	d_N

Fuente: elaboración propia.

3.7. Análisis estadístico

Desviación estándar

Es una medida de la precisión o dispersión de una muestra. Al ser un experimento en el cual se realicen varias corridas, tomaremos en cuenta errores estadísticos como la desviación estándar, para valores de $N < 31$, ya que en el experimento no se realizarán más de 31 corridas.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde:

σ = Desviación estándar.

N = Número total de datos.

x_i = Cada uno de los datos

\bar{x} = Promedio de los datos.

Coefficiente de variación

Es una medida que permite comparar la dispersión entre dos poblaciones distintas, El coeficiente elimina las dimensionales de las variables en estudio, permitiendo visualizar la proporción entre una medida de tendencia y la desviación típica o estándar.

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} * 100 \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde

CV = Coeficiente de variación

σ = Desviación estándar

\bar{x} = Promedio de los datos

Intervalo de confianza

Es un rango de valores que permiten caracterizar una variable. El intervalo de confianza estima los valores a los cuales se encuentra el verdadero valor del parámetro en función de una probabilidad determinada. El intervalo calculado depende del tamaño de la muestra, la probabilidad o nivel de confianza y lo estimado por la muestra.

$$\bar{x}_{x/i} = x \pm t_{\alpha/2} * \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Dónde:

$\bar{x}_{x/i}$ = Límite superior o inferior del intervalo de confianza

\bar{x} = Promedio de los datos.

$t_{\alpha/2}$ = Valor de la curva normal de distribución para una confianza de 95 %

σ = Desviación estándar

n = Número de corridas

Error de exactitud

Es un valor relativo que representa la proximidad de un dato al valor verdadero.

$$E = \frac{|D_T - D_E|}{D_T} * 100\%$$

Ecuación 6

Donde

E = Error de exactitud

D_T = Dato teórico

D_E = Dato experimental

4. RESULTADOS

4.1. Manual de operación

En el presente manual se hace una descripción general del equipo, accesorios e insumos necesarios, así como un diagrama de flujo y procedimientos para para su operación.

Figura 12. **Unidad de evaporación doble efecto**



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

4.1.1. Descripción del equipo

La unidad de evaporación es un equipo diseñado para ser utilizado con fines didácticos, el cual describe los fenómenos de transferencia de calor y evaporación. El equipo está instalado en una armazón de hierro con las siguientes dimensiones: largo 1,98 metros, ancho 0,61 metros y alto 1,42 metros.

4.1.1.1. Componentes

Evaporadores

La unidad cuenta con dos evaporadores de tubos largos, los cuales están fabricados de cobre. Cada evaporador está formado por un separador y una calandria.

El separador o cuerpo del evaporador, es la parte del equipo donde se lleva a cabo la ebullición del líquido. Cuenta con un termómetro de carátula con escala de 50 a 300 grados Fahrenheit (10 a 149 grados Celsius), un medidor de nivel y dos visores. Sus dimensiones son: diámetro 45,7 centímetros (18 pulgadas) y altura 81,2 centímetros (32 pulgadas).

La calandria es un intercambiador de calor tipo concha y tubos de un solo paso. Cuenta con 37 tubos con un diámetro nominal de 12,7 milímetros ($\frac{1}{2}$ pulgada), dispuestos de manera triangular con un Pitch de 21,84 milímetros (0,86 pulgadas) y una longitud de tubo de 1,42 metros (4 pies 8 pulgadas).

En la parte exterior de los tubos fluye el vapor de calentamiento, y en el interior fluye el líquido que será evaporado. Cada calandria cuenta con un

manómetro de carátula con escala de 0 a 30 libras sobre pulgada cuadrada instalado en la sección de la concha.

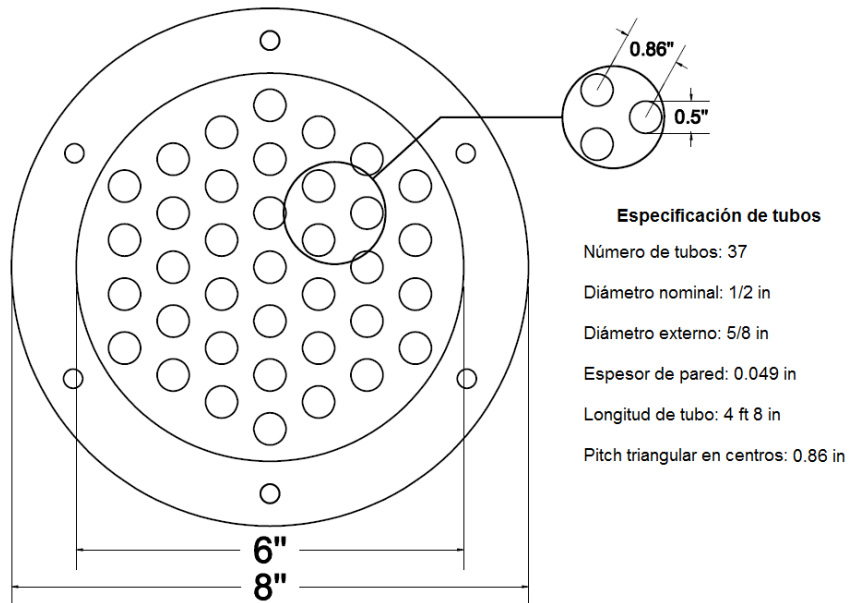
Figura 13. **Separador del evaporador**



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC

En la salida de cada calandria se dispone de una trapa de vapor tipo flotador seguido por un intercambiador de tubos concéntricos. En el intercambiador, el agua fría pasa por tubo exterior y el condensado pasa por el tubo interno. De esta manera, en la salida del intercambiador se recolecta el condensado proveniente de su respectiva calandria, evitando así la evaporación instantánea.

Figura 14. **Vista en planta de la calandria**



Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Trampas de vapor e Intercambiadores de calor de tubos concéntricos**



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

El separador y la calandria están conectados para que el líquido que a ser evaporado pueda recircular en ambos componentes al momento del calentamiento. El movimiento de recirculación se realiza por convección natural en dirección contraria a la del vapor.

Al momento de ser operado el evaporador, el nivel del agua en el separador debe estar por encima de la parte superior de la calandria y ser visible en el visor, ya que es necesario mantener un circuito cerrado de agua en los dos componentes para asegurar que la ebullición del líquido se realice en el separador. Si el nivel del agua no es visible en el visor, la ebullición se llevará a cabo en los tubos, lo cual afecta la operación y puede ocasionar daños en el equipo.

Figura 16. **Calandria del evaporador**



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

El vapor generado por el primer efecto, es conducido a la calandria del segundo efecto para realizar la misma operación del efecto anterior. El vapor que se genera del segundo efecto puede ser conducido al condensador de superficie o al condensador barométrico. Ambos condensadores están conectados en la salida del segundo evaporador para que el vapor pueda ser dirigido a cualquiera de los dos.

Condensadores

El condensador de superficie es un intercambiador de calor con las mismas características de las calandrias del evaporador. Al igual que las calandrias, la condensación del vapor se lleva a cabo por el lado de la concha y el agua es conducida por los tubos.

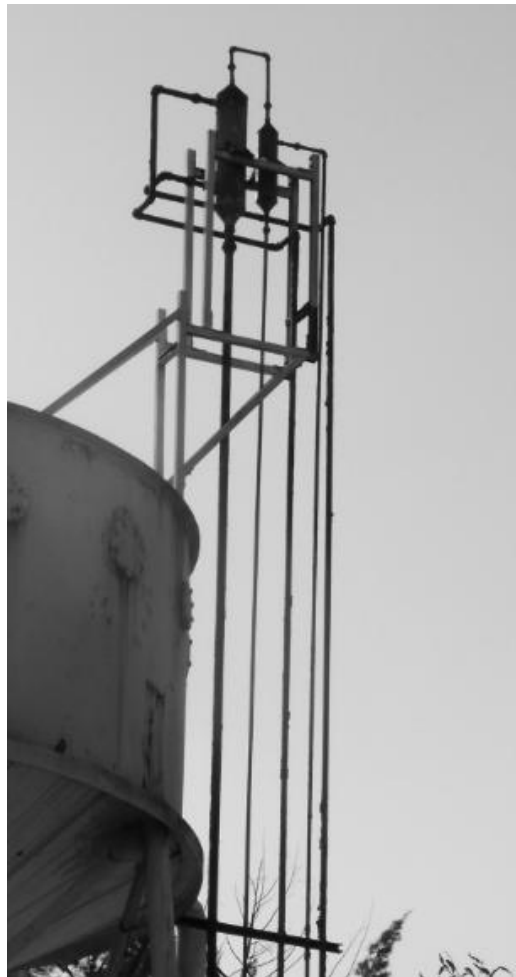
Figura 17. **Condensador de superficie**



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

El condensador barométrico es una cámara donde se mezcla el vapor y el agua de enfriamiento. Éste equipo es anexo al evaporador y está ubicado al exterior del laboratorio. Su función principal, además de condensar el vapor, es hacer operar la unidad con presión de vacío. Su manejo no se limita únicamente a la unidad de evaporación, ya que también tiene conexión con otros equipos del laboratorio para realizar la misma función.

Figura 18. **Condensador barométrico**



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

La mezcla de condensado es descargado a un tanque ubicado en la salida de la pierna barométrica. El tanque está conectado a través de una tubería para el agua sea conducida a un medido de vertedero y finalmente recircule al tanque principal del laboratorio.

Para la medición de la presión de vacío, el equipo cuenta con un vacuómetro instalado en la tubería que conecta el condensador barométrico con la salida del separador del segundo efecto. El vacuómetro tiene una escala de 0 a 30 pulgadas de mercurio.

4.1.1.2. Insumos de la operación

Agua

El agua es almacenada en el tanque principal del laboratorio y es suministrada por una bomba centrífuga. La tubería de descarga cuenta con tres ramales para alimentar varios equipos del laboratorio.

En la figura 19 se observan los tres ramales en la tubería de descarga de la bomba. El ramal del centro es el que alimenta la unidad de evaporación, la unidad de intercambiador de concha y tubos de cobre y la unidad de intercambiadores de tubos concéntricos. El ramal que se encuentra del lado derecho, es el que alimenta el condensador barométrico.

La tubería que alimenta de agua los evaporadores cuenta con una válvula de compuerta, un rotámetro y dos válvulas de globo. Éstas últimas regulan el paso de agua a cada evaporador. En los intercambiadores de tubos concéntricos, la tubería que conduce el flujo de agua, cuenta con una válvula de compuerta para la alimentación de ambos intercambiadores.

Figura 19. **Suministro de agua**



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

Vapor

La alimentación de vapor se hace a través de una conducción de tubería que contiene los siguientes accesorios: Una llave de paso, un filtro de vapor, una válvula reguladora de presión, un manómetro de carátula con escala de 0 a 100 libras sobre pulgada cuadrada y una válvula de alivio.

Figura 20. **Tubería de alimentación de vapor**



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

4.1.2. **Diagrama de flujo**

Equipo

E – 110	Separador
E – 111	Intercambiador de calor de concha y tubos
E – 112	Trampa de vapor
E – 113	Intercambiador de tubos concéntricos
E – 120	Condensador Barométrico
G – 121	Eyector
L – 122	Bomba centrífuga
F – 123	Tanque abierto







Válvulas

V – 114	Válvula de paso
H – 115	Filtro de vapor
V – 116	Válvula reguladora de presión
V – 117	Válvula de alivio
V – 118	Válvula de globo
V – 119	Válvula de compuerta

Instrumentación

K – 1101	Medidor de nivel
K – 1102	Termómetro
K – 1103	Vacuómetro
K – 1104	Manómetro
K – 1105	Rotámetro

Flujos

	Agua de alimentación
	Agua Caliente
	Condensado
	Vapor Vivo
	Vapor del 1er. efecto
	Vapor del 2do. efecto

4.1.3. Precauciones

Al de estar operando el equipo, es necesario tomar en cuenta las siguientes precauciones:

- Utilizar guantes de protección para el manejo del equipo y la recolección condensados.

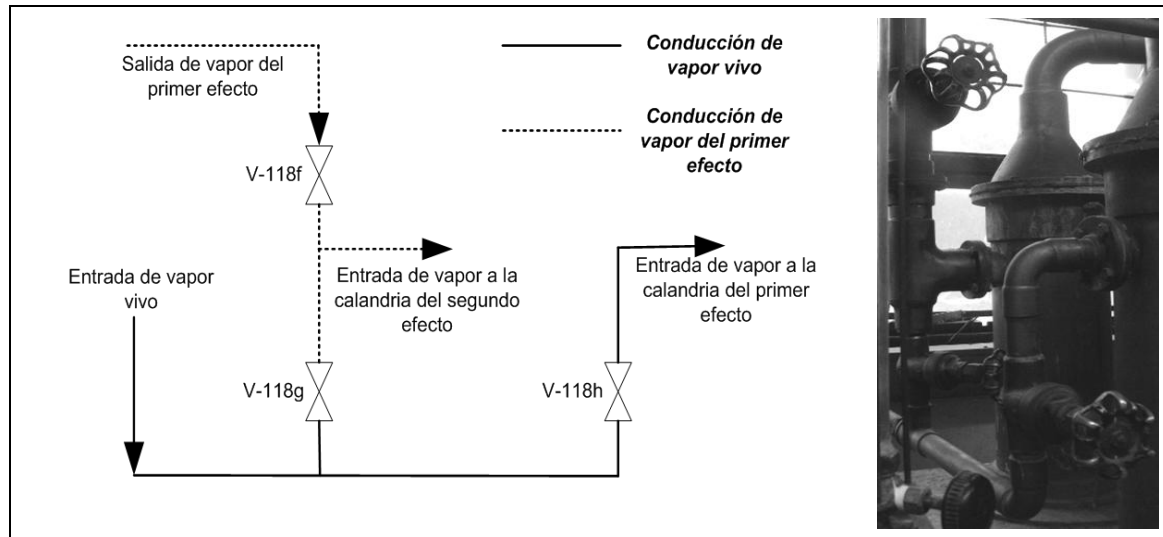
Figura 22. **Recolección de condensado**



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

- El contacto con cualquier superficie de la unidad puede causar quemaduras.
- Asegurar que la válvula V-118f de la tubería que conduce el vapor al segundo efecto se encuentre completamente abierta, para evitar la acumulación del vapor en primer efecto del evaporador.

Figura 23. Esquema del circuito de conducción de vapor



Fuente: elaboración propia.

- Tomar precaución con el agua caliente al momento de vaciar los evaporadores.
- Mantener un nivel adecuado en el tanque de agua para evitar daños en la bomba.

4.1.4. Verificaciones previas a la operación

Antes de iniciar con la operación, es necesario realizar las siguientes verificaciones previas para el buen funcionamiento del equipo:

- Las válvulas tienen que ser revisadas, ya que al momento de poner en funcionamiento la unidad deben de estar en la posición correcta para evitar inconvenientes en el arranque u operación.

- Las válvulas V-119a y V-119b de la tubería de descarga de la bomba deben estar cerradas.
 - Las válvulas V-119h y V-119g de la tubería que conduce el vapor a las calandrias deben de estar cerradas.
 - La válvula V-119f que conecta el primer efecto con el segundo debe de estar completamente abierta para que el equipo trabaje como evaporador doble efecto.
 - Las válvulas V-118c y V-118d que se encuentran por debajo de ambas calandrias debe de estar cerradas.
 - La válvula de paso V-114b que se encuentra en la descarga del condensador de superficie, debe de estar cerrada si se requiere operar la unidad al vacío. De lo contrario debe permanecer abierta.
 - La válvula de compuerta V-119i que se encuentra en la tubería que conduce el vapor hacia el condensador barométrico, debe estar abierta si se requiere operar la unidad al vacío, de lo contrario debe permanecer cerrada.
 - Las válvulas que están ubicadas en la entrada y en la salida del medidor de nivel deben estar completamente abiertas.
- Las mangueras que drenan el agua de los evaporadores, deben de estar dispuestas hacia el desagüe.

- Al momento de hacer uso del condensado barométrico se debe verificar que el tanque de descarga no contenga basura u algún objeto que pueda obstruir el paso de recirculación de agua hacia el tanque principal.

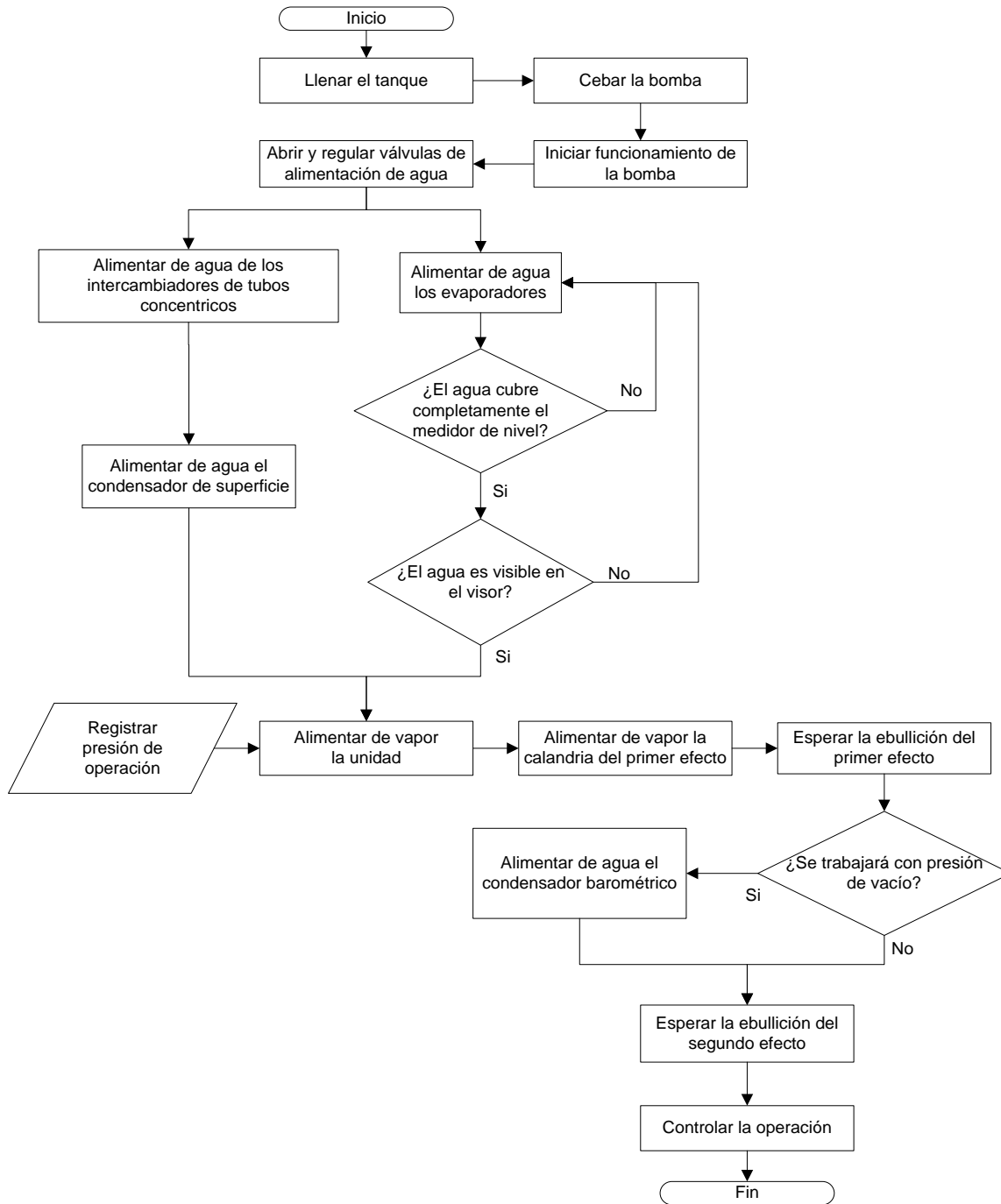
4.1.5. Secuencia de arranque

Para iniciar la operación de la unidad, es necesario realizar el siguiente procedimiento:

- A. Llenar el tanque y cebar la bomba;
- B. Iniciar el funcionamiento de la bomba y abrir las válvulas del circuito de agua que alimentan la unidad;
- C. Alimentar de agua los evaporadores hasta que el nivel sea visible en el visor y cubra completamente el medidor de nivel;
- D. Abrir la válvula de alimentación de agua de los intercambiadores de tubos concéntricos;
- E. Abrir la válvula de alimentación de agua al intercambiador de concha y tubos que condensa el vapor proveniente del segundo efecto;
- F. Abrir la válvula que permite la alimentación de vapor a la unidad y registrar la presión de operación;
- G. Abrir completamente la válvula de compuerta ubicada en la entrada de la calandria del primer efecto;

- H. Esperar aproximadamente 30 minutos para que el agua contenida en el primer efecto alcance el punto de ebullición;
- I. Si se trabaja la unidad al vacío, abrir válvula que permite la alimentación de agua al condensador barométrico y regular su flujo;
- J. Esperar aproximadamente 30 minutos más para que el agua contenida en el segundo efecto alcance el punto de ebullición;
- K. Alimentar de agua los evaporadores regulando el flujo con las válvulas de globo ubicadas a la salida del rotámetro;
- L. Dejar que se estabilice el sistema y controlar la operación;

Figura 24. Procedimiento gráfico de la secuencia de arranque



Fuente: elaboración propia.

4.1.6. Consideraciones en el control de la operación

Durante el funcionamiento del sistema de evaporación, es necesario tomar en consideración lo siguiente:

- Al estar en evaporación ambos efectos, se debe alimentar y regular el agua constantemente a cada evaporador para evitar que baje su nivel. El flujo de alimentación se regula con las válvulas V-118a y V-118b.

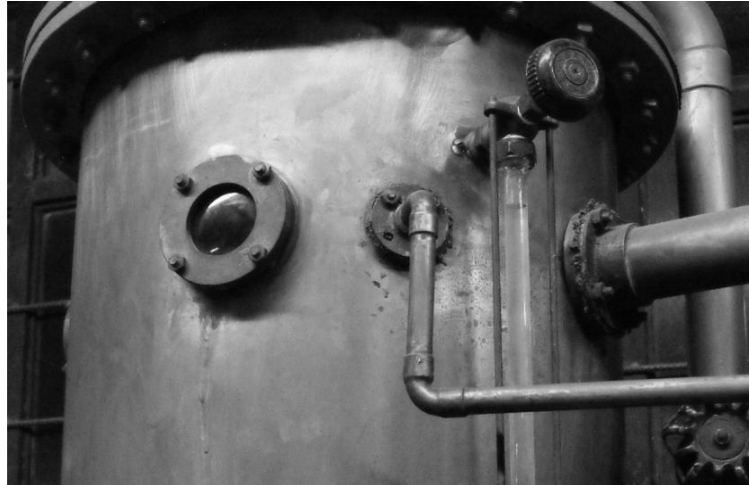
Figura 25. Válvulas de la alimentación de agua (V-118a y V-118b)



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

- El nivel del agua debe cubrir completamente el medidor de nivel. Hay que considerar que por la evaporación del agua, el nivel va estar oscilando durante la operación.
- Al observar la ebullición en el visor, se puede corroborar que el nivel del agua es el adecuado.

Figura 26. **Visor y medidor de nivel**



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

- El agua que alimenta a los intercambiadores de tubos debe regularse para evitar desperdicios innecesarios.

La alimentación de agua que ingresa al condensador barométrico debe ser regulada ya que puede dejar sin suministro a otras unidades experimentales.

- En el condensador de superficie, si se abre excesivamente la válvula de alimentación, puede ocasionar problemas en otras unidades experimentales dejándolas sin suministro de agua.

Si se cierra la válvula y se deja pasar una cantidad mínima de agua, el vapor no será condensado y saldrá a través de la válvula de compuerta ubicada en la salida del condensador, por lo que se requiere estar controlando constantemente el flujo para evitar ambos eventos.

Figura 27. **Válvula de compuerta V-114b**



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

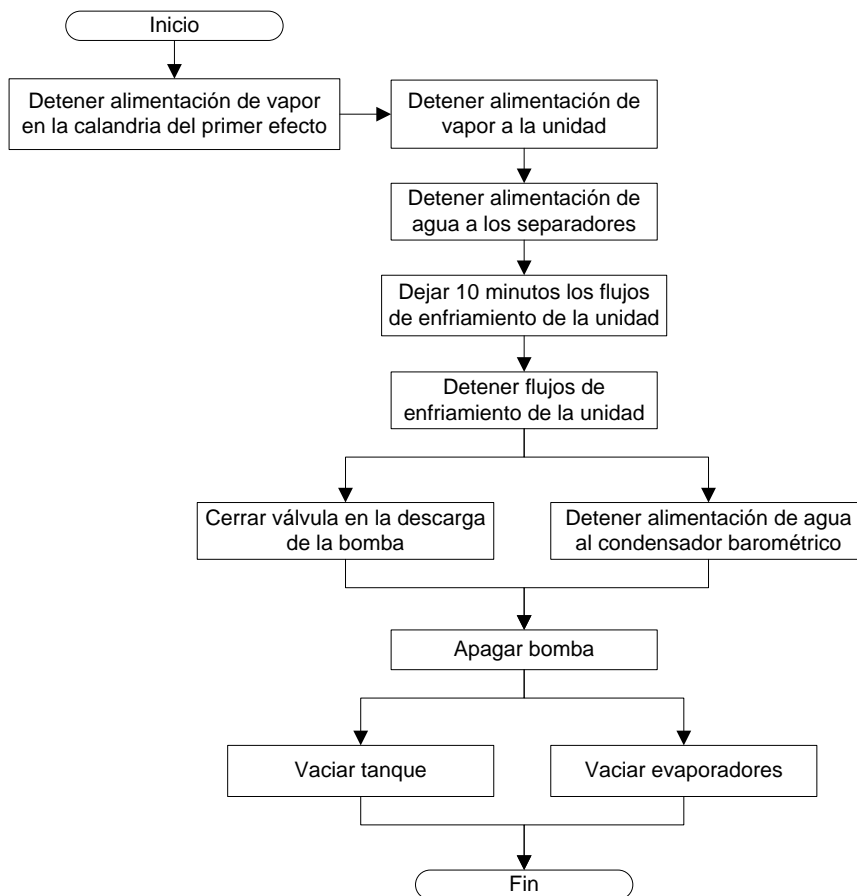
4.1.7. Secuencia de paro

Para finalizar la operación de la unidad, es necesario realizar el siguiente procedimiento:

- A. Cerrar la válvula que permite la alimentación de vapor a la calandria del evaporador.
- B. Cerrar la válvula que permite la alimentación del vapor a la unidad.
- C. Cerrar las válvulas que regulan la alimentación de agua al evaporador.

- D. Dejar de 10 minutos la alimentación de agua en los intercambiadores de tubos concéntricos y el condensador de superficie.
- E. Cerrar las válvulas de alimentación de los intercambiadores de tubos concéntricos e condensador de superficie.
- F. Cerrar las válvulas de la tubería de descarga de la bomba y detener su funcionamiento. Vaciar el tanque de agua y los evaporadores.

Figura 28. **Procedimiento gráfico de la secuencia de paro**



Fuente: elaboración propia.

4.2. Prácticas experimentales propuestas

A continuación se presentan tres prácticas experimentales de las cuales cada una varían sus objetivos según la operación que se desea realizar. En la práctica A y B, el segundo efecto del evaporado trabaja a presión atmosférica; y en la práctica C, el evaporador trabaja conjuntamente con el condensador barométrico

4.2.1. Práctica A

Título: práctica experimental de evaporación doble efecto

Objetivos

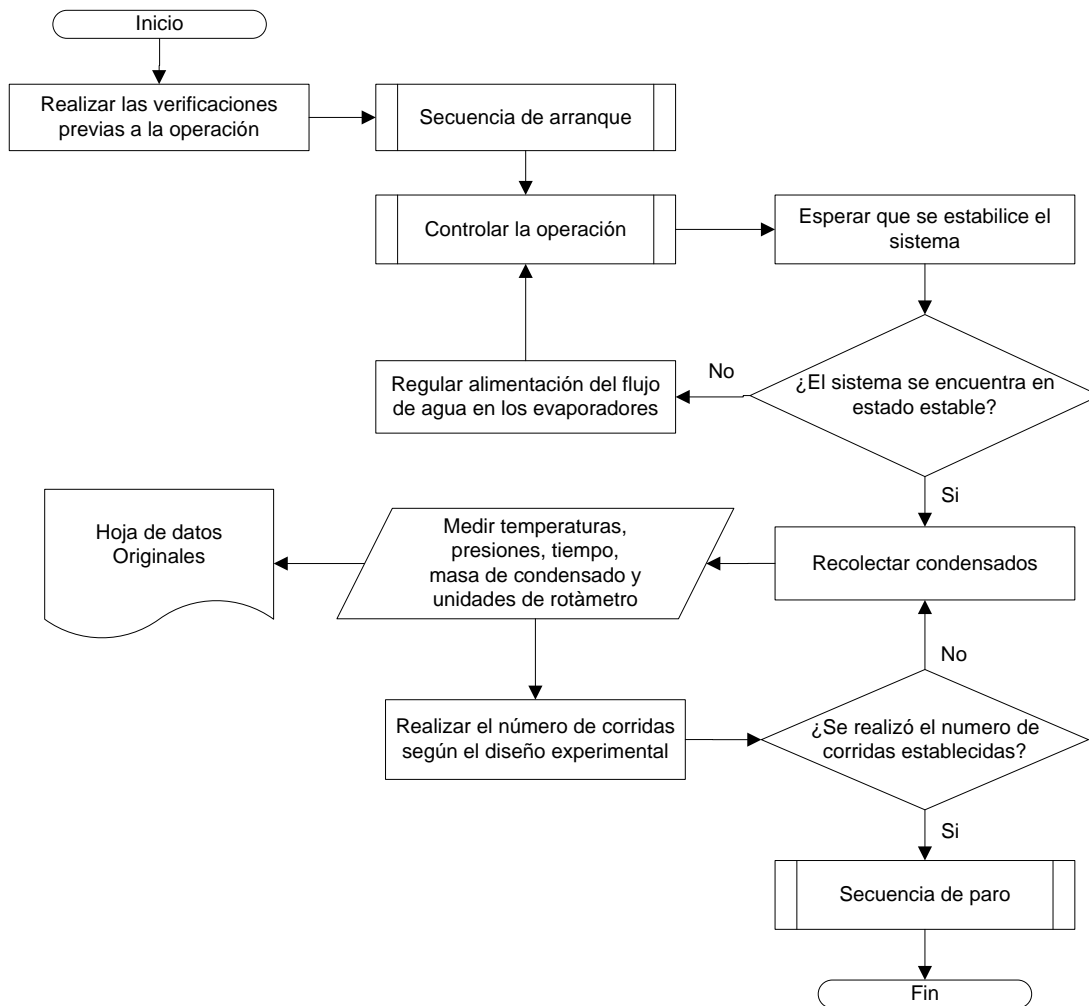
- Realizar un diagrama de flujo de la unidad de evaporación doble efecto
- Realizar un balance de masa para toda la operación.
- Calcular la economía de vapor.
- Calcular la capacidad del evaporador.
- Calcular el coeficiente de transferencia de calor para cada efecto y para la operación completa.

Procedimiento

- A. Realizar la verificaciones previas a la operación
- B. Iniciar la secuencia de arranque.
- C. Esperar la ebullición y controlar la operación.
- D. Esperar que se estabilice el sistema.
- E. Recolectar condensado y medir temperaturas de los separadores, presiones de las calandrias y unidades de rotámetro.

- F. Realizar el número de corridas según diseño experimental.
- G. Iniciar secuencia de paro.

Figura 29. Diagrama del procedimiento de la Práctica A



Fuente: elaboración propia.

4.2.2. Práctica B

Título: práctica experimental de la evaporación doble efecto en estado inestable y estado estacionario.

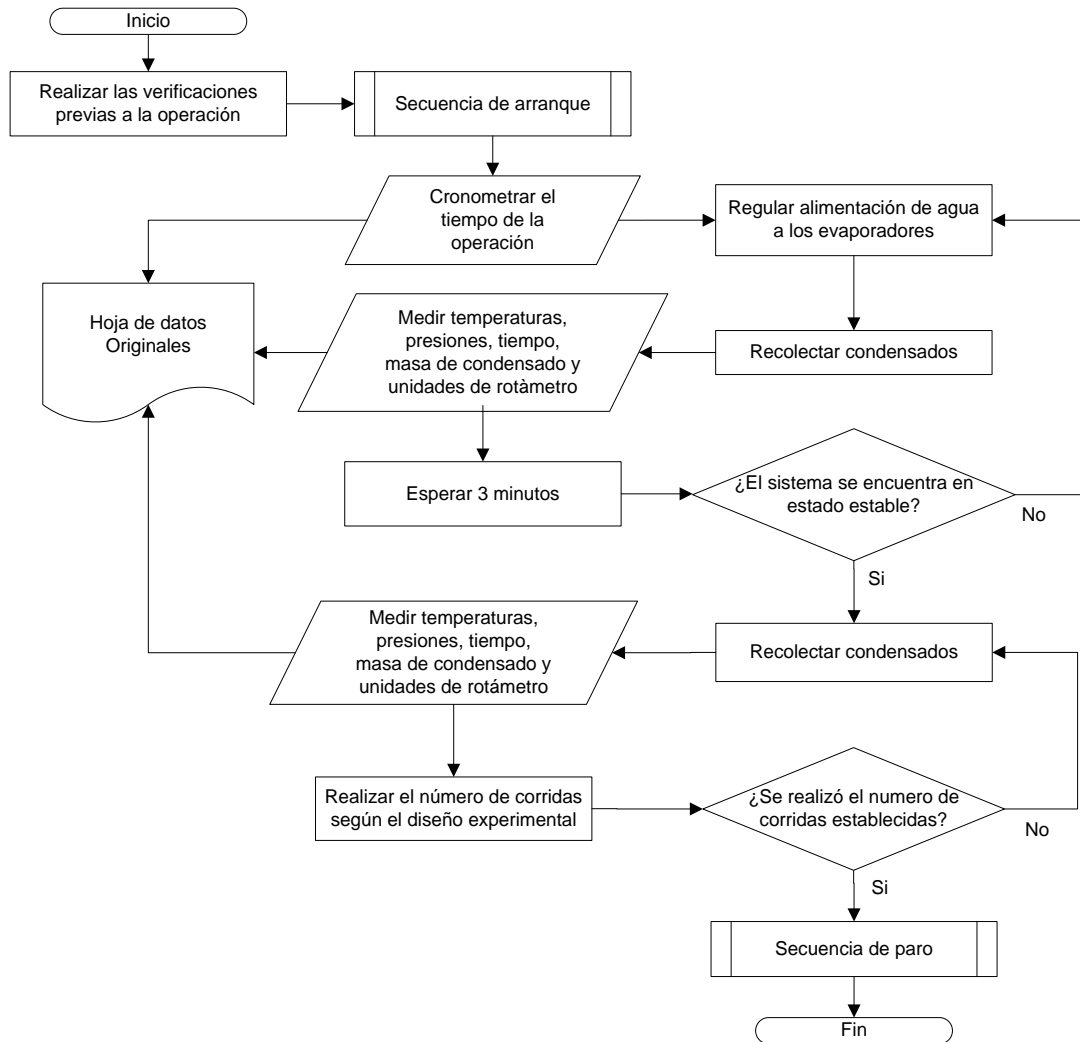
Objetivos

- Determinar el comportamiento de la operación en estado inestable y estable de la operación.
- Realizar un balance de masa y energía a la unidad en estado estacionario
- Calcular capacidad del evaporador y la economía de vapor.
- Calcular el coeficiente de transferencia de calor para cada efecto y para la operación completa.
- Calcular las pérdidas del calor en el sistema.

Procedimiento

- A. Realizar las verificaciones previas a la operación.
- B. Iniciar la secuencia de arranque.
- C. Cronometrar la operación al momento de iniciar la alimentación de vapor.
- D. Regular la alimentación de agua a los evaporadores.
- E. Recolectar condensados, medir unidades de rotámetro, temperaturas de los separadores y presiones de las calandrias a cada tres minutos.
- F. Esperar la ebullición y controlar la operación.
- G. Esperar que se estabilice el sistema.
- H. Recolectar condensado y medir temperaturas, presiones y unidades de rotámetro.
- I. Realizar el número de corridas según diseño experimental
- J. Iniciar secuencia de paro.

Figura 30. Diagrama del procedimiento de la Práctica B



Fuente: elaboración propia.

4.2.3. Práctica C

Título: práctica experimental de evaporación doble efecto al vacío en estado inestable y estable.

Objetivos

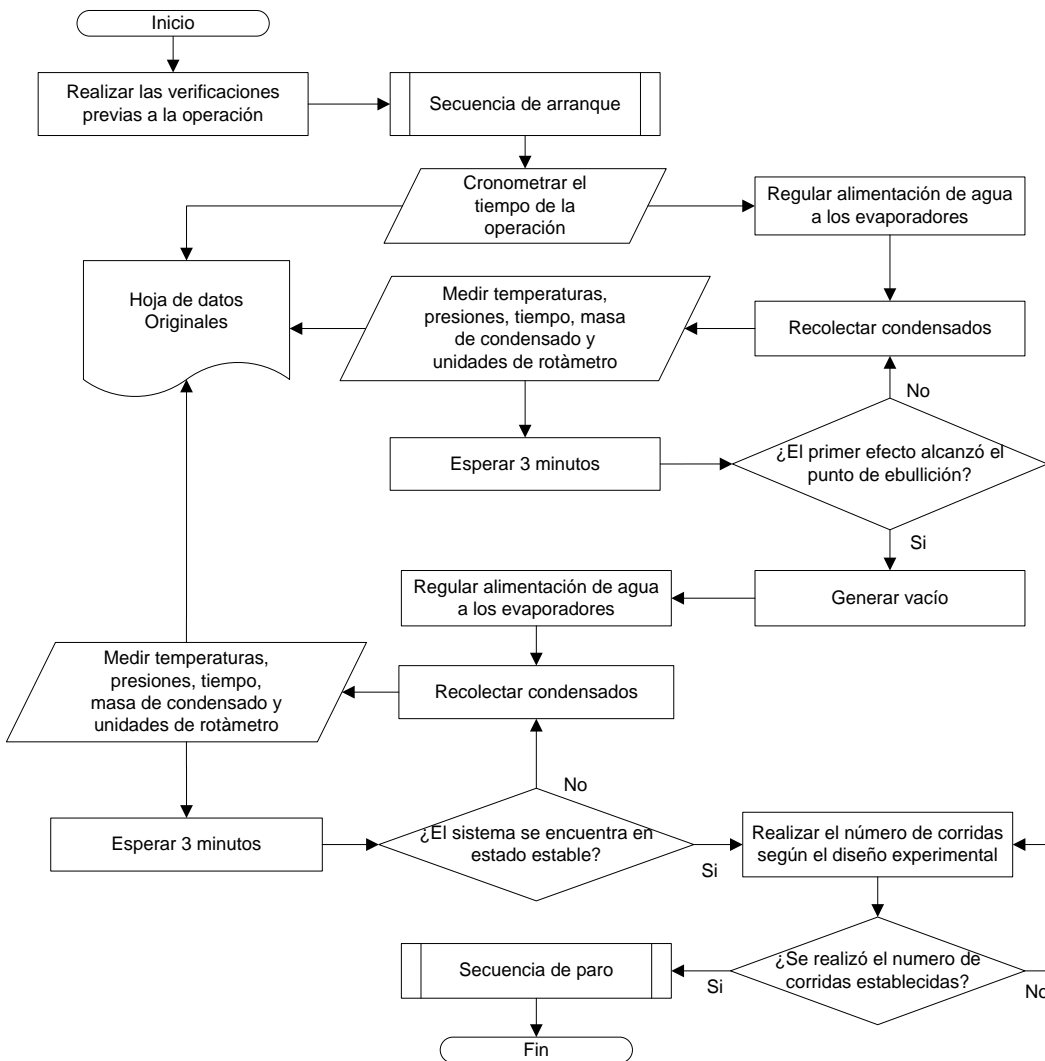
- Determinar el comportamiento de la operación en estado inestable y estable de la operación, generando presión de vacío en el sistema.
- Realizar un balance de masa y energía a la unidad en estado estacionario.
- Calcular capacidad del evaporador y la economía de vapor.
- Calcular el coeficiente de transferencia de calor para cada efecto y para la operación completa.
- Calcular las pérdidas del calor en el sistema.

Procedimiento

- A. Realizar las verificaciones previas a la operación.
- B. Iniciar la secuencia de arranque.
- C. Cronometrar la operación al momento de iniciar la alimentación de vapor.
- D. Regular la alimentación de agua a los evaporadores.
- E. Recolectar condensados, medir unidades de rotámetro, temperaturas de los separadores y presiones de las calandrias a cada tres minutos.
- F. Esperar la ebullición del primer efecto.
- G. Alimentar de agua al condensador barométrico para generar vacío.
- H. Esperar la ebullición del segundo efecto.
- I. Esperar que se estabilice el sistema.
- J. Recolectar condensado y medir temperaturas, presiones y unidades de rotámetro.

- K. Realizar el número de corridas según diseño experimental e
- L. Iniciar secuencia de paro.

Figura 31. Diagrama del procedimiento de la Práctica C



Fuente: elaboración propia.

4.3. Diseño experimental

A continuación se presenta el diseño experimental general para las prácticas propuestas. El diseño tiene como objetivo la obtención de datos experimentales significativos y planteamiento de conclusiones.

4.3.1. Descripción del problema

Para el planteamiento del diseño experimental, se establecieron los siguientes objetivos

- Comprender el funcionamiento del proceso de evaporación doble efecto a través del manejo y control del equipo de laboratorio, mediante gráficos que describan el comportamiento de la operación en estado inestable y estado estable.
- Realizar un balance de masa y energía al equipo de evaporación doble efecto en estado estacionario para caracterizar las variables de la operación y calcular la economía de vapor, la capacidad del evaporador, las pérdidas por radiación y el coeficiente de transferencia de calor.

4.3.2. Preguntas referentes a la investigación

- ¿Qué datos son necesarios para describir el desarrollo de la operación?

Se miden las variables del proceso en intervalos de tiempo previamente definidos, para ser graficados y poder observar su comportamiento. Se grafican las siguientes variables:

- Temperatura del primer efecto vs. Tiempo
- Temperatura del segundo efecto vs. Tiempo
- Presión de la calandria del primer efecto vs. Tiempo
- Presión de la calandria del segundo efecto vs. Tiempo.
- Flujo másico de vapor vivo vs. Tiempo
- Flujo másico del vapor producido del primer efecto vs. Tiempo
- Flujo másico del vapor producido del segundo efecto vs. Tiempo

- ¿Cómo se establece el estado estacionario en la operación?

Se establece cuando las variables del sistema se mantienen constantes durante un largo período de la operación.

- ¿Cuáles son los datos requeridos para determinar la economía de vapor?

Para realizar el cálculo de la economía de vapor es necesario conocer el flujo másico de vapor vivo que utiliza la unidad, el vapor generado por el primer efecto y el vapor que genera el segundo efecto.

- ¿Cómo se puede realizar el cálculo de las pérdidas por radiación en el sistema?

El cálculo se realiza a través del balance de masa y energía. Se debe tomar en cuenta el flujo másico de alimentación de agua, el flujo másico de vapor vivo y el vapor generado por los dos efectos, entalpías de evaporación y temperaturas del sistema.

- ¿Qué datos del equipo son necesarios conocer para realizar los cálculos?

Es necesario conocer el dimensionamiento de la calandria de cada evaporador para calcular el área de transferencia y la curva de calibración del rotámetro para conocer el flujo de alimentación de agua.

- ¿Cuáles son los datos requeridos para determinar el coeficiente de transferencia de calor?

Es necesario conocer el calor que se transfiere, el área de contacto para que se efectúe la transferencia de calor y diferencia de temperaturas entre el vapor de agua que se condensa y el punto de ebullición del líquido cuando la operación está en estado estable.

4.3.3. Justificación

Para lograr el cumplimiento de los objetivos planteados se realizará el proceso de evaporación doble efecto, del cual se obtendrán mediciones de temperatura de cada evaporador, presión de cada calandria, tiempo, presión de vacío, masa de condensado y flujo de alimentación de agua; de esta manera se podrá determinar el comportamiento de la operación en estado inestable y estable.

Posteriormente se realizarán un número de observaciones establecidas en estado estacionario para obtener los datos necesarios para la realización del balance de masa y energía para poder calcular la economía de vapor, la capacidad del evaporador, las pérdidas por radiación y los coeficientes de transferencia de calor.

4.3.4. Descripción de variables involucradas

Se presentan la descripción de las variables experimentales para la operación en estado estable e inestable, así como los factores perturbadores y las variables a manipular en la práctica.

Tabla VI. Descripción de variables experimentales en estado inestable

No	Variable	Dimensional	Factor potencial del diseño	
			constantes	variables
Análisis del Equipo				
1	Tiempo de operación	min		X
2	Masa del condensado de vapor vivo	kg		X
3	Tiempo de parámetro no 2	S		X
4	Temperatura del primer efecto	°F		X
5	Presión de calandria del primer efecto	psi		X
6	Masa del condensado del primer efecto	kg		X
7	Tiempo de parámetro no 6	S		X

Continuación de la tabla VI.

8	Temperatura del segundo efecto	kg		X
9	Presión de calandria del segundo efecto	psi		X

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Descripción de variables experimentales en estado estable**

No	Variable	Dimensional	Factor potencial del diseño	
			constantes	variables
Análisis del Equipo				
1	Presión del vapor de entrada	psi	X	
2	Unidades de rotámetro	-	X	
3	Masa del condensado de vapor vivo	kg		X
4	Tiempo de parámetro no 3	S		X
5	Temperatura del primer efecto	°F	X	
6	Presión de calandria del primer efecto	psi	X	
7	Masa del condensado del primer efecto	kg		X

Continuación de la tabla VII.

8	Tiempo de parámetro no 7	S		X
9	Temperatura del segundo efecto	°F	X	
10	Presión de calandria del segundo efecto	psi	X	
11	Presión de Vacío	inHg		X

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Factores perturbadores**

No	Variable	Dimensional	Factores perturbadores	
			controlables	De ruido
Análisis de Ambiente externo				
1	Temperatura ambiente	°C		X
2	Presión atmosférica	atm		X
3	Humedad	%		X

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Definición de variables a manipular en la práctica**

No	Variable	Dimensional	Rango de Variación
1	Tiempo de operación	Min	1 – 120

Continuación de la tabla IX.

2	Tiempos de parámetro	S	10 – 30
3	Unidades de rotámetro	-	0 – 150
4	Presión de vacío	inHg	5 – 15

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Variables de respuesta**

No	Variable	Dimensional	Rango de Variación
1	Temperatura	°F	77 – 210
2	Presión	Psi	4 – 11
3	Unidades de rotámetro	-	0 – 150
4	Presión de vacío	inHg	5 – 15

Fuente: elaboración propia.

La instrumentación necesaria para determinar las variables de respuesta son las siguientes: manómetro, rotámetro, vacuómetro, termómetro, cronómetro y balanza.

4.3.5. Elección del diseño experimental

Se aplicó el procedimiento estándar para las mediciones por corridas aleatorias, ya que no se están aplicando procedimientos especiales en los evaporadores.

Diseño de control de tratamiento

El análisis se maneja en base al evaporador de doble efecto. Los datos de interés en la práctica, se obtienen a partir de las mediciones de presiones de las calandrias y presión de vacío, temperaturas en los cuerpos de los evaporadores y el flujo másico de condensado en un tiempo específico para la determinación de los balances de masa y energía.

Diseño de control de error

De las mediciones realizadas experimentalmente, se ejecutaran varias corridas para obtener una mayor precisión de datos, minimizando así los posibles errores aleatorios causados por el experimentador; a estos datos se les dará un grado de confiabilidad para tratar su posible error por desviación. Se realizará un análisis de error por incertidumbre causado por las incertezas de los instrumentos de medición de presión, tiempo y temperatura.

Tablas de tratamiento del diseño experimental

Se definieron las tablas de tratamientos de las variables según el estado del sistema. En la tabla XI se muestra la toma de datos de la masa obtenida en un tiempo determinado en cada corrida cuando el sistema opera en estado inestable. En la tabla XII se muestra la toma de datos para las variables de control del sistema como lo son la presión, temperatura e unidades del rotámetro. El tratamiento de variables en estado estacionario se observan en tablas XIII y XIV.

Tabla XI. Valores de masa y tiempos de parámetro en función del tiempo de operación

		Valores de masa y tiempo del parámetro de masa					
		m_s	t_s	m_1	t_1	m_2	t_2
Tiempo de operación	$t_{op,1}$	$m_{s,1}$	$t_{s,1}$	$m_{1,1}$	$t_{1,1}$	$m_{2,1}$	$t_{2,1}$
	$t_{op,2}$	$m_{s,2}$	$t_{s,2}$	$m_{1,2}$	$t_{1,2}$	$m_{2,2}$	$t_{2,2}$
	$t_{op,3}$	$m_{s,3}$	$t_{s,3}$	$m_{1,3}$	$t_{1,3}$	$m_{2,3}$	$t_{2,3}$
	$t_{op,4}$	$m_{s,4}$	$t_{s,4}$	$m_{1,4}$	$t_{1,4}$	$m_{2,4}$	$t_{2,4}$
	$t_{op,5}$	$m_{s,5}$	$t_{s,5}$	$m_{1,5}$	$t_{1,5}$	$m_{2,5}$	$t_{2,5}$
	$t_{op,6}$	$m_{s,6}$	$t_{s,6}$	$m_{1,6}$	$t_{1,6}$	$m_{2,6}$	$t_{2,6}$
	$t_{op,7}$	$m_{s,7}$	$t_{s,7}$	$m_{1,7}$	$t_{1,7}$	$m_{2,7}$	$t_{2,7}$
	$t_{op,8}$	$m_{s,8}$	$t_{s,8}$	$m_{1,8}$	$t_{1,8}$	$m_{2,8}$	$t_{2,8}$
	$t_{op,9}$	$m_{s,9}$	$t_{s,9}$	$m_{1,9}$	$t_{1,9}$	$m_{2,9}$	$t_{2,9}$
	$t_{op,10}$	$m_{s,10}$	$t_{s,10}$	$m_{1,10}$	$t_{1,10}$	$m_{2,10}$	$t_{2,10}$
	$t_{op,11}$	$m_{s,11}$	$t_{s,11}$	$m_{1,11}$	$t_{1,11}$	$m_{2,11}$	$t_{2,11}$
	$t_{op,12}$	$m_{s,12}$	$t_{s,12}$	$m_{1,12}$	$t_{1,12}$	$m_{2,12}$	$t_{2,12}$
	$t_{op,13}$	$m_{s,13}$	$t_{s,13}$	$m_{1,13}$	$t_{1,13}$	$m_{2,13}$	$t_{2,13}$
	$t_{op,14}$	$m_{s,14}$	$t_{s,14}$	$m_{1,14}$	$t_{1,14}$	$m_{2,14}$	$t_{2,14}$
	$t_{op,15}$	$m_{s,15}$	$t_{s,15}$	$m_{1,15}$	$t_{1,15}$	$m_{2,15}$	$t_{2,15}$

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. Valores de unidades de rotámetro, presión y temperatura en función del tiempo de operación

		Valores de unidades de rotámetro, presión y temperatura				
		<i>UnRot</i>	<i>p_s</i>	<i>p₁</i>	<i>T₁</i>	<i>T₂</i>
Tiempo de operación	<i>t_{op,1}</i>	<i>UnRot₁</i>	<i>p_{s,1}</i>	<i>p_{1,1}</i>	<i>T_{1,1}</i>	<i>T_{2,1}</i>
	<i>t_{op,2}</i>	<i>UnRot₂</i>	<i>p_{s,2}</i>	<i>p_{1,2}</i>	<i>T_{1,2}</i>	<i>T_{2,2}</i>
	<i>t_{op,3}</i>	<i>UnRot₃</i>	<i>p_{s,3}</i>	<i>p_{1,3}</i>	<i>T_{1,3}</i>	<i>T_{2,3}</i>
	<i>t_{op,4}</i>	<i>UnRot₄</i>	<i>p_{s,4}</i>	<i>p_{1,4}</i>	<i>T_{1,4}</i>	<i>T_{2,4}</i>
	<i>t_{op,5}</i>	<i>UnRot₅</i>	<i>p_{s,5}</i>	<i>p_{1,5}</i>	<i>T_{1,5}</i>	<i>T_{2,5}</i>
	<i>t_{op,6}</i>	<i>UnRot₆</i>	<i>p_{s,6}</i>	<i>p_{1,6}</i>	<i>T_{1,6}</i>	<i>T_{2,6}</i>
	<i>t_{op,7}</i>	<i>UnRot₇</i>	<i>p_{s,7}</i>	<i>p_{1,7}</i>	<i>T_{1,7}</i>	<i>T_{2,7}</i>
	<i>t_{op,8}</i>	<i>UnRot₈</i>	<i>p_{s,8}</i>	<i>p_{1,8}</i>	<i>T_{1,8}</i>	<i>T_{2,8}</i>
	<i>t_{op,9}</i>	<i>UnRot₉</i>	<i>p_{s,9}</i>	<i>p_{1,9}</i>	<i>T_{1,9}</i>	<i>T_{2,9}</i>
	<i>t_{op,10}</i>	<i>UnRot₁₀</i>	<i>p_{s,10}</i>	<i>p_{1,10}</i>	<i>T_{1,10}</i>	<i>T_{2,10}</i>
	<i>t_{op,11}</i>	<i>UnRot₁₁</i>	<i>p_{s,11}</i>	<i>p_{1,11}</i>	<i>T_{1,11}</i>	<i>T_{2,11}</i>
	<i>t_{op,12}</i>	<i>UnRot₁₂</i>	<i>p_{s,12}</i>	<i>p_{1,12}</i>	<i>T_{1,12}</i>	<i>T_{2,12}</i>
	<i>t_{op,13}</i>	<i>UnRot₁₃</i>	<i>p_{s,13}</i>	<i>p_{1,13}</i>	<i>T_{1,13}</i>	<i>T_{2,13}</i>
	<i>t_{op,14}</i>	<i>UnRot₁₄</i>	<i>p_{s,14}</i>	<i>p_{1,14}</i>	<i>T_{1,14}</i>	<i>T_{2,14}</i>
	<i>t_{op,15}</i>	<i>UnRot₁₅</i>	<i>p_{s,15}</i>	<i>p_{1,15}</i>	<i>T_{1,15}</i>	<i>T_{2,15}</i>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. Valores de flujos másicos del sistema

		W_s		W_1		W_2	
		m_s	t_s	m_1	t_1	m_2	t_2
W_f	UnRot₁	$m_{s,1}$	$t_{s,1}$	$m_{1,1}$	$t_{1,1}$	$m_{2,1}$	$t_{2,1}$
	UnRot₂	$m_{s,2}$	$t_{s,2}$	$m_{1,2}$	$t_{1,2}$	$m_{2,2}$	$t_{2,2}$
	UnRot₃	$m_{s,3}$	$t_{s,3}$	$m_{1,3}$	$t_{1,3}$	$m_{2,3}$	$t_{2,3}$
	UnRot₄	$m_{s,4}$	$t_{s,4}$	$m_{1,4}$	$t_{1,4}$	$m_{2,4}$	$t_{2,4}$
	UnRot₅	$m_{s,5}$	$t_{s,5}$	$m_{1,5}$	$t_{1,5}$	$m_{2,5}$	$t_{2,5}$

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. Valores de temperaturas y presiones del sistema

		p_s	p_1	T_1	T_2	P_v
		W_f	UnRot₁	$p_{s,1}$	$p_{1,1}$	$T_{1,1}$
UnRot₂	$p_{s,2}$		$p_{1,2}$	$T_{1,2}$	$T_{1,2}$	$P_{v,2}$
UnRot₃	$p_{s,3}$		$p_{1,3}$	$T_{1,3}$	$T_{1,3}$	$P_{v,3}$
UnRot₄	$p_{s,4}$		$p_{1,4}$	$T_{1,4}$	$T_{1,4}$	$P_{v,4}$
UnRot₅	$p_{s,5}$		$p_{1,5}$	$T_{1,5}$	$T_{1,5}$	$P_{v,5}$

Fuente: elaboración propia.

4.3.6. Planteamiento de hipótesis

Se plantearon las hipótesis en relación a la economía de vapor que se logra obtener en un evaporador doble efecto.

Hipótesis científica

Existe una diferencia significativa entre la economía de vapor que se produce en un evaporador de efecto doble con respecto a la que se produce en un evaporador de efecto simple, siendo ésta última menor en comparación de la primera.

Hipótesis estadística

- Hipótesis nula (H_0): existe una diferencia significativa entre la economía de vapor que se produce en un evaporador de múltiple efecto con respecto a la producida por un evaporador de efecto simple.
- Hipótesis alternativa (H_a): no existe diferencia significativa entre la economía de vapor que se produce en un evaporador de múltiple efecto respecto a la que se produce en un evaporador de efecto simple.

4.3.7. Número de corridas a realizar

Se desea que en la obtención de los resultados, al menos el 95% de los datos sean aceptados como correctos o certeros, por lo que la probabilidad de fracaso es del 5%, la confiabilidad es de 1,96 y un error estimado de 20%.

$$N = \frac{Z_{\alpha/2}^2 PQ}{E^2} \quad \text{Ecuación 7}$$

Dónde:

N = Número de repeticiones

$Z_{\alpha/2}$ = Confiabilidad

P = Probabilidad de éxito

Q = Probabilidad de fracaso

E = Error estimado

Sustituyendo datos de la ecuación 7 con los datos antes mencionados se obtiene lo siguiente:

$$N = \frac{(1,96)^2 * 0,95 * 0,05}{0,20^2}$$
$$N = 4,59 \approx 5$$

Son necesarias 5 réplicas en el experimento.

4.3.8. Ecuaciones para la obtención de resultados

A. Cálculo del flujo másico de condensado

$$W = \frac{m}{t} \quad \text{Ecuación 8}$$

Dónde:

W = Flujo másico de condensación de vapor vivo, (kg/s)

m = Masa de condensado de vapor vivo, (kg)

t = Tiempo de condensación de vapor vivo, (s)

B. Determinación de la economía de vapor

$$e = \frac{W_1 + W_2}{W_s} \quad \text{Ecuación 9}$$

Dónde:

e = Economía de vapor

W_1 = Flujo másico de condensación del primer efecto, (Kg/s)

W_2 = Flujo másico de condensación del segundo efecto, (Kg/s)

W_s = Flujo másico de condensación de vapor vivo, (kg/s)

C. Determinación de la capacidad de evaporación del primer efecto

$$q_1 = W_s(H_s - h_s) = W_s\lambda_s \quad \text{Ecuación 10}$$

Dónde:

q_1 = Capacidad de evaporación del primer efecto, (kJ/s)

W_s = Flujo másico de condensación de vapor vivo, (kg/s)

H_s = Entalpía específica del vapor a la presión de la calandria del primer efecto (kJ/kg)

h_s = Entalpía específica del líquido saturado a la presión de la calandria del primer efecto (kJ/kg)

λ_s = Calor latente de vapor vivo, (kJ/kg)

D. Determinación de la capacidad de evaporación del segundo efecto

$$q_2 = W_1(H_1 - h_1) = W_1\lambda_1 \quad \text{Ecuación 11}$$

Dónde:

q_2 = Capacidad de evaporación del segundo efecto, (kJ/s)

W_1 = Flujo másico de condensación del primer efecto, (kg/s)

H_1 = Entalpía específica del vapor a la presión de la calandria del segundo efecto (kJ/kg)

h_1 = Entalpía específica del líquido saturado a la presión de la calandria del segundo efecto (kJ/kg)

λ_1 = Calor latente de vapor del primer efecto, (kJ/kg)

E. Cálculo del área de transferencia de calor

$$A = 2\pi dLN \quad \text{Ecuación 12}$$

Dónde:

A = Área de transferencia de calor, (m²)

d = Diámetro externo del tubo, (m)

L = Longitud de tubo, (m)

N = Número de tubos.

F. Determinación del coeficiente de transferencia de calor del primer efecto

$$U_1 = \frac{q_1}{A(T_s - T_1)} \quad \text{Ecuación 13}$$

Dónde:

U_1 = Coeficiente de transferencia de calor del primer efecto, (kW/m² °C)

q_1 = Capacidad de evaporación del primer efecto, (kJ/s)

A = Área de transferencia de calor, (m²)

T_s = Temperatura de saturación del vapor vivo, (°C)

T_1 = Temperatura de ebullición del agua en el primer efecto, (°C)

G. Determinación del coeficiente de transferencia de calor del segundo efecto

$$U_2 = \frac{q_2}{A(T_1 - T_2)} \quad \text{Ecuación 14}$$

Dónde:

U_2 = Coeficiente de transferencia de calor del segundo efecto, (kW/m² °C)

q_2 = Capacidad de evaporación del segundo efecto, (kJ/s)

A = Área de transferencia de calor, (m²)

T_1 = Temperatura de ebullición del agua en el primer efecto, (°C)

T_2 = Temperatura de ebullición del agua en el segundo efecto, (°C)

4.4. Balances de masa y energía

Se realizó el balance de masa y energía del evaporador en dos modalidades diferentes:

- El balance del evaporador operando con el condensador de superficie el cual aplica para el desarrollo de las prácticas A y B.
- El balance del evaporador operando con el condensador barométrico el cual aplica para el desarrollo de la práctica C.

Balance de masa del primer efecto

De la ley de la conservación de la materia:

$$W_{entrada} = W_{salida} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$W_s + W_{f1} = W_s + W_1$$

$$W_{f1} = W_1 \quad \text{Ecuación 16}$$

Balance de masa del segundo efecto

$$W_{entrada} = W_{salida}$$

$$W_1 + W_{f2} = W_1 + W_2$$

$$W_{f2} = W_2 \quad \text{Ecuación 17}$$

Balance de masa general del evaporador doble efecto:

$$W_{entrada} = W_{salida}$$

$$W_s + W_f + W_{c2} + W_{c1} = W_s + W_1 + W_2 + W_{c2} + W_{c1}$$

$$W_f = W_1 + W_2 \quad \text{Ecuación 18}$$

Balance de energía del primer efecto:

De la ley de la conservación de la energía:

$$E_e = E_s \quad \text{Ecuación 19}$$

Se considera el balance de energía por el lado de vapor vivo:

$$W_s H_s = W_s h_s + q_1$$

$$q_1 = W_s H_s - W_s h_s = W_s \lambda_s$$

Donde q_1 es el calor cedido por el vapor vivo al líquido en ebullición y λ_s es el calor latente del vapor vivo. Partiendo de la ecuación 19 se hace el balance de energía por el lado del líquido:

$$m_{f1} h_{f1} + q_1 = m_1 H_1$$

Donde q_1 es el calor ganado por el líquido en ebullición del vapor vivo. Si se establece T_1 como temperatura base, la entalpía H_1 pasa a ser el calor latente λ_1 del líquido evaporado del primer efecto y h_f puede ser expresada en términos de la capacidad calorífica del agua C_p :

$$m_{f1} \int_{T_1}^{T_{f1}} C_p dT + q_1 = m_1 \lambda_1$$

$$m_{f1} C_p (T_{f1} - T_1) + m_s \lambda_s = m_1 \lambda_1$$

Las temperaturas de alimentación de agua es la misma en todo el sistema y de la ecuación 16, se obtiene la ecuación del balance de energía del primer efecto:

$$W_s \lambda_s + W_1 C_p (T_f - T_1) = W_1 \lambda_1 \quad \text{Ecuación 20}$$

Balance de energía del segundo efecto:

La ecuación del balance de energía del segundo efecto se obtiene de la misma manera:

$$E_e = E_s \quad \text{Ecuación 19}$$

$$W_1 H_1 = W_1 h_1 + q_2$$

$$q_2 = W_1 H_1 - W_1 h_1 = W_1 \lambda_1$$

$$W_{f2} h_{f2} + q_2 = W_2 H_2$$

$$W_{f2} \int_{T_2}^{T_{f2}} C_p dT + q_2 = W_2 \lambda_2$$

$$W_{f2} C_p (T_{f2} - T_2) + W_1 \lambda_1 = W_2 \lambda_2$$

$$W_1 \lambda_1 + W_2 C_p (T_f - T_2) = W_2 \lambda_2 \quad \text{Ecuación 21}$$

Pérdidas por radiación en el primer efecto

De la ley de la conservación de la energía y ecuación 19:

$$E_e = E_s + E_p \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde E_p es la energía pérdida por radiación del sistema. De la ecuación 22 se obtiene:

$$W_s \lambda_s + W_1 C_p (T_f - T_1) = W_1 \lambda_1 + E_{p1}$$

$$E_{p1} = W_s \lambda_s + W_1 C_p (T_f - T_1) - W_1 \lambda_1 \quad \text{Ecuación 23}$$

Pérdidas por radiación en el segundo efecto

Las pérdidas por radiación en el segundo efecto se obtienen de la misma manera:

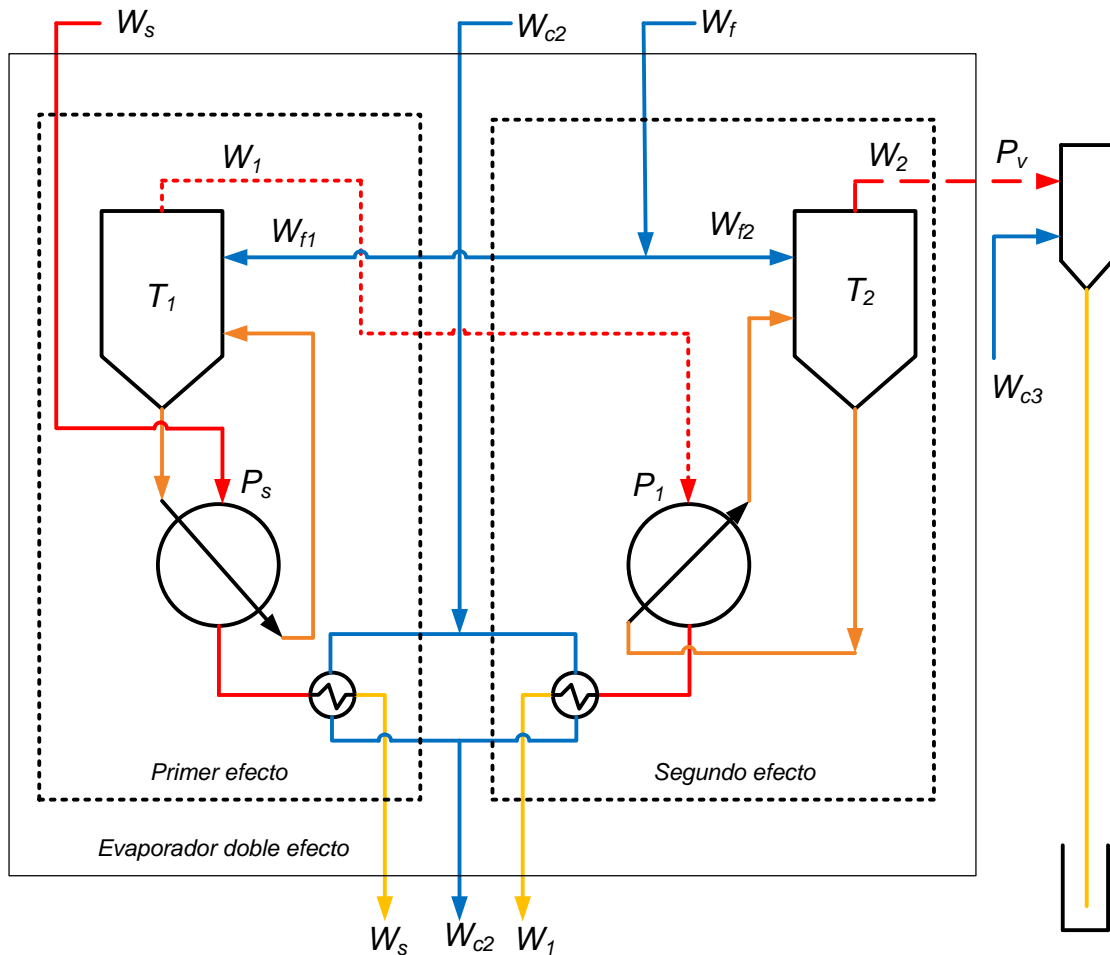
$$W_1 \lambda_1 + W_2 C_p (T_f - T_2) = W_2 \lambda_2 + E_{p2}$$

$$E_{p2} = W_1 \lambda_1 + W_2 C_p (T_f - T_2) - W_2 \lambda_2 \quad \text{Ecuación 24}$$

4.4.2. Balance del evaporador operando con el condensador barométrico

En la figura 33 se muestra un esquema del sistema de evaporación operando con el condensador barométrico. Posteriormente se presenta el desarrollo de los balances.

Figura 33. Esquema del sistema de evaporación doble efecto al vacío



Fuente: elaboración propia, con programa de Microsoft Visio.

Balance de masa del primer efecto

La ecuación del balance de masa para el primer efecto se obtiene de la manera en que se obtuvo en la sección 4.4.1.

$$W_{f1} = W_1 \quad \text{Ecuación 16}$$

Balance de masa del segundo efecto

De la ley de la conservación de la materia, se obtiene el balance para el segundo efecto:

$$\begin{aligned} W_{entrada} &= W_{salida} \\ W_1 + W_{f2} &= W_1 + W_2 \\ W_{f2} &= W_2 \end{aligned}$$

Se toma en cuenta el balance de materia de la tubería de alimentación de agua hacia los evaporadores:

$$\begin{aligned} W_f &= W_{f1} + W_{f2} \\ W_{f2} &= W_f - W_{f1} \\ W_2 &= W_f - W_{f1} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 25}$$

Balance de masa general del evaporador doble efecto:

De la ley de la conservación de la energía:

$$\begin{aligned} W_{entrada} &= W_{salida} \\ W_s + W_f + W_{c2} &= W_s + W_1 + W_2 + W_{c2} \end{aligned}$$

$$W_f = W_1 + W_2 \quad \text{Ecuación 18}$$

Balance de energía del primer efecto:

La ecuación del balance de energía para el primer efecto se obtiene de la manera en que se obtuvo en la sección 4.4.1.

$$\begin{aligned} W_s \lambda_s + W_{f1} C_p (T_{f1} - T_1) &= W_1 \lambda_1 \\ W_s \lambda_s + W_1 C_p (T_f - T_1) &= W_1 \lambda_1 \end{aligned} \quad \text{Ecuación 20}$$

Balance de energía del segundo efecto:

La ecuación del balance de energía del segundo efecto se obtiene de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} W_1 H_1 &= W_1 h_1 + q_2 \\ q_2 &= W_1 H_1 - W_1 h_1 = W_1 \lambda_1 \\ W_{f2} h_{f2} + q_2 &= W_2 H_2 \\ W_{f2} \int_{T_2}^{T_{f2}} C_p dT + q_2 &= W_2 \lambda_2 \\ W_{f2} C_p (T_{f2} - T_2) + W_1 \lambda_1 &= W_2 \lambda_2 \end{aligned}$$

Se toma en cuenta el balance de materia de la tubería de alimentación:

$$W_2 = W_f - W_{f1} \quad \text{Ecuación 25}$$

Se obtiene la ecuación del balance de energía del segundo efecto:

$$W_1 \lambda_1 + W_{f2} C_p (T_f - T_2) = (W_f - W_{f1}) \lambda_2$$

$$W_1\lambda_1 + W_2Cp(T_f - T_2) = (W_f - W_{f1})\lambda_2$$

$$W_1\lambda_1 + (W_f - W_1)Cp(T_f - T_2) = (W_f - W_1)\lambda_2 \quad \text{Ecuación 26}$$

Pérdidas por radiación en el primer efecto

Las pérdidas por radiación en el primer efecto se obtienen de la misma manera que la sección 4.4.1:

$$E_e = E_s + E_p \quad \text{Ecuación 22}$$

$$W_s\lambda_s + W_1Cp(T_f - T_1) = W_1\lambda_1 + E_{p1}$$

$$E_{p1} = W_s\lambda_s + W_1Cp(T_f - T_1) - W_1\lambda_1 \quad \text{Ecuación 23}$$

Pérdidas por radiación en el segundo efecto

Las pérdidas por radiación en el segundo efecto se obtienen de la misma manera que la sección 4.4.1

$$E_e = E_s + E_p$$

$$W_1\lambda_1 + W_2Cp(T_f - T_2) = W_2\lambda_2 + E_{p2}$$

$$E_{p2} = W_1\lambda_1 + W_2Cp(T_f - T_2) - W_2\lambda_2 \quad \text{Ecuación 24}$$

$$E_{p2} = W_1\lambda_1 + (W_f - W_1)Cp(T_f - T_2) - (W_f - W_1)\lambda_2 \quad \text{Ecuación 27}$$

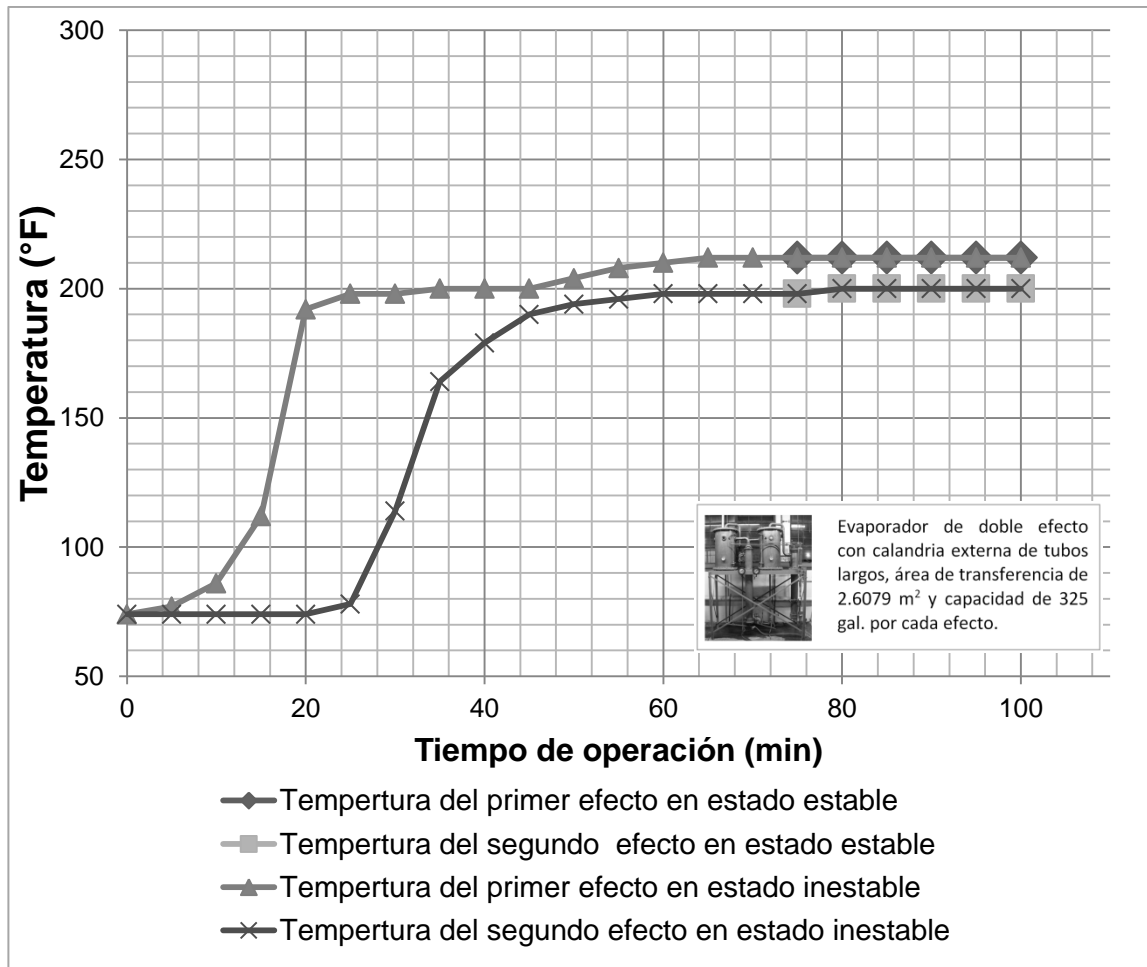
4.5. Resultados experimentales de la práctica B

Se presentan los resultados del evaporador operando el segundo efecto con el condensador de superficie. Se muestra las graficas del desarrollo de la operación en estado inestable y los resultados en estado estable.

4.5.1. Gráficos del comportamiento de variables durante toda la operación de la práctica B

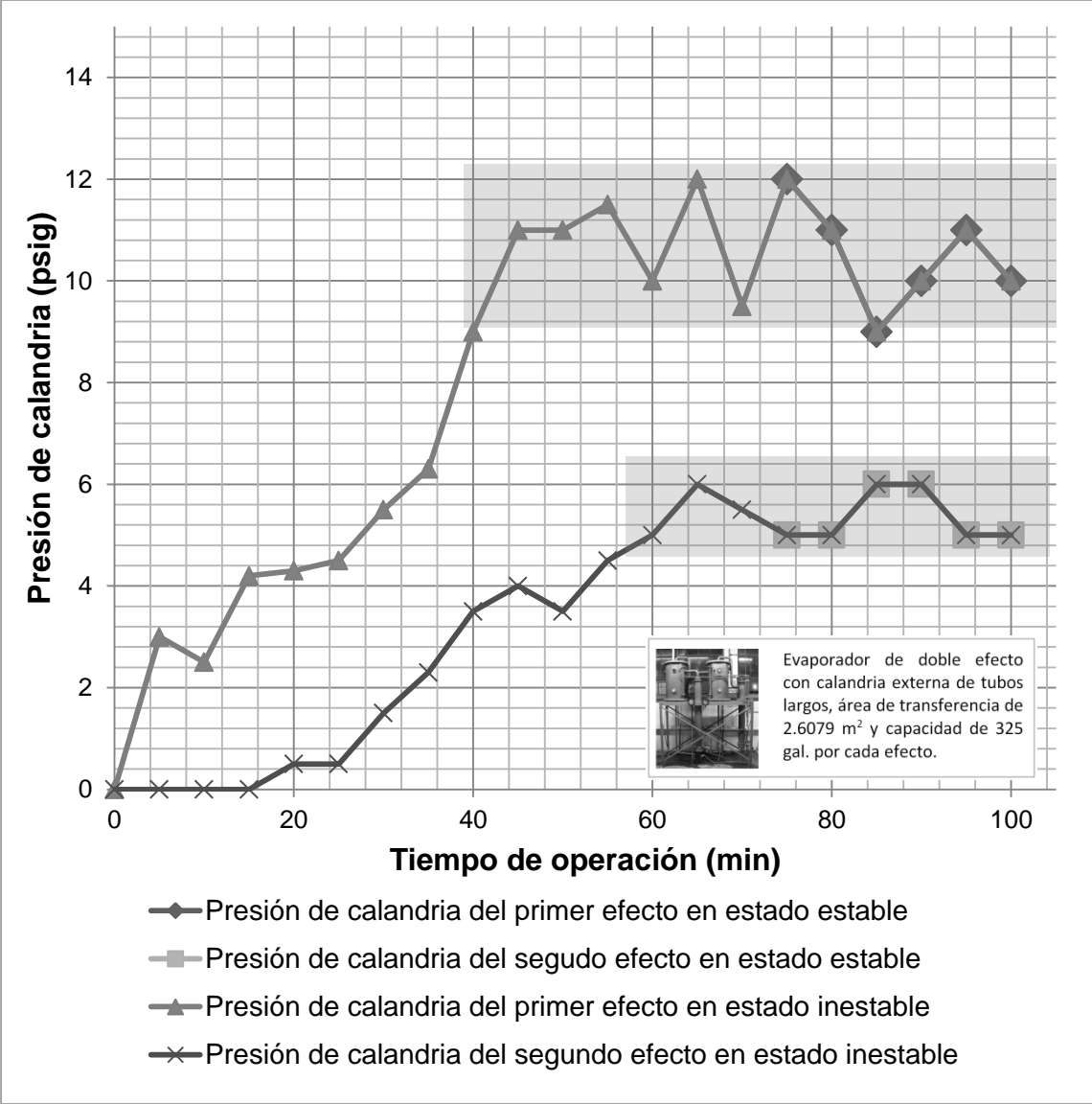
En la figura 34 – 37 se muestra los gráficos comparativos de la temperaturas, presiones del sistema de condensados obtenidos durante la realización de la practica B.

Figura 34. Comportamiento de las temperaturas del sistema de evaporación durante la operación en la práctica B



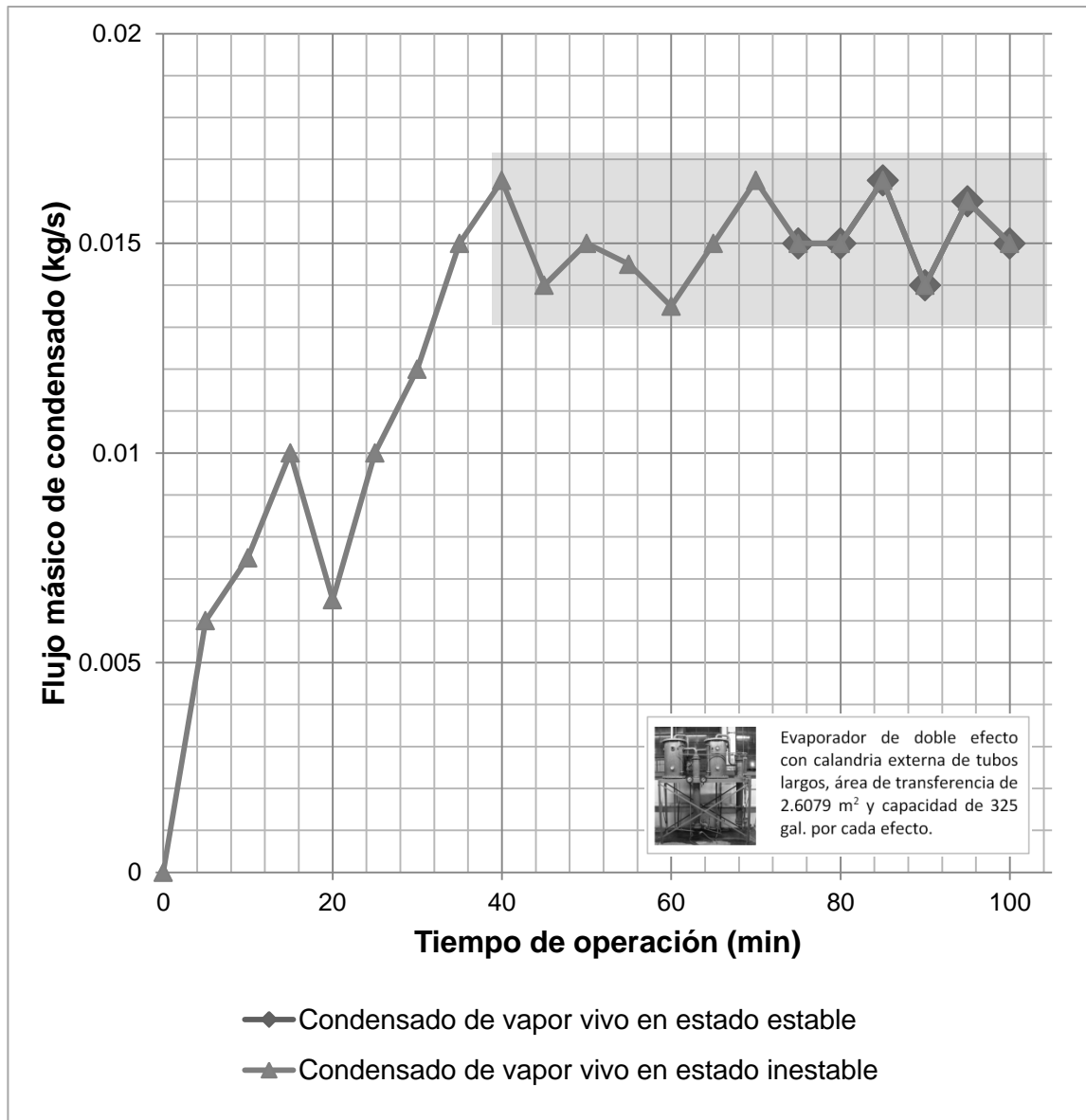
Fuente: elaboración propia.

Figura 35. Comportamiento de las presiones del sistema de evaporación durante la operación en la práctica B



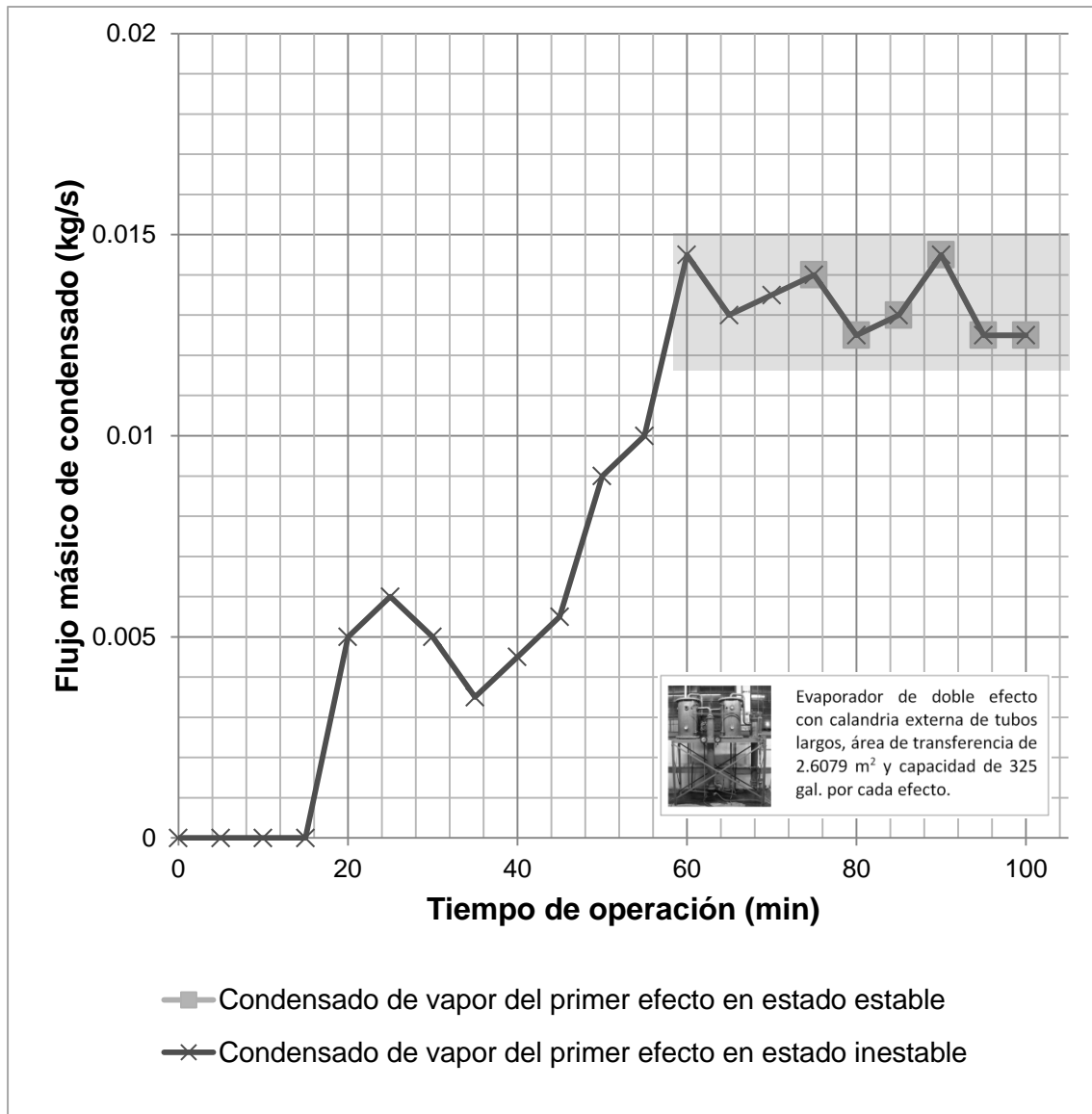
Fuente: elaboración propia.

Figura 36. **Comportamiento del condensado de vapor vivo durante la operación en la práctica B**



Fuente: elaboración propia.

Figura 37. **Comportamiento del condensado de vapor del primer efecto durante la operación en la práctica B**



Fuente: elaboración propia.

4.5.2. Resultados en estado estable de la práctica B

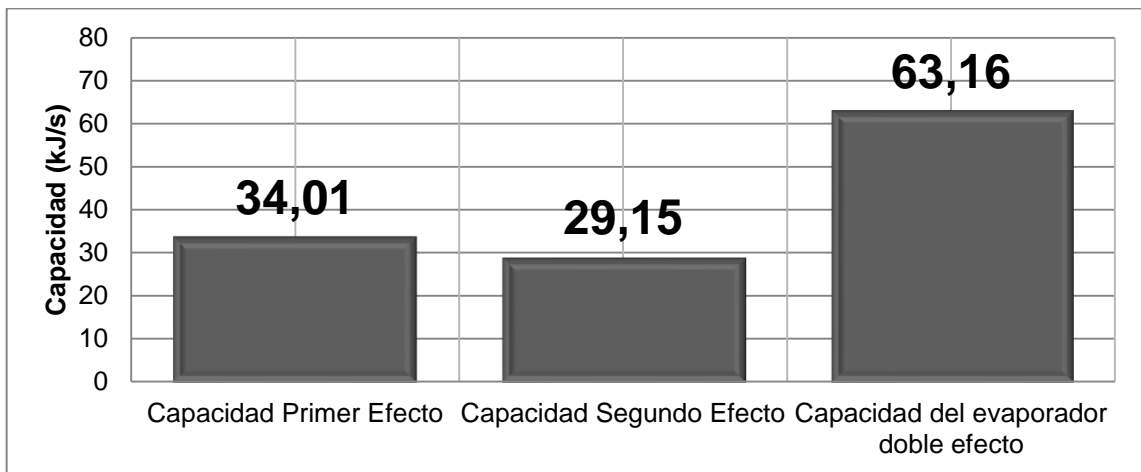
A continuación se presenta los resultados obtenidos de economía de vapor, capacidades de evaporación, coeficientes de transferencia de calor y pérdidas por radiación en la realización de la práctica B.

Tabla XV. **Flujos máxicos de condensados y economía de vapor obtenidos en la práctica B**

Variable		Símbolo	Resultado	
Consumo de vapor		W_s	55,08 kg/h	121,18 lb/h
Cantidad evaporada	Primer efecto	W_1	46,80 kg/h	102,96 lb/h
	Segundo efecto	W_2	42,48 kg/h	93,46 lb/h
Economía de vapor		e	1,630	

Fuente: elaboración propia.

Figura 38. **Capacidad del evaporador en la práctica B**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Coefficientes de transferencia de calor obtenidos en la práctica B**

Coeficiente de transferencia de calor	Símbolo	Resultado	
		kW/m ² °C	Btu/h ft ² °F
Primer efecto	U_1	1 049,23	184,77
Segundo efecto	U_2	962,81	169,51
Coeficiente medio del evaporador	U_{med}	1 004,34	176,86

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Perdidas de calor del evaporador por radiación en la Práctica B**

	Símbolo	Balance de energía	Tiempo de operación del evaporador	Pérdida de energía
		kJ/s	min	kW-h
Primer efecto	E_{p1}	3,12	100	4,99
Segundo efecto	E_{p2}	2,74	100	3,42
Pérdida total	E_p	5,86	100	9,37

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Resumen de resultados experimentales de la práctica B y rango de variables**

Variable	Unidades	Símbolo	Resultado	Rango de variable	
				Mínimo	Máximo
Economía de vapor	--	e	1,63	1,48	1,77
Capacidad de evaporación del primer efecto	kJ/s	q_1	34,01	32,1	35,9
Capacidad de evaporación del segundo efecto		q_2	23,14	27,4	30,8
Coeficiente de transferencia de calor del primer efecto	W/m ² °C	U_1	1 049,23	978	1 120,4
Coeficiente de transferencia de calor del segundo efecto		U_2	962,81	906,9	1 018,6

Fuente: elaboración propia.

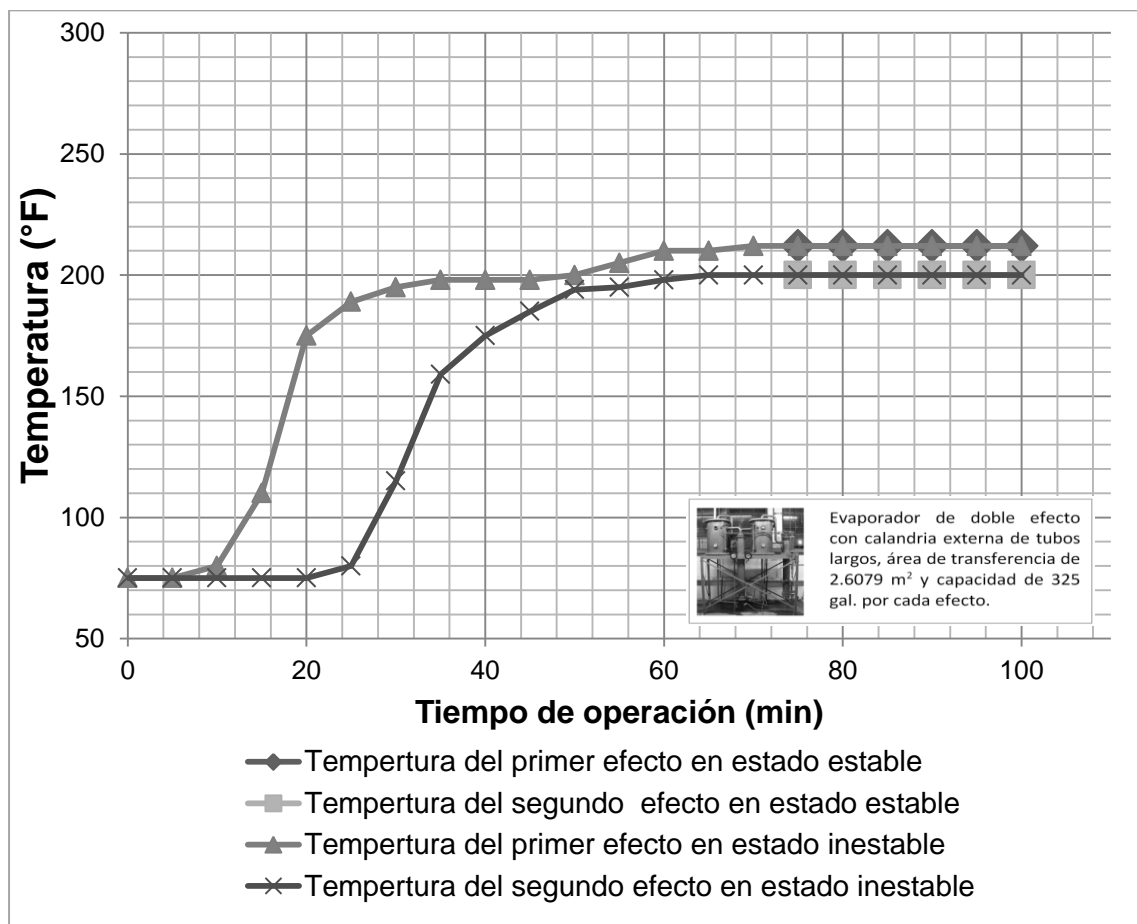
4.6. Resultados experimentales de la práctica C

Se presentan los resultados del evaporador operando el segundo efecto con el condensador barométrico. Se muestra las graficas del desarrollo de la operación en estado inestable y los resultados en estado estable.

4.6.1. Gráficos del comportamiento de las variables durante toda la operación en la práctica C

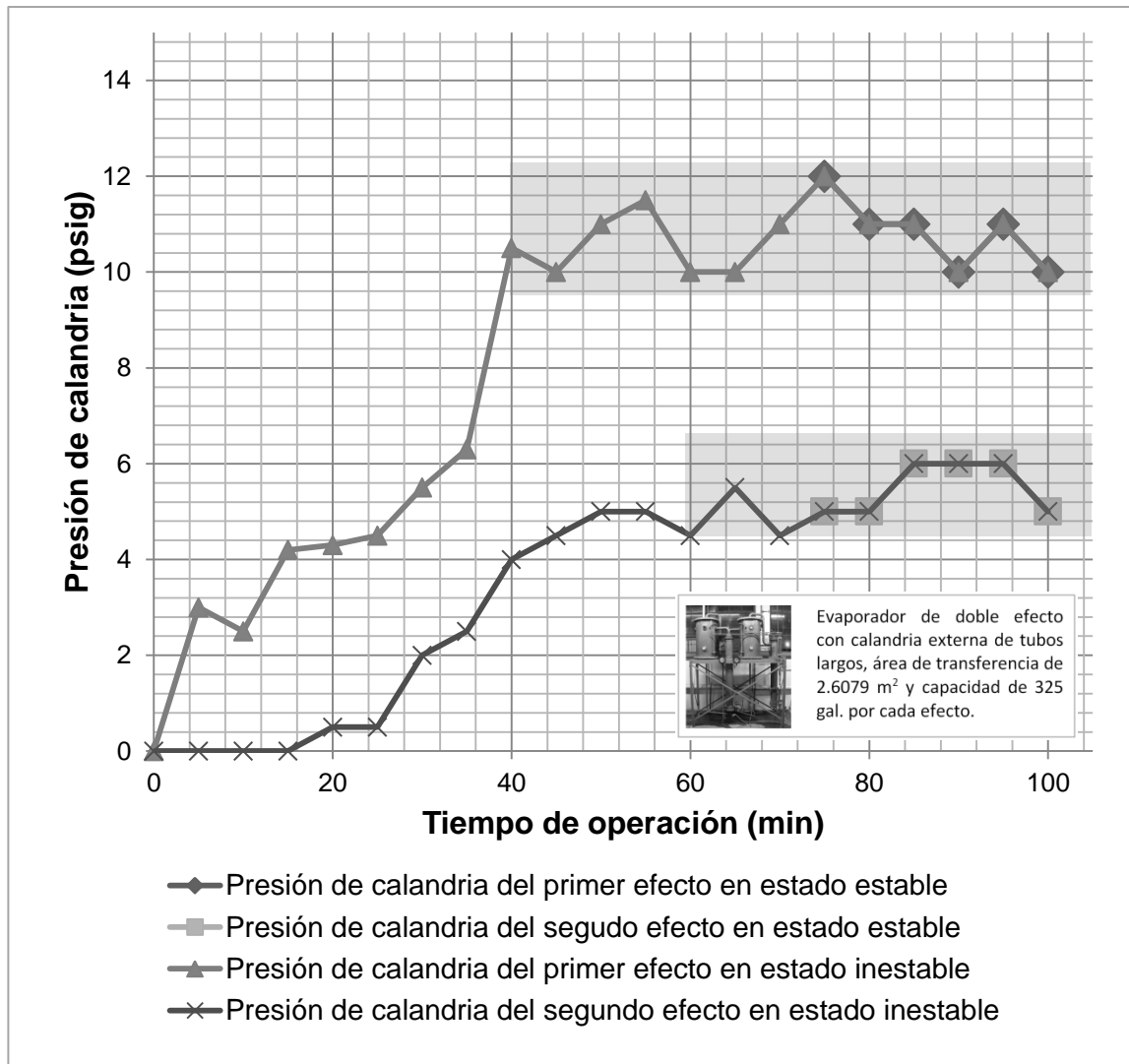
En la figura 39 – 42 se muestra los gráficos comparativos de la temperaturas, presiones del sistema de condensados obtenidos durante la realización de la practica C..

Figura 39. Comportamiento de las temperaturas del sistema de evaporación durante la operación en la práctica C



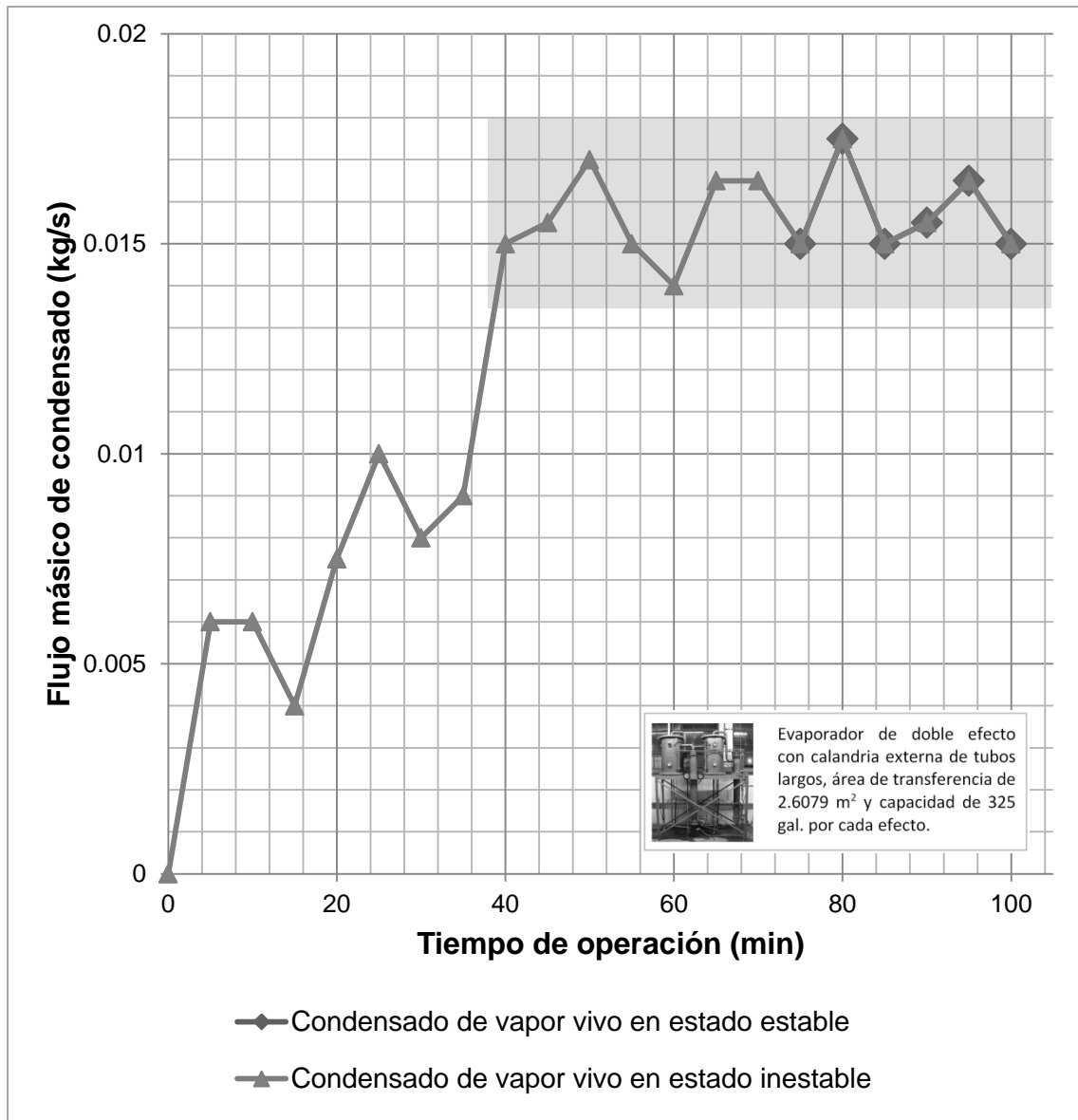
Fuente: elaboración propia.

Figura 40. **Comportamiento de las presiones del sistema de evaporación durante la operación en la práctica C**



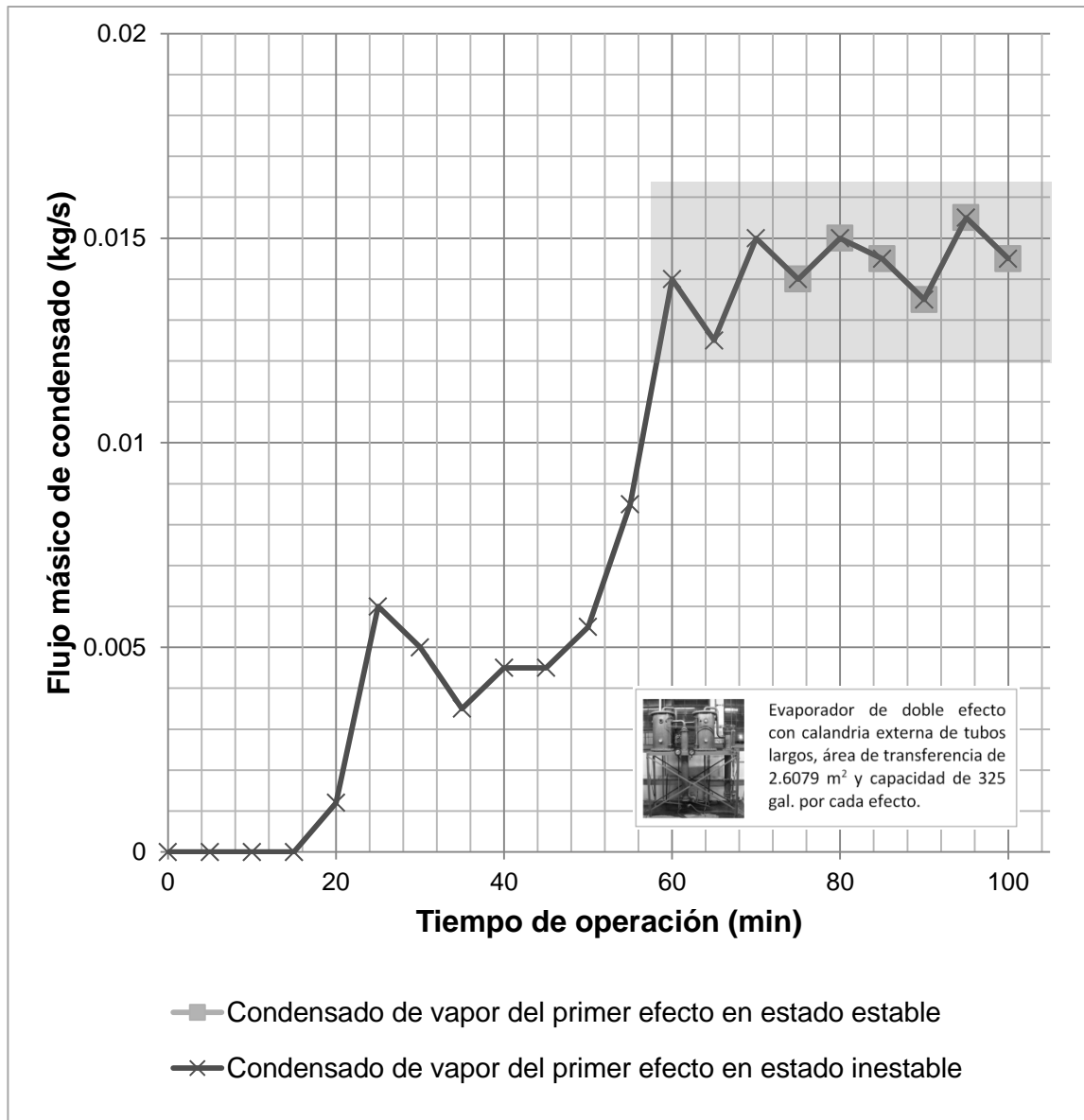
Fuente: elaboración propia.

Figura 41. **Comportamiento del condensado de vapor vivo durante la operación en la práctica C**



Fuente: elaboración propia.

Figura 42. **Comportamiento del condensado de vapor del primer efecto durante la operación en la práctica C**



Fuente: elaboración propia.

4.6.2. Resultados en estado estable de la práctica C

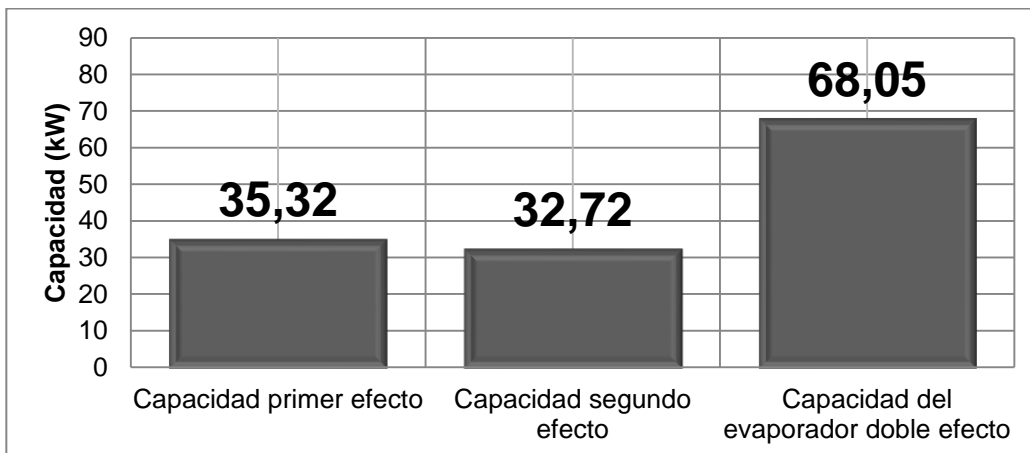
A continuación se presenta los resultados obtenidos de economía de vapor, capacidades de evaporación, coeficientes de transferencia de calor y pérdidas por radiación en la realización de la práctica C.

Tabla XIX. **Flujos máxicos de condensados y economía de vapor obtenidos en la práctica C**

Variable		Símbolo	Resultado	
Consumo de vapor		W_s	57,24 kg/h	125,92 lb/h
Alimentación de agua		W_f	89,64 kg/h	197,20 lb/h
Cantidad evaporada	Primer efecto	W_1	52,56 kg/h	115,63 lb/h
	Segundo efecto	W_2	37,08 kg/h	81,57 lb/h
Economía de vapor		e	1,57	

Fuente: elaboración propia.

Figura 43. **Capacidad del evaporador en la práctica C**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Coefficientes de transferencia de calor obtenidos en la práctica C**

Coeficiente de transferencia de calor	Símbolo	Resultado	
		kW/m ² °C	Btu/h ft ² °F
Primer efecto	U_1	1041,05	183,33
Segundo efecto	U_2	931,94	164,11
Coeficiente medio del evaporador	U_{med}	999,81	176,10

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Pérdidas de calor del evaporador por radiación en la práctica C**

	Símbolo	Balance de energía	Tiempo de operación del evaporador	Pérdida de energía
		kJ/s	min	kW-h
Primer efecto	E_{p1}	2,37	100	3,79
Segundo efecto	E_{p2}	3,63	100	5,81
Pérdida total	E_p	6,01	100	9,61

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. Resumen de resultados experimentales de la práctica C y rango de variables

Variable	Unidades	Símbolo	Resultado	Rango de variable	
				Mínimo	Máximo
Economía de vapor	--	e	1,56	1,55	1,57
Capacidad de evaporación del primer efecto	kJ/s	q_1	35,32	35.13	35,51
Capacidad de evaporación del segundo efecto		q_2	32,72	32.59	32,85
Coeficiente de transferencia de calor del primer efecto	W/m ² °C	U_1	1 041,05	1 036,3	1 045,8
Coeficiente de transferencia de calor del segundo efecto		U_2	931,94	925,3	938,6

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

5.1. Desarrollo y programación de la práctica

El Laboratorio de Ingeniería Química es un curso totalmente experimental de suma importancia en la formación del estudiante de ingeniería química, ya que permite aplicar fundamentos de las Operaciones Unitarias con el desarrollo de habilidades, actitudes y destrezas para realizar trabajos en equipo, operar procesos unitarios y hacer reportes técnicos.

El Laboratorio de Ingeniería Química es un curso totalmente experimental de suma importancia en la formación del estudiante de ingeniería química, ya que permite aplicar fundamentos de las Operaciones Unitarias con el desarrollo de habilidades, actitudes y destrezas para realizar trabajos en equipo, operar procesos unitarios y hacer reportes técnicos.

En este sentido, resultó importante implementar una práctica experimental de evaporación como un complemento de los conocimientos previos adquiridos por el estudiante en los cursos de Balance de Masa y Energía, Flujo de Fluidos, Transferencia de Calor y Termodinámica.

La práctica se desarrolló en un evaporador doble efecto (figura 12), el cual se encuentra instalado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química. El equipo se encontró deteriorado por lo que se procedió a realizar una revisión de los componentes y accesorios. Se realizaron pruebas para la detección de fugas, cambio de empaques, sustitución e instalación de válvulas y limpieza de visores y rotámetro. Paralelamente, se

inició con la caracterización del equipo y se realizó un diagrama de flujo (figura 21) con todos los componentes usando la nomenclatura de ingeniería química.

Se inició el desarrollo de la práctica con un estudio del equipo para establecer los objetivos que podían ser ejecutados por los estudiantes. Se tomó en cuenta el diagrama de flujo, las características y el diseño del equipo.

A diferencia del proceso de evaporación a nivel industrial, el equipo instalado no está diseñado para realizar una separación entre el soluto y solvente; más bien, su diseño es para experimentar con fines didácticos el proceso de evaporación a través de la ebullición de agua pura; es decir, que el fenómeno de transporte principal es la transferencia de calor.

Al establecer la transferencia de calor como fenómeno de transporte en el que se puede experimentar en el equipo, se dispuso que la práctica correspondía al curso de Laboratorio de Ingeniería Química Uno; dado a que su contenido programático está directamente relacionado con la transferencia de momento y calor.

Se procedió a elaborar los objetivos y se realizó una revisión didáctica junto al catedrático y el auxiliar del curso haciendo comparaciones con otros equipos de transferencia de calor. Se determinó que para una mejor comprensión y operación por parte del estudiante, era necesario que experimentara previamente con el Intercambiador de Concha y Tubos de Cobre. Esto se debe a que el curso es un laboratorio de iniciación en el manejo de este tipo de equipos, por lo que se requiere que el estudiante haya tenido una experiencia previa antes de experimentar con el evaporador.

La práctica se incluyó en el programa para realizarla durante el semestre académico tomando en cuenta la metodología, procedimiento de trabajo y cronograma del curso. Antes de iniciar el semestre se adecuó la calendarización de los grupos de trabajo, asignando a cada grupo una fecha para la realización de la práctica sin afectar el contenido del curso.

5.2. Implementación de la práctica

La práctica de evaporación doble efecto se implementó como una práctica extra al programa normal y se le dio un valor de primer examen parcial. Para ello, fue necesario variar los objetivos de la práctica de evaporación en función de la experiencia del grupo según las prácticas que habían realizado con anterioridad

En la ejecución de cada práctica durante el semestre, previo a la preparación, se dio una plática de introducción al grupo que le correspondía. A través de esta actividad, los alumnos conocieron el equipo y resolvieron dudas sobre la operación y el funcionamiento. En esta actividad, se observó que la mayoría de grupos realizaba un esquema del equipo para una mejor comprensión al hacer los balances. En la figura 32 y la figura 33 se presenta los esquemas del evaporador previo al balance.

Se hizo la preparación de la práctica por parte del estudiante a través de la realización del diseño experimental, diagramas de procedimiento gráfico experimental, procedimiento de cálculo y diagrama del equipo. Cada trabajo realizado por el estudiante se supervisó para resolver dudas y establecer un diseño experimental general de la práctica.

En la sección 4.3. se presenta un diseño experimental general de la práctica. Se plantea el problema a través de la definición dos de objetivos generales, preguntas de investigación y justificación. En la tabla VI se presentan las variables experimentales del sistema en estado inestable, la cual es utilizada como referencia para el planteamiento del tratamiento de datos de la tabla XI.

La descripción de variables en estado estable se hace a través de las tablas VII y VIII; y el tratamiento de datos en las tablas XII, XIII y XIV. Las variables de manipulación se observan en la tabla IX y las de respuesta en la tabla X.

El estudiante realizó la práctica la cual fue supervisada con la finalidad de observar procedimiento y hacer recomendaciones de precaución en el manejo del equipo. Todas las prácticas realizadas se efectuaron con normalidad y se hicieron anotaciones para incluirlas en el manual de operación

5.3. Manual de operación

El manual de operación se hizo de acuerdo al estudio preliminar del equipo, las recomendaciones hechas *in situ* por parte del investigador y las observaciones que hizo el estudiante al finalizar la realización de la práctica y el informe. La finalidad del manual es conservar un documento que describa el funcionamiento del equipo y establezca los procedimientos de la operación. Éste material beneficia al estudiante ya que es un apoyo previo a la preparación de la práctica.

El manual presenta una parte descriptiva del equipo la cual incluye los componentes del equipo y los insumos de la operación. La sección 4.1.1.1. describe los evaporadores y los tipos de condensador que se tienen en el sistema. Se hace referencia a las medidas del equipo, accesorios principales y equipos secundarios. En la figura 14 se observa un esquema con las medias de la calandria y en la figura 15 se observa las trampas de vapor e intercambiadores de tubos concéntricos como equipos secundarios. La sección 4.1.1.2. se presenta una breve descripción sobre manipulación de los insumos requeridos.

Adicionalmente, se presenta el diagrama de flujo elaborado en el estudio previo a la implementación de la práctica. La figura 21 es una representación detallada del sistema de evaporación, la cual incluye equipos, válvulas, instrumentación, servicios y flujos.

Como complemento de la parte descriptiva del equipo, en el Anexo 3 se muestra una serie de fotos en las cuales se puede observar la vista frontal, superior y lateral del equipo. Así mismo se cuenta con una serie de fotografías de los equipos y accesorios más importantes.

En la sección 4.1.3. y 4.1.4. se establecen los lineamientos para la seguridad de la persona que va operar equipo y asegurar el funcionamiento del sistema. En las partes finales del manual se establecen los procedimientos de arranque, control y paro de la operación. Estos procedimientos plantean una serie de pasos obligatorios para la operación, sin tomar en cuenta el procedimiento experimental de la práctica. En las figuras 24 y 28 se puede observar de manera gráfica los procedimientos de la secuencia de arranque y paro para una mejor comprensión.

5.4. Prácticas propuestas y resultados experimentales

Durante el semestre se realizaron cinco prácticas de las cuales se variaron los objetivos cada una. La propuesta de estos objetivos varió dependiendo de la experiencia del grupo en el laboratorio. Los objetivos que se plantearon en las primeras prácticas son los que se establecieron en la práctica A. En la figura 29 se presenta el procedimiento gráfico para cumplir los objetivos de la esa práctica.

La práctica B y C son las que se realizaron en las últimas fechas del calendario del curso. Estas prácticas abarcan la mayoría de objetivos planteados durante el semestre por lo que se presentan sus resultados en la sección 4.5. En la Apéndice 6 se muestran los datos obtenidos en el laboratorio de dos grupos de estudiantes a partir de los cuales se realizan los cálculos.

En las figuras 30 y 31 se plantean los procedimientos gráficos de las prácticas B y C. Ambas propuestas son similares en sus objetivos, sin embargo varía la manera en que se opera el evaporador. En la práctica B, el equipo opera en el segundo efecto a presión atmosférica, por lo que el condensado del se obtiene a través del condensador de superficie. En la práctica C, el equipo trabaja con el condensador barométrico, el cual genera vacío en el segundo efecto.

La variación de estas prácticas presenta dos maneras diferentes de hacer los balances de masa y energía. En las secciones 4.4 se esbozan las ecuaciones de ambos balances. Así mismo se obtienen las ecuaciones para calcular las pérdidas por radiación.

De la figura 34 a la 37 se presenta el comportamiento de las temperaturas, presiones y flujos másicos obtenidos en estado estable e inestable siguiendo el procedimiento experimental de la práctica B. En las figuras 34 y 35 se observa un comportamiento similar de temperatura y presión; sin embargo la primera variable que se estabiliza es la temperatura. En las gráficas de presiones se observan variaciones en un intervalo de 9 y 12 libras sobre pulgada cuadrada para el primer efecto a partir de los 40 minutos; y después de 60 minutos en el segundo efecto con variaciones oscilan entre 5 a 6 libras sobre pulgada cuadrada. En las gráficas 36 y 37 se observan que la tendencia es similar a las otras gráficas, de las cuales, la variación en estado estable se encuentra en el rango 0,013 a 0,017 kilogramos por segundo para el primer efecto y de 0,011 a 0,015 kilogramos por segundo en el efecto número dos.

De la figura 39 a la 42 se presentan los comportamientos de las mismas variables en estado inestable para la práctica C. Las gráficas de la práctica C, las cuales operan al vacío en el segundo efecto, muestran un comportamiento similar a la operación con el condensador de superficie.

En la tabla XV se muestran los flujos másicos obtenidos en la práctica B de los cuales se obtiene una economía de vapor de 1,63, el cual tiene un error de exactitud de 18,5% y un coeficiente de variación de 9,92% (Apéndice 5). En la tabla XIX se muestran los flujos másicos obtenidos en la práctica C de los cuales se obtiene una economía de vapor de 1,57 con un error de exactitud de 21,5% y un coeficiente de variación de 8,04% (Apéndice 4). Los resultados de la práctica B exhiben un grado de exactitud aceptable respecto al valor teórico. Se obtuvo menor grado de exactitud en la práctica C, ya que al operar al vacío se requiere un mayor control en la alimentación de agua al evaporador, lo cual influye en el cálculo de los balances de masa y en el aumento del error.

En las figuras 38 y 43 se presentan los valores de capacidad de evaporación. En ambas prácticas, los resultados presentan una mayor capacidad de evaporación en el primer efecto debido a que se aprovecha de mejor manera el calor latente del vapor vivo. En las tablas XVI y XX se muestran los coeficientes de transferencia de calor para cada efecto y un valor medio. Los factores que influyen en estos resultados son principalmente la diferencia de temperatura que está en equilibrio entre el líquido en evaporación y el vapor de calentamiento. Ambos resultados exhiben un mayor coeficiente de transferencia de calor en el primer efecto.

En las tablas del apéndice 5, se observa todos los datos obtenidos tienen un coeficiente de variación menor al 10% lo cual una precisión es aceptable. Adicionalmente, se presentan los intervalos de confianza al 95%; además se presenta un resumen de todos los resultados más importantes de las prácticas incluyendo los rangos de variables.

5.5. Evaluación didáctica

Se hizo un cuestionario de evaluación el cual los estudiantes respondieron al momento de la entrega del informe de la práctica. El cuestionario engloba cualitativamente la opinión de estudiante tomando en cuenta la aplicación didáctica que tiene del equipo, la calidad del aprendizaje e importancia que la práctica tiene para su formación académica.

En las figuras del Apéndice 7, se observa las respuestas de los estudiantes en referencia a los conocimientos del proceso de evaporación antes y después de realizar la práctica. El 69,44% de estudiantes respondieron que los conocimientos previos a la realización eran de un nivel básico, el 19,44% mínimo y 11,11% moderado. Se observó que un alto porcentaje consideró un

aumento en sus conocimientos después de la realización afirmando el 55,56% que su conocimiento era moderado, 33,33% amplio y 11,11% básico.

El nivel de conocimiento adquirido sobre el funcionamiento de un evaporador al efectuar el experimento muestra que el 61,11% adquirió un conocimiento amplio, el 33,33% moderado y el 5,56% básico; lo cual refleja que la ejecución de la práctica ayudó a la mayoría de estudiantes a comprender el funcionamiento del evaporador. Otro aspecto de la calidad de aprendizaje está relacionado con los objetivos planteados y la aplicación de los conocimientos, el 66,67% considera que el experimento permitió aplicar un nivel moderado los conocimientos, el 22,22% un amplio y el 11,11% básico.

La práctica complementó satisfactoriamente la comprensión del proceso de evaporación. El 50% de los estudiantes considero que la práctica complementó ampliamente la comprensión del proceso, el 38,89% complementó en un nivel moderado, el 8,33% un nivel básico y el 2,78% un nivel mínimo.

La didáctica del equipo es satisfactoria. el 97% de los estudiantes opinó que el equipo es una herramienta adecuada para la experimentación del proceso de evaporación doble efecto. Respecto al cumplimiento de objetivos al utilizar el equipo, el 86,11% consideró que el equipo permite cumplir los objetivos de manera eficiente, el 11,11% regular y el 2,78% muy eficiente.

La opinión sobre la recolección de datos la manera en que el equipo permite recolectar los datos es eficiente. El 77,78% indicó que se recolecta eficientemente, el 13,89% de manera regular y el 8,33% de manera muy eficiente. Con respecto al funcionamiento de los instrumentos de medición, el

81% de los estudiantes afirmó que son adecuados, mientras el 19% afirmó lo contrario.

La evaluación presenta la importancia, que según el estudiante, la práctica tiene en su formación académica. En los resultados se observa que el 100% de los estudiantes afirma que es importante manejar el equipo durante la formación académica. Así mismo, el 100% de los estudiantes consideran que la práctica debe ser parte del programa del curso.

CONCLUSIONES

1. Se desarrolló satisfactoriamente la práctica de evaporación doble efecto en el curso de Laboratorio de Ingeniería Química Uno.
2. Se habilitó exitosamente el evaporador doble efecto el cual dispone de un manual de operación que incluye la descripción y caracterización del equipo, funcionamiento, precauciones de manejo y procedimientos para la operación.
3. La operación en el primer efecto se estabiliza a partir de los 40 minutos; el segundo efecto alcanza el estado estable a partir de los 60 minutos.
4. La economía de vapor que se obtiene en el evaporador es de 1,63 con un intervalo de confianza 1,48 a 1,77 en un nivel de 95%.
5. El coeficiente de transferencia de calor del primer efecto es de 1 049,23 W/m^2 °C con un rango de 978 a 1 120,4; y el coeficiente de transferencia de calor del segundo efecto es de 962,81 W/m^2 °C con un rango de 906,81 a 1 018,60.
6. La operación requiere de mucho control de temperaturas y flujos de alimentación de agua cuando el sistema alcanza el estado estable. La operación demanda mayor atención por parte del estudiante cuando se hace la evaporación al vacío.

7. La práctica debe ser implementada en el curso de Laboratorio de Ingeniería Química Uno, ya que es una herramienta didáctica para la aplicación de los conocimientos adquiridos en cursos anteriores y amplía la comprensión del proceso de evaporación.

8. El 100% de los estudiantes opina que es importante aprender el manejo del evaporador como parte de su formación académica; y considera importante incluir la práctica en el programa del curso del Laboratorio de Ingeniería Química Uno.

RECOMENDACIONES

1. Incluir la práctica en el programa del curso de Laboratorio de Ingeniería Química Uno.
2. Elaborar un esquema sencillo del evaporador en la preparación de la práctica para comprender el equipo e ilustrar de mejor manera los balances de masas y energía.
3. Registrar los datos de las variables operacionales desde el inicio de la operación para realizar gráficos del estado del sistema para efectuar los balances de masa y energía en estado estacionario.
4. Realizar una práctica de transferencia de calor antes de hacer la práctica de evaporación doble efecto.
5. Leer el manual de operación antes de la preparación de la práctica. Es necesario hacer énfasis en las precauciones, verificaciones previas y consideraciones para controlar la operación.
6. Drenar el agua utilizada para la evaporación solamente si el equipo no va a ser utilizado en largos períodos de tiempo. Durante el semestre no es necesario cambiar el agua.
7. Instalar una bomba independiente para la alimentación de agua en el condensador barométrico.

8. Colocar diques para protección de derrames en los tanques de combustible de la caldera.
9. Pintar la tubería de descarga del condensador barométrico para evitar daños por el ambiente.
10. Establecer un presupuesto por parte de la Escuela de Ingeniería Química para el mantenimiento de equipos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.
11. Realizar revisiones semestrales las condiciones de los equipos y elaborar un programa de mantenimiento.

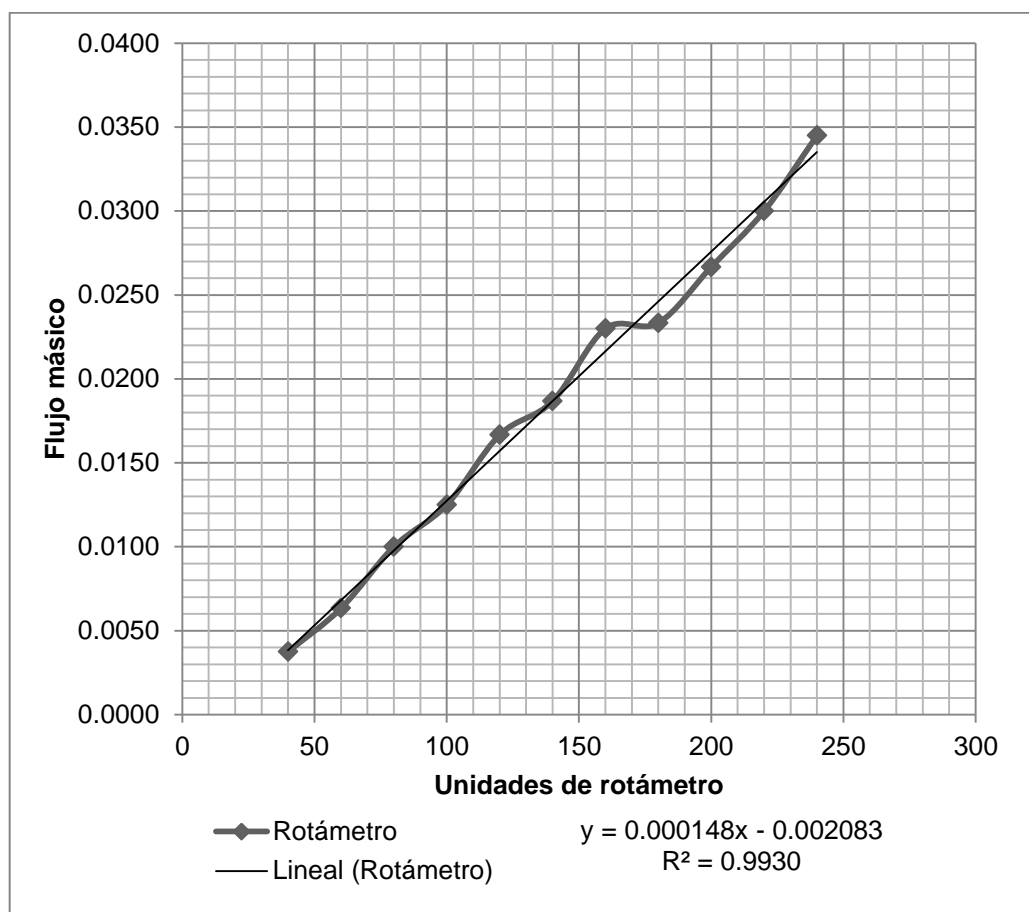
BIBLIOGRAFÍA

1. BADGER, Walter; BANCHERO, Julius. *Introducción a la ingeniería química*. España: McGraw-Hill, 1964. 778 p.
2. COUPER, James. *Chemical process equipment*. Estado Unidos: Elsevier, 2005. 833 p.
3. Gea Wiegand. *Tecnología de evaporación*. [en línea]. [ref. 15 agosto 2011]. Disponible en Web: <[http://www.geawiegand.com/geawiegand/cmsresources.nsf/filename-s/Evaporation_Technology_GEA_Wiegand_es.pdf/\\$file/Evaporation_Technology_GEA_Wiegand_es.pdf](http://www.geawiegand.com/geawiegand/cmsresources.nsf/filename-s/Evaporation_Technology_GEA_Wiegand_es.pdf/$file/Evaporation_Technology_GEA_Wiegand_es.pdf)>.
4. GEANKOPLIS, Chistie J.; *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. México: Continental, 2004. 1007 p.
5. KERN, Donald. *Procesos de transferencia de calor*. México: Continental, 1965. 980 p.
6. McCABE, Warren L; SMITH, Julian, HARRIOT, Meter. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. México: McGraw-Hill, 1991. 1189 p.
7. PERRY, Robert. *Perry's chemical engineers handbook*. Estados Unidos: McGraw-Hill, 1996. 4v. 3166 p.

8. SEVERNS, William. *La producción de energía mediante vapor, aire o gas*. España: Reverté, 1974. 503 p.
9. Spirax Sarco. *Tabas de vapor, Zona de vapor húmedo*. [en línea]. [ref. 26 agosto 2011]. Disponible en Web: <<http://www.spiraxsarco.com/es/resources/steam-tables.asp>>.
10. VAN WYLEN, Gordon. *Tablas de agua, Sistema Internacional*. [en línea]. [ref. 17 junio 2011]. Disponible en Web: <<http://termoaplicadaunefm.files.wordpress.com/2009/02/tablas-del-agua-s-internacional.pdf>>.

APÉNDICES
APENDICE 1
CURVA DE CALIBRACIÓN

Curva de calibración del rotámetro



Fuente: elaboración propia.

Curva de calibración de rotámetro:

$$W_f = 0,000148 * (UnRot) - 0,002083$$

Ecuación28

APÉNDICE 2

MUESTRA DE CÁLCULO

1. Cálculo del flujo másico de condensado de vapor vivo

$$W_s = \frac{m_s}{t_s} \quad \text{Ecuación 29}$$

Dónde:

W_s = Flujo másico de condensación de vapor vivo, (kg/s)

m_s = Masa de condensado de vapor vivo, (kg)

t_s = Tiempo de condensación de vapor vivo, (s)

Ejemplo: Calculo de flujo másico de condensado de vapor vivo para corrida número 1 en estado estacionario de la Práctica B.

$$W_s = \frac{0,3 \text{ kg}}{20 \text{ s}} = 0,015 \text{ kg/s}$$

Nota: De la misma manera se realizó el cálculo de los valores de flujo másico de condensado de vapor vivo en las tablas del apéndice 4.

2. Cálculo del flujo másico de condensado del primer efecto

$$W_1 = \frac{m_1}{t_1} \quad \text{Ecuación 30}$$

Dónde:

W_1 = Flujo másico de condensación del primer efecto, (kg/s)

m_1 = Masa de condensado del primer efecto, (kg)

t_1 = Tiempo de condensación del primer efecto, (s)

Ejemplo: Calculo de flujo másico de condensado de vapor del primer efecto para corrida número 1 en estado estacionario en la Práctica B.

$$W_1 = \frac{0,25 \text{ kg}}{20 \text{ s}} = 0,0125 \text{ kg/s}$$

Nota: De la misma manera se realizó el cálculo de los valores de flujo másico de condensado de vapor del primer efecto en tablas del apéndice 4.

3. Cálculo del flujo másico de agua alimentado al sistema

Al momento de usar el condensador barométrico, es necesario realizar el balance de masa para determinar el flujo de vapor que sale del segundo efecto. Para determinar el flujo másico de agua alimentada, se utilizó la curva de calibración del rotámetro:

$$W_f = 0,000148 * (UnRot) - 0,002083 \quad \text{Ecuación 28}$$

Dónde:

W_f = Flujo másico de alimentación de agua al sistema de evaporación, (kg/s)

$UnRot$ = Unidades de rotámetro

Ejemplo: Calculo de flujo másico de alimentación de agua al evaporador para la corrida número 1 en estado estacionario en la Práctica C.

$$W_f = 0,000148 * (185) - 0,002083 = 0,02529 \text{ kg/s}$$

Nota: De la misma manera se realizó el cálculo de los valores de flujo másico de condensado de vapor del primer efecto en las tablas del apéndice 4.

4. Cálculo del flujo másico de condensado del segundo efecto

$$W_2 = \frac{m_2}{t_2} \quad \text{Ecuación 31}$$

Dónde:

W_2 = Flujo másico de condensación del segundo efecto, (Kg/s)

m_2 = Masa de condensado del segundo efecto, (Kg)

t_2 = Tiempo de condensación del segundo efecto, (s)

Ejemplo: Calculo de flujo másico de condensado de vapor del segundo efecto para corrida número 1 en estado estacionario en la Práctica B.

$$W_s = \frac{0,25 \text{ kg}}{20 \text{ s}} = 0,0125 \text{ kg/s}$$

Nota: De la misma manera se realizó el cálculo de los valores de flujo másico de condensado de vapor del segundo efecto en las tablas del apéndice 4.

5. Cálculo del flujo másico de condensado del segundo efecto a través del balance de masa

$$W_2 = W_f - W_1 \quad \text{Ecuación 18}$$

Dónde:

W_2 = Flujo másico de condensación del segundo efecto, (kg/s)

W_f = Flujo másico de alimentación de agua al sistema de evaporación, (kg/s)

W_1 = Flujo másico de condensación del primer efecto, (kg/s)

Ejemplo: Calculo de flujo másico de condensado de vapor del segundo efecto para corrida número 1 en estado estacionario en la Práctica C.

$$W_2 = 0,02529 - 0,015 = 0,01029 \text{ kg/s}$$

Nota: De la misma manera se realizó el cálculo de los valores de flujo másico de condensado de vapor del segundo efecto en tablas del apéndice 4.

6. Determinación de la economía de vapor

$$e = \frac{W_1 + W_2}{W_s} \quad \text{Ecuación 9}$$

Dónde:

e = Economía de vapor

W_1 = Flujo másico de condensación del primer efecto, (Kg/s)

W_2 = Flujo másico de condensación del segundo efecto, (Kg/s)

W_s = Flujo másico de condensación de vapor vivo, (kg/s)

Ejemplo: Calculo de la economía de vapor para corrida número 1 en estado estacionario en la Práctica B.

$$e = \frac{0,0125 \frac{\text{kg}}{\text{s}} + 0,0125 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{0,015 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} = 1,67$$

Nota: De la misma manera se realizó el cálculo de los valores de la economía de vapor en las tablas del apéndice 4.

7. Cálculo de presión de vapor

$$P = (p + p_{atm}) \text{ psi} * \left(\frac{101,325 \text{ kPa}}{14,7 \text{ psi}} \right) \quad \text{Ecuación 32}$$

Dónde:

P = Presión absoluta, (kPa)

p = Presión manométrica, (psi)

p_{atm} = Presión atmosférica local = 640 mmHg = 12,37 psi = 25,19 in Hg

Ejemplo: Calculo de la presión absoluta para la corrida número 1 en estado estacionario en la Práctica B.

$$P = (11 + 12.37) \text{ psi} * \left(\frac{101,325 \text{ kPa}}{14,7 \text{ psi}} \right) = 161,12 \text{ kPa}$$

Nota: De la misma manera se realizó el cálculo de los valores de la presión absoluta en las tablas del apéndice 4.

Para realizar el cálculo con la presión de vacío, se hace de la siguiente manera:

$$P = (p_{atm} - p_v) * \frac{101,325 \text{ kPa}}{29,92 \text{ inHg}} \quad \text{Ecuación 33}$$

Dónde:

P = Presión absoluta, (kPa)

p_v = Presión de vacío, (inHg)

p_{atm} = Presión atmosférica local = 640 mmHg = 12.37 psi = 25.19 in Hg

Ejemplo: Calculo de la presión absoluta para la corrida número 1 en estado estacionario en la Práctica C.

$$P = (25,19 - 9) * \frac{101,325 \text{ kPa}}{29,92 \text{ inHg}} = 54,82 \text{ kPa}$$

8. Determinación de Calor latente y temperatura de saturación

Se determina de calor latente y temperatura de saturación a través de interpolación de la presión de vapor en tablas de vapor. En el presente trabajo se hizo el cálculo de los valores a través de una referencia electrónica.

Ejemplo: Calculo de calor latente de vapor vivo (λ_s) y temperatura de saturación a presión de saturación de vapor vivo de 161,12 kPa para la corrida número 1 (estado estacionario) realizada en la Práctica B.

Tabla electrónica de vapor Spirax Sarco

Inputs	Saturation Pressure and Dryness	
Output	<input checked="" type="radio"/> Single Value <input type="radio"/> Table	
Saturation Pressure	161.12	kPa (kN/m ²) absolute
Dryness	100	%
	<input type="button" value="Calculate"/> <input type="button" value="Reset"/> <input type="button" value="Print"/>	
Saturation Temperature	113.539	°C
Specific Enthalpy of Water (h _f)	476.370	kJ/kg
Specific Enthalpy of Evaporation of Wet Steam	2220.29	kJ/kg
Specific Enthalpy of Wet Steam (h)	2696.66	kJ/kg

Fuente: <http://www.spiraxsarco.com/es/resources/steam-tables.asp>, Consulta el 26 de agosto 2011.

9. Determinación de la capacidad de evaporación del primer efecto

$$q_1 = W_s(H_s - h_s) = W_s\lambda_s \quad \text{Ecuación 10}$$

Dónde:

q_1 = Capacidad de evaporación del primer efecto, (kJ/s)

W_s = Flujo másico de condensación de vapor vivo, (kg/s)

H_s = Entalpía específica del vapor a la presión de la calandria del primer efecto (kJ/kg)

h_s = Entalpía específica del líquido saturado a la presión de la calandria del primer efecto (kJ/kg)

λ_s = Calor latente de vapor vivo, (kJ/kg)

Ejemplo: Calculo de la capacidad de evaporación del primer efecto para la corrida número 1 en estado estacionario de la Práctica B.

$$q_1 = 0,015 \frac{kg}{s} * 2220,29 \frac{kJ}{kg} = 33,30 kW$$

Nota: De la misma manera se realizó el cálculo de los valores de la capacidad de evaporación del primer efecto en las tablas del apéndice 4.

10. Determinación de la capacidad de evaporación del segundo efecto

$$q_2 = W_1(H_1 - h_1) = W_1\lambda_1 \quad \text{Ecuación 11}$$

Dónde:

q_2 = Capacidad de evaporación del segundo efecto, (kJ/s)

W_1 = Flujo másico de condensación del primer efecto, (kg/s)

H_1 = Entalpía específica del vapor a la presión de la calandria del segundo efecto (kJ/kg)

h_1 = Entalpía específica del líquido saturado a la presión de la calandria del segundo efecto (kJ/kg)

λ_1 = Calor latente de vapor del primer efecto, (kJ/kg)

Ejemplo: Calculo de la capacidad de evaporación del segundo efecto para la corrida número 1 en estado estacionario de la Práctica B.

$$q_2 = 0,0125 \frac{kg}{s} * 2244 \frac{kJ}{kg} = 28,05 kW$$

Nota: De la misma manera se realizó el cálculo de los valores de la capacidad de evaporación del segundo efecto en las tablas del apéndice 4.

11. Determinación de la capacidad del evaporador

$$q_t = q_1 + q_2 \quad \text{Ecuación 34}$$

Dónde:

q_t = Capacidad del evaporador, (kJ/s)

q_1 = Capacidad de evaporación del primer efecto, (kJ/s)

q_2 = Capacidad de evaporación del segundo efecto, (kJ/s)

Ejemplo: Calculo de la capacidad del evaporador para la corrida número 1 en estado estacionario de la Práctica B.

$$q_t = 33,30 \frac{kJ}{s} * 28,05 \frac{kJ}{s} = 61,65 kW$$

Nota: De la misma manera se realizó el cálculo de los valores de la capacidad del evaporador en las tablas del apéndice 4.

12. Cálculo del área de transferencia de calor

$$A = 2\pi dLN \quad \text{Ecuación 12}$$

Dónde:

A = Área de transferencia de calor de la calandria, (m²)

d = Diámetro externo del tubo = 0,0158 m.

L = Longitud de tubo = 1,42 m,

N = Número de tubos = 37

Sustituyendo valores se obtiene:

$$A = 2 * \pi * 0,0158 * 1,42 * 37 = 2,6079 \text{ m}^2$$

13. Determinación del coeficiente de transferencia de calor del primer efecto

$$U_1 = \frac{q_1}{A(T_s - T_1)} \quad \text{Ecuación 13}$$

Dónde:

U_1 = Coeficiente de transferencia de calor del primer efecto, ($\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)

q_1 = Capacidad de evaporación del primer efecto, (kJ/s)

A = Área de transferencia de calor de la calandria, (m^2)

T_s = Temperatura de saturación del vapor vivo, ($^\circ\text{C}$)

T_1 = Temperatura de ebullición del agua en el primer efecto, ($^\circ\text{C}$)

Ejemplo: Calculo del coeficiente de transferencia de calor para la corrida número 1 en estado estacionario de la Práctica B.

$$U_1 = \frac{33,30 \text{ kJ/s}}{2,6079 \text{ m}^2 * (113,53 \text{ } ^\circ\text{C} - 100 \text{ } ^\circ\text{C})} = 0,94244 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$0,94244 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}} * \frac{1 \text{ 000 W}}{1 \text{ kW}} = 942,44 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Nota: De la misma manera se realizó el cálculo de los valores de coeficiente de transferencia de calor para el primer efecto en las tablas del apéndice 4.

14. Determinación del coeficiente de transferencia de calor del segundo efecto

$$U_2 = \frac{q_2}{A(T_1 - T_2)} \quad \text{Ecuación 15}$$

Dónde:

U_2 = Coeficiente de transferencia de calor del segundo efecto, (W/m² °C)

q_2 = Capacidad de evaporación del segundo efecto, (kJ/s)

A = Área de transferencia de calor de la calandria, (m²)

T_1 = Temperatura de saturación del vapor en el primer efecto según presión de la calandria, (°C)

T_2 = Temperatura de ebullición del agua en el segundo efecto, (°C)

Ejemplo: Calculo del coeficiente de transferencia de calor del segundo efecto para la corrida número 1 en estado estacionario de la Práctica B.

$$U_2 = \frac{28,05 \text{ kJ/s}}{2,6079 \text{ m}^2 * (104,07 \text{ } ^\circ\text{C} - 93,33 \text{ } ^\circ\text{C})} = 1,00176 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$1,001764 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}} * \frac{1 \text{ 000 W}}{1 \text{ kW}} = 1 \text{ 001,76 } \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Nota: De la misma manera se realizó el cálculo de los valores de coeficiente de transferencia de calor para el segundo efecto en las tablas del apéndice 4.

15. Coeficiente global de transferencia de calor de

$$U_{med} = \frac{q_t}{A(\Delta T_1 + \Delta T_2)} \quad \text{Ecuación 35}$$

q_t = Capacidad del evaporador, (kJ/s)

A = Área de transferencia de calor, (m^2)

U_{med} = Coeficiente de transferencia de calor medio del evaporador doble efecto, $W/(m^2 K)$

ΔT_1 = Diferencia de temperatura en entre el condensado y el evaporador 1, ($^{\circ}C$)

ΔT_2 = Diferencia de temperatura en entre el condensado y el evaporador 2, ($^{\circ}C$)

Ejemplo: Cálculo del coeficiente medio de transferencia de calor para la corrida número 1 en estado estacionario de la Práctica B.

$$U_{med} = \frac{61,35 \text{ kJ/s}}{2,6079 \text{ m}^2 * (24,29 \text{ }^{\circ}C)} = 0,96867 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \text{ }^{\circ}C}$$

$$0,96867 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \text{ }^{\circ}C} * \frac{1 \text{ 000 W}}{1 \text{ kW}} = 968,67 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ }^{\circ}C}$$

Nota: de la misma manera se realizó el cálculo de los valores de coeficiente medio de transferencia de calor en las tablas del apéndice 4.

16. Pérdidas por radiación del primer efecto:

El cálculo de las pérdidas por radiación se realizó con las ecuaciones obtenidas del balance de energía

$$E_{p1} = W_s \lambda_s + W_1 C_p (T_f - T_1) - W_1 \lambda_1 \quad \text{Ecuación 23}$$

Dónde:

E_{p1} = Pérdidas de energía por radiación del primer efecto, (kJ/s)

W_1 = Flujo másico de condensación del primer efecto, (Kg/s)

W_2 = Flujo másico de condensación del segundo efecto, (Kg/s)

λ_s = Calor latente de vapor vivo, (kJ/kg)

λ_1 = Calor latente de vapor del primer efecto, (kJ/kg)

C_p = Capacidad calorífica del agua = 4.182 kJ/kg °C

T_f = Temperatura de alimentación en el sistema de evaporación doble efecto, (°C)

T_1 = Temperatura de ebullición del agua en el primer efecto, (°C)

Ejemplo: cálculo de las pérdidas de energía por radiación para la corrida número 1 en estado estacionario de la Práctica B

$$E_{p1} = 0,015 * 2220,25 + 0,0125 * 4,182 * (25 - 100) - 0,0125 * 2244$$

$$E_{p1} = 1,33 \text{ kW}$$

Nota: de la misma manera se realizó el cálculo de los valores de pérdidas de energía por radiación del primer efecto en las tablas del apéndice 4.

17. Pérdidas por radiación del segundo efecto

El cálculo de las pérdidas por radiación se realizó con las ecuaciones obtenidas del balance de energía.

$$E_{p2} = W_1\lambda_1 + W_2C_p(T_f - T_2) - W_2\lambda_2 \quad \text{Ecuación 24}$$

$$E_{p2} = W_1\lambda_1 + (W_f - W_1)C_p(T_f - T_2) - (W_f - W_1)\lambda_2 \quad \text{Ecuación 27}$$

Dónde:

E_{p2} = Pérdidas de energía por radiación del segundo efecto, (kJ/s)

W_1 = Flujo másico de condensación del primer efecto, (Kg/s)

W_2 = Flujo másico de condensación del segundo efecto, (Kg/s)

W_f = Flujo másico de alimentación de agua al evaporador, (Kg/s)

λ_1 = Calor latente de vapor del primer efecto, (kJ/kg)

λ_2 = Calor latente de vapor del segundo efecto a temperatura de ebullición (T_2) o presión de vacío (P_v), (kJ/kg)

C_p = Capacidad calorífica del agua = 4.182 kJ/kg °C

T_f = Temperatura de alimentación en el sistema de evaporación doble efecto, (°C)

T_2 = Temperatura de ebullición del agua en el segundo efecto, (°C)

Ejemplo: Calculo de las pérdidas de energía por radiación para la corrida número 1 en estado estacionario de la Práctica B

$$E_{p2} = 0,0125 * 2\ 220,25 + 0,0125 * 4,182(25 - 100) - 0,0125 * 2244$$

$$E_{p2} = 3,94\ kW$$

Nota: De la misma manera se realizó el cálculo de los valores de pérdidas de energía por radiación del primer efecto en las tablas del apéndice 4.

18. Calculo de Desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}$$

Ecuación 3

Dónde:

σ = Desviación estándar.

N = Número total de datos.

x_i = Cada uno de los datos

\bar{x} = Promedio de los datos.

Ejemplo: Cálculo de desviación estándar de la economía de vapor para las corridas en estado estacionario de la práctica B

$$\sigma = \sqrt{\frac{(1,67 - 1,6286)^2 + (1,52 - 1,6286)^2 + (1,86 - 1,6286)^2 + (1,44 - 1,6286)^2 + (1,67 - 1,6286)^2}{5 - 1}}$$

$$\sigma = 0,161648$$

Nota: De la misma manera se realizó el cálculo de los valores de desviación estándar en las tablas del apéndice 5.

19. Cálculo de coeficiente de variación

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} * 100$$

Ecuación 4

Dónde

CV = Coeficiente de variación

σ = Desviación estándar.

\bar{x} = Promedio de los datos

Ejemplo: Cálculo de coeficiente de variación de la economía de vapor para las corridas en estado estacionario de la práctica B:

$$CV = \frac{0,161648}{1,6286} * 100\% = 9,92\%$$

Nota: De la misma manera se realizó el cálculo de los valores del coeficiente de variación en las tablas del apéndice 5.

20. Cálculo del intervalo de confianza

$$\bar{x}_{x/i} = x \pm t_{\alpha/2} * \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Dónde:

$\bar{x}_{x/i}$ = Límite superior o inferior del intervalo de confianza

\bar{x} = Promedio de los datos.

$t_{\alpha/2}$ = Valor de la curva normal de distribución para una confianza de 95 %

σ = Desviación estándar

n = Número de corridas

Ejemplo: Cálculo del intervalo de confianza de la economía de vapor para las corridas en estado estacionario de la práctica B

$$\bar{x}_{x/i} = 1,6286 \pm 1,96 * \frac{0,161648}{\sqrt{5}}$$

$$1,4869 \leq X \leq 1,7703$$

Nota: De la misma manera se realizó el cálculo de los valores del intervalo de confianza en las tablas del apéndice 5.

21. Cálculo de error por exactitud

$$E = \frac{|D_T - D_E|}{D_T} * 100\%$$

Ecuación 6

Donde

E = Error de exactitud

D_T = Dato teórico

D_E = Dato experimental

Ejemplo: Cálculo del error por exactitud de la economía de vapor para el valor obtenido en la práctica B

$$E = \frac{|2 - 1,63|}{2} * 100\% = 18,5\%$$

Nota: De la misma manera se realizó el cálculo del error de la práctica C.

APÉNDICE 3
DATOS CALCULADOS

A3. 1 Datos calculados de la Práctica B

Tiempo de operación y flujos máxicos de condensados en estado inestable y estable (Práctica B)

Corrida	Tiempo de operación	Condensado de vapor vivo	Condensado de vapor del primer efecto	Condensado del segundo efecto
	(min)	(kg/s)	(kg/s)	(kg/s)
Estado Inestable				
1	0	0	0	0
2	5	0,006	0	0
3	10	0,0075	0	0
4	15	0,01	0	0
5	20	0,0065	0,005	0
6	25	0,01	0,006	0
7	30	0,012	0,005	0
8	35	0,015	0,0035	0
9	40	0,0165	0,0045	0
10	45	0,014	0,0055	0
11	50	0,015	0,009	0
12	55	0,0145	0,01	0
13	60	0,0135	0,0145	0,0075
14	65	0,015	0,013	0,011
15	70	0,0165	0,0135	0,0125
16	75	0,015	0,014	0,0135
Estado Estable				
17	80	0,015	0,0125	0,0125
18	85	0,0165	0,013	0,012
19	90	0,014	0,0145	0,0115
20	95	0,016	0,0125	0,0105
21	100	0,015	0,0125	0,0125

Fuente: Muestra de cálculo

**Flujos másicos de condensados y Economía de vapor del evaporador
(Práctica B)**

corrida	Condensado de vapor vivo	Condensado de vapor del primer efecto	Condensado del segundo efecto	Economía de vapor
	(kg/s)	(kg/s)	(kg/s)	
1	0,015	0,0125	0,0125	1,67
2	0,0165	0,013	0,012	1.52
3	0,014	0,0145	0,0115	1.86
4	0,016	0,0125	0,0105	1.44
5	0,015	0,0125	0,0125	1.67
Promedio	0,0153	0,0130	0,0118	1.63

Fuente: Muestra de cálculo

**Conversión de presiones y temperatura de operación
(Práctica B)**

Corrida	Presión de vapor vivo	Presión de vapor del primer efecto	Temperatura de operación primer efecto	Temperatura de operación Segundo efecto
	(kPa)	(kPa)	(°C)	(°C)
1	161,12	119,77	100,00	93,33
2	154,23	126,66	100,00	93,33
3	147,34	126,66	100,00	93,33
4	161,12	119,77	100,00	93,33
5	154,23	119,77	100,00	93,33

Fuente: Muestra de cálculo

**Calores latentes y capacidades de evaporación
(Práctica B)**

Corrida	Calor latente		Capacidad de evaporación		
	Vapor vivo	Vapor del Primer efecto	Primer efecto	Segundo efecto	Evaporador doble efecto
	(kj/kg)	(kj/kg)	(kW)	(kW)	(kW)
1	2 220,25	2 244	33,30	28,05	61,35
2	2 223,87	2 239,66	36,69	29,11	65,81
3	2 227,61	2 239,66	31,19	32,48	63,66
4	2 220,25	2 244	35,52	28,05	63,57
5	2 223,87	2 244	33,36	28,05	61,41
Promedio			34,01	29,15	63,16

Fuente: Muestra de cálculo

Cálculo de área de transferencia de calor

Variable	Dimensional	Cantidad
Número de tubos	Adimensional	37
Diámetro de tubo	m	0,0158
Longitud de tubo	m	1,42
Área de transferencia de calor	m ²	2,6079

Fuente: Muestra de cálculo

**Cálculo de coeficiente de transferencia de calor de primer efecto
(Práctica B)**

Corrida	Temperaturas		Diferencia de temperatura (°C)	Coeficiente de transferencia primer efecto (W/m ² *C)
	Saturación de vapor vivo	Evaporación del primer efecto		
	(°C)	(°C)		
1	113,55	100,00	13,55	942,44
2	112,23	100,00	12,23	1 150,45
3	110,85	100,00	10,85	1 102,15
4	113,55	100,00	13,55	1 005,27
5	112,23	100,00	12,23	1 045,87
Promedio				1 049,24

Fuente: Muestra de cálculo

**Cálculo de coeficiente de transferencia de calor de segundo efecto
(Práctica B)**

Corrida	Temperaturas		Diferencia de temperatura (°C)	Coeficiente de transferencia segundo efecto (W/m ² *C)
	Saturación de vapor primer efecto	Evaporación del segundo efecto		
	(°C)	(°C)		
1	104,07	93,33	10,74	1 001,76
2	106,39	93,33	13,06	855,06
3	106,39	93,33	13,06	953,72
4	104,07	93,33	10,74	1 001,76
5	104,07	93,33	10,74	1 001,76
Promedio				962,81

Fuente: Muestra de cálculo

**Cálculo de Coeficiente medio de transferencia de calor
(Práctica B)**

Corrida	Capacidad del evaporador	Diferencia global de temperatura	Coeficiente medio
	(kW)	(°C)	(W/m ² *C)
1	61,35	24,29	968.67
2	65,81	25,29	1 039,02
3	63,66	23,91	1 005,11
4	63,57	24,29	1 003,72
5	61,41	22,97	969.52
Promedio	63,16	24,11	1 004,34

Fuente: Muestra de cálculo

Cálculo de pérdidas de calor por radiación (Práctica B)

Corrida	Primer efecto	Segundo efecto	Pérdida total
	(kW)	(kW)	(kW)
1	1,333125	3,94820075	5,28132575
2	3,500825	1,60269272	5,10351772
3	5,836455	3,03672531	8,87318031
4	3,553375	1,17151137	4,72488637
5	1,387425	3,94820075	5,33562575
Promedio	3,122241	2,74146618	5,86370718

Fuente: Muestra de cálculo

A3. 2 Datos calculados de la Práctica C

Tiempo de operación y flujos másicos de condensados en estado inestable y estable (Práctica C)

Corrida	Tiempo de operación	Condensado de vapor vivo	Condensado de vapor del primer efecto	Alimentación de agua
	(min)	(kg/s)	(kg/s)	(kg/s)
Estado Inestable				
1	0	0	0	0
2	5	0,006	0	0
3	10	0,006	0	0
4	15	0,004	0	0
5	20	0,0075	0,0012	0
6	25	0,01	0,006	0,018637
7	30	0,008	0,005	0,018637
8	35	0,009	0,0035	0,008277
9	40	0,015	0,0045	0,004577
10	45	0,0155	0,0045	0,003097
11	50	0,017	0,0055	0,003097
12	55	0,015	0,0085	0,027517
13	60	0,014	0,014	0,005317
14	65	0,0165	0,0125	0,020857
15	70	0,0165	0,015	0,018637
16	75	0,015	0,014	0,020117
Estado Estable				
17	80	0,0175	0,015	0,025297
18	85	0,015	0,0145	0,024557
19	90	0,0155	0,0135	0,024557
20	95	0,0165	0,0155	0,023817
21	100	0,015	0,0145	0,026037

Fuente: Muestra de cálculo

**Flujos máxicos de condensados y Economía de vapor del evaporador
(Práctica C)**

corrida	Condensado de vapor vivo	Condensado de vapor del primer efecto	Condensado del segundo efecto	Economía de vapor
	(Kg/s)	(Kg/s)	(Kg/s)	
1	0,0175	0,015	0,010297	1,45
2	0,015	0,0145	0,010057	1,64
3	0,0155	0,0135	0,011057	1,58
4	0,0165	0,0155	0,008317	1,44
5	0,015	0,0145	0,011537	1,74
Promedio	0,0159	0,146	0,0103	1,57

Fuente: Muestra de cálculo

**Conversión de presiones y temperatura de operación
(Práctica C)**

Corrida	Presión de vapor vivo	Presión de vapor del primer efecto	Temperatura de operación primer efecto	Temperatura de operación Segundo efecto
	(kPa)	(kPa)	(°C)	(°C)
1	161,12	119,77	100,00	92,22
2	161,12	126,66	100,00	92,22
3	154,23	126,66	100,00	92,22
4	161,12	126,66	100,00	92,22
5	154,23	119,77	100,00	92,22

Fuente: Muestra de cálculo

**Calores latentes y capacidades de evaporación
(Práctica C)**

Corrida	Calor latente		Capacidad de evaporación		
	Vapor vivo	Vapor del Primer efecto	Primer efecto	Segundo efecto	Evaporador doble efecto
	(Kj/kg)	(Kj/kg)	(kW)	(kW)	(kW)
1	2 220.25	2 244	38,85	33,66	72,51
2	2 220.25	2 239,66	33,30	32,48	65,78
3	2 223.87	2 239,66	34,47	30,24	64,71
4	2 220.25	2 239,66	36,63	34,71	71,35
5	2 223.87	2244	33,36	32,54	65,89
Promedio			35,32	32,72	68,05

Fuente: Muestra de cálculo

**Cálculo de coeficiente de transferencia de calor de primer efecto
(Práctica C)**

Corrida	Temperaturas		Diferencia de temperatura	Coeficiente de transferencia primer efecto
	Saturación de vapor vivo	Evaporación del primer efecto		
	(°C)	(°C)	(°C)	(W/m ² *C)
1	113,55	100,00	13,55	1 099,52
2	113,55	100,00	13,55	942,44
3	112,23	100,00	12,23	1 080,73
4	113,55	100,00	13,55	1 036,69
5	112,23	100,00	12,23	1 045,87
Promedio				1 041,05

Fuente: Muestra de cálculo

**Cálculo de coeficiente de transferencia de calor de segundo efecto
(Práctica C)**

Corrida	Temperaturas		Diferencia de temperatura (°C)	Coeficiente de transferencia segundo efecto (W/m ² *C)
	Saturación de vapor primer efecto	Evaporación del segundo efecto		
	(°C)	(°C)		
1	104,77	92,22	12,55	1 028,61
2	106,39	92,22	14,17	878,92
3	106,39	92,22	14,17	818,31
4	106,39	92,22	14,17	939,54
5	104,77	92,22	12,55	994,32
Promedio				931,94

Fuente: Muestra de cálculo

Cálculo de Coeficiente medio de transferencia de calor (Práctica C)

Corrida	Capacidad del evaporador	Diferencia global de temperatura	Coeficiente medio
	(kW)	(°C)	(W/m ² *C)
1	72,51	26,10	1 065,42
2	65,78	27,72	966,46
3	64,71	26,40	950,69
4	71,35	27,72	1 048,29
5	65,89	24,78	968,18
Promedio	68,05	26,65	999,81

Fuente: Muestra de cálculo

Cálculo de pérdidas de calor por radiación (Práctica C)

Corrida	Primer efecto	Segundo efecto	Pérdida total
	(kW)	(kW)	(kW)
1	0,489625	7,04548764	7,53511264
2	3,719245	6,48088229	10,2001273
3	0,0003	1,65653623	1,65683623
4	3,94218	2,8791518	6,8213318
5	3,727875	0,13379087	3,86166587
Promedio	2,375845	3,63916977	6,01501477

Fuente: Muestra de cálculo

APÉNDICE 4
ANÁLISIS DE ERROR

Promedio, desviación estándar, coeficiente de variación, intervalos al 95% de confianza y error por exactitud de la economía de vapor de las prácticas experimentales

Dato estadístico	Economía de vapor	
	Práctica B	Práctica C
Promedio	1,6286	1,5693
Desviación estándar	0,1616	0,1262
Coeficiente de variación	9,92%	8,04%
Límite inferior	1,4869	1,55
Límite superior	1,7703	1,57
Error relativo	18,5%	21,5%

Fuente: Muestra de cálculo

Promedio, Desviación estándar, coeficiente de variación e intervalos al 95% de confianza de la capacidad de evaporación de las prácticas experimentales

Dato Estadístico	Capacidad de evaporación			
	Práctica B		Práctica C	
	Primer efecto	Segundo efecto	Primer efecto	Segundo efecto
Promedio	34,0132	29,1481	35,3241	32,27246
Desviación Estándar	2,1442	1,9162	2,3904	1,6680
Coeficiente de variación	6,30%	6,57%	6,76%	5,03%
Límite Superior	35,89	30,82	35,5115	32,8554
Límite inferior	32,13	27,46	35,1367	32,5939

Fuente: Muestra de cálculo

Promedio, Desviación estándar, coeficiente de variación e intervalos al 95% de confianza del coeficiente de transferencia de calor de las prácticas experimentales

Dato Estadístico	Coeficiente de transferencia de calor			
	Práctica B		Práctica C	
	Primer efecto	Segundo efecto	Primer efecto	Segundo efecto
Promedio	1 049,2369	962,8132	1 041,0494	931,9384
Desviación Estándar	81,2293	63,7291	60,7417	85,1716
Coeficiente de variación	7,74%	6,61%	5,83%	9,13%
Límite Superior	1 120,4376	1 018,6742	1 045,8115	938,6158
Límite inferior	978,0363	906,9522	1036,2872	925,2609

Fuente: Muestra de cálculo

APÉNDICE 5
DATOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE

A 4.1 Práctica experimental B

Condensado de vapor vivo y presión de la calandria del primer efecto en estado inestable (Práctica B)

Corrida	Tiempo de operación	Flujo másico de condensado de vapor vivo		Presión de calandria del primer efecto
		Masa de condensado	Tiempo	
	(min)	(kg)	(s)	(psi)
Estado Inestable				
1	0	0	20	0
2	5	0,12	20	3
3	10	0,15	20	2,5
4	15	0,2	20	4,2
5	20	0,13	20	4,3
6	25	0,2	20	4,5
7	30	0,24	20	5,5
8	35	0,3	20	6,3
9	40	0,33	20	9
10	45	0,28	20	11
11	50	0,3	20	11
12	55	0,29	20	11,5
13	60	0,27	20	10
14	65	0,3	20	12
15	70	0,33	20	9.5
16	75	0,3	20	12
Estado Estable				
1	80	0,3	20	11
2	85	0,33	20	10
3	90	0,28	20	9
4	95	0,32	20	11
5	100	0,3	20	10

Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

Condensado del primer efecto y presión de la calandria del segundo efecto en estado Inestable (Práctica B)

Corrida	Tiempo de operación	Flujo másico de condensado del primer efecto		Presión de calandria del segundo efecto
		Masa de condensado	Tiempo	
	(min)	(kg)	(s)	(psi)
Estado Inestable				
1	0	0	20	0
2	5	0	20	0
3	10	0	20	0
4	15	0	20	0
5	20	0,1	20	0,5
6	25	0,12	20	0,5
7	30	0,1	20	1,5
8	35	0,07	20	2,3
9	40	0,09	20	3,5
10	45	0,11	20	4
11	50	0,18	20	3,5
12	55	0,2	20	4,5
13	60	0,29	20	5
14	65	0,26	20	6
15	70	0,27	20	5,5
16	75	0,28	20	5
Estado Estable				
1	80	0,25	20	5
2	85	0,26	20	6
3	90	0,29	20	6
4	95	0,25	20	5
5	100	0,25	20	5

Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

**Condensado del Segundo efecto y Temperaturas de evaporadores
(Práctica B)**

Corrida	Tiempo de operación	Flujo másico de condensado del segundo efecto		Temperatura de operación	
		Masa de condensado	Tiempo	Primer efecto	Segundo efecto
	(min)	(kg)	(s)	(F)	(F)
Estado Inestable					
1	0	0	20	74	74
2	5	0	20	77	74
3	10	0	20	86	74
4	15	0	20	112	74
5	20	0	20	192	74
6	25	0	20	198	78
7	30	0	20	198	114
8	35	0	20	200	164
9	40	0	20	200	179
10	45	0	20	200	190
11	50	0	20	204	194
12	55	0,11	20	208	196
13	60	0,15	20	210	198
14	65	0,22	20	212	198
15	70	0,25	20	212	198
16	75	0,27	20	212	198
Estado Estable					
1	80	0,25	20	212	200
2	85	0,24	20	212	200
3	90	0,23	20	212	200
4	95	0,21	20	212	200
5	100	0,25	20	212	200

Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

A4.2 Práctica experimental C

Condensado de vapor vivo y presión de la calandria del primer efecto en estado inestable (Práctica C)

Corrida	Tiempo de operación	Flujo másico de condensado de vapor vivo		Presión de calandria del primer efecto
		Masa de condensado	Tiempo	
	(min)	(kg)	(s)	(psi)
Estado Inestable				
1	0	0	20	0
2	5	0,12	20	3
3	10	0,12	20	2,5
4	15	0,08	20	4,2
5	20	0,15	20	4,3
6	25	0,2	20	4,5
7	30	0,16	20	5,5
8	35	0,18	20	6,3
9	40	0,3	20	10,5
10	45	0,31	20	10
11	50	0,34	20	11
12	55	0,3	20	11,5
13	60	0,28	20	10
14	65	0,33	20	10
15	70	0,33	20	11
16	75	0,3	20	12
Estado Estable				
1	80	0,35	20	11
2	85	0,3	20	11
3	90	0,31	20	10
4	95	0,33	20	11
5	100	0,3	20	10

Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

Condensado del primer efecto y presión de la calandria del segundo efecto en estado inestable (Práctica C)

Corrida	Tiempo de operación	Flujo másico de condensado del primer efecto		Presión de calandria del segundo efecto
		Masa de condensado	Tiempo	
	(min)	(kg)	(s)	(psi)
Estado Inestable				
1	0	0	0	0
2	5	0	20	0
3	10	0	20	0
4	15	0	20	0
5	20	0,04	20	0,5
6	25	0,12	20	0,5
7	30	0,1	20	2
8	35	0,07	20	2,5
9	40	0,09	20	4
10	45	0,09	20	4,5
11	50	0,11	20	5
12	55	0,17	20	5
13	60	0,28	20	4,5
14	65	0,25	20	5,5
15	70	0,3	20	4,5
16	75	0,28	20	5
Estado Estable				
1	80	0,3	20	5
2	85	0,29	20	6
3	90	0,27	20	6
4	95	0,31	20	6
5	100	0,29	20	5

Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

**Condensado del Segundo efecto, alimentación de agua, presión de vacío
y Temperaturas de evaporadores (Práctica C)**

Corrida	Tiempo de operación (min)	Alimentación de agua al evaporador UnRot	Presión de vacío inHg	Temperatura	
				Primer efecto (F)	Segundo efecto (F)
Estado Inestable					
1	0	0	0	75	75
2	5	0	0	75	75
3	10	0	0	80	75
4	15	0	0	110	75
5	20	0	0	175	75
6	25	140	0	189	80
7	30	140	2	195	115
8	35	70	2	198	159
9	40	45	2	198	175
10	45	35	4	198	185
11	50	35	4	200	194
12	55	200	6	205	195
13	60	50	7,5	210	198
14	65	155	7,5	210	200
15	70	140	8	212	200
16	75	150	9	212	200
Estado Estable					
1	80	185	9	212	200
2	85	180	9	212	200
3	90	180	9	212	200
4	95	175	9	212	200
5	100	190	9	212	200

Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

APENDICE 6

EVALUACIÓN DIDÁCTICA DE LA PRÁCTICA

Se realizó la evaluación didáctica de la práctica a través de un cuestionario, el cual fue respondido por el grupo conformado de 36 alumnos que formaron parte del Curso de Laboratorio de Ingeniería Química Uno en el primer semestre del 2011.

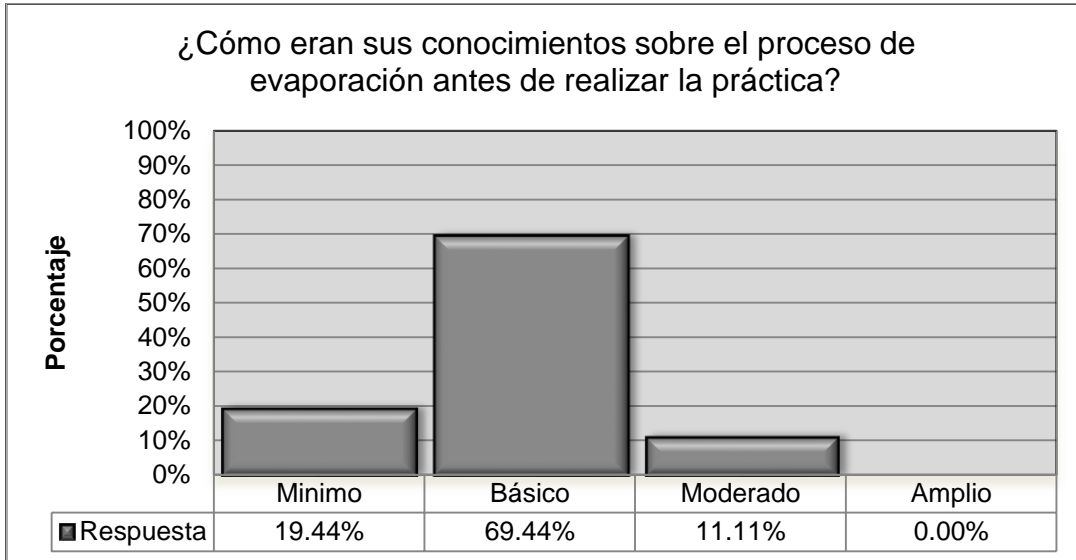
5.5.1. Objetivos de la evaluación

1. Conocer de manera cualitativa la calidad de aprendizaje en el desarrollo de la práctica experimental.
2. Examinar la aplicación didáctica del equipo utilizado en la experimentación.
3. Conocer la importancia de la realización de la práctica en la formación del estudiante de Ingeniería Química.

5.5.2. Resultados de la evaluación

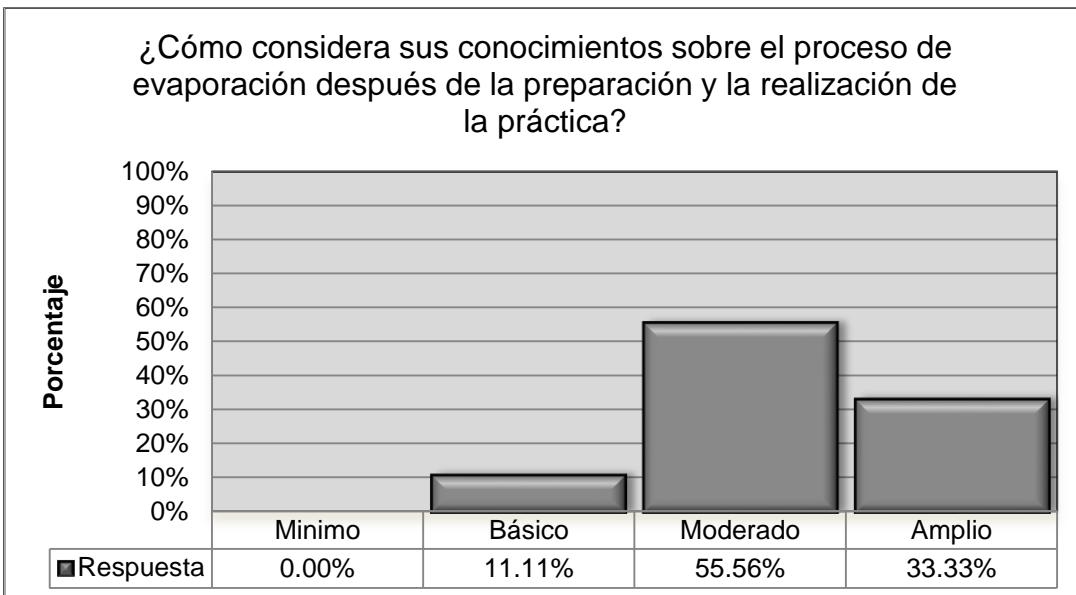
A continuación se representan a través de gráficos los resultados obtenidos en la evaluación realizada.

Conocimientos sobre el proceso de evaporación antes de la realización de la práctica



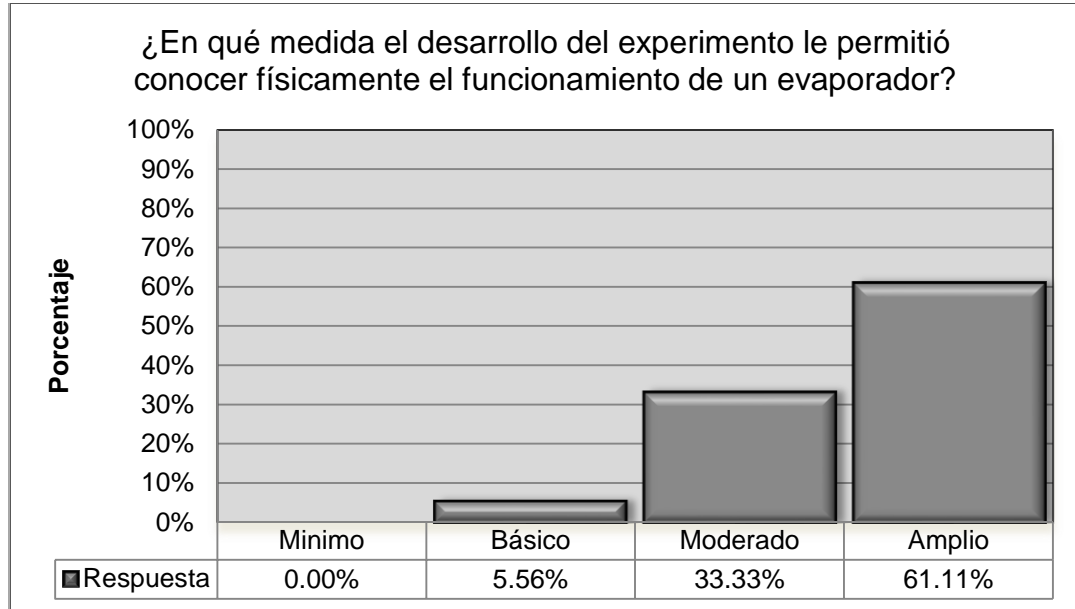
Fuente: Resultados de la evaluación.

Conocimientos sobre el proceso de evaporación después de la preparación y realización de la práctica



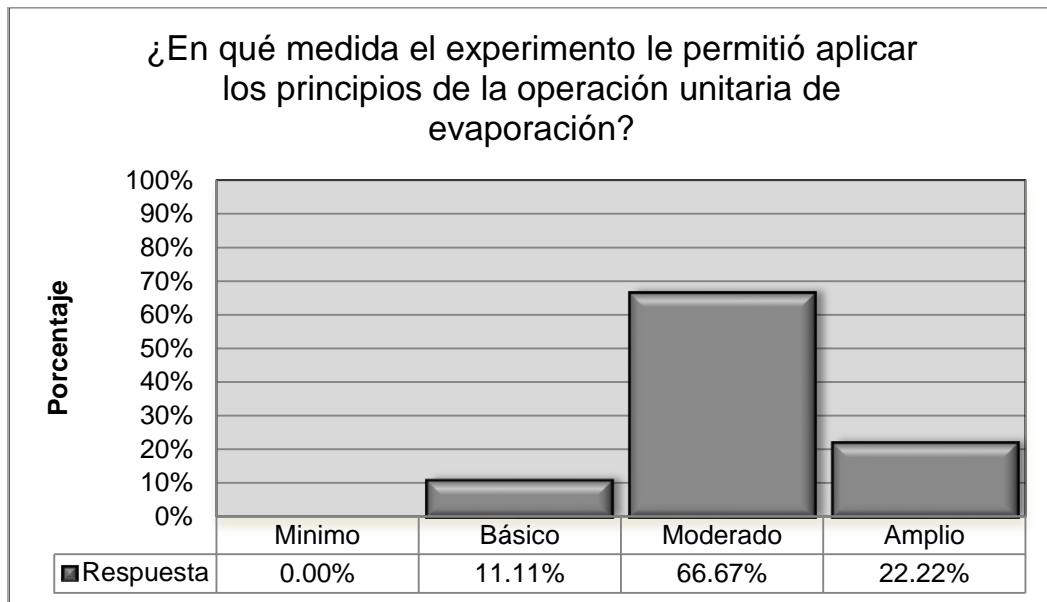
Fuente: Resultados de la evaluación.

Conocimiento sobre el funcionamiento de un evaporador



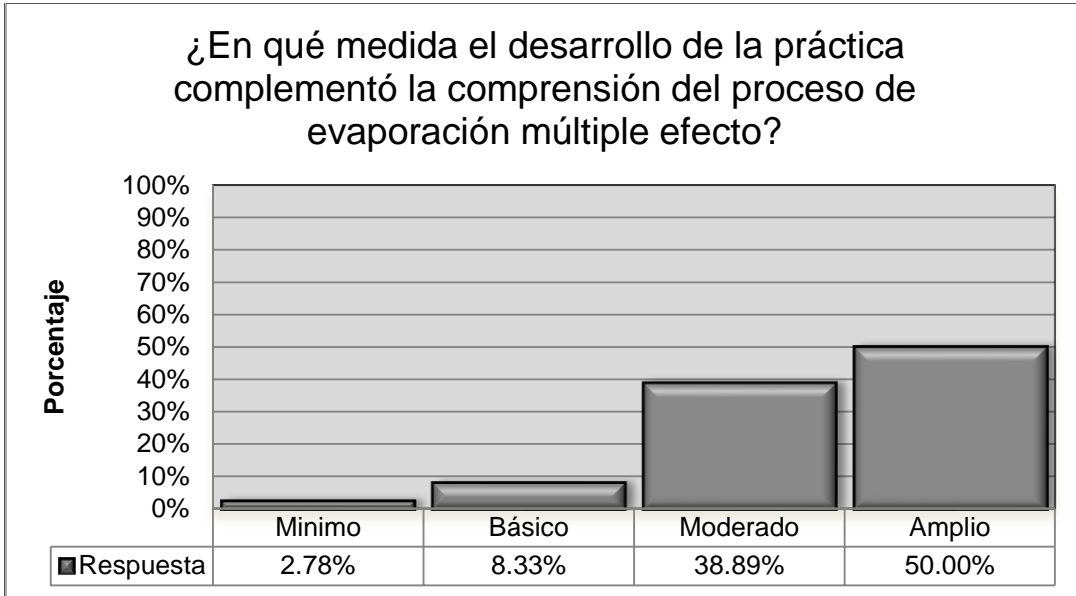
Fuente: Resultados de la evaluación.

Aplicación de los principios de la operación unitaria de evaporación



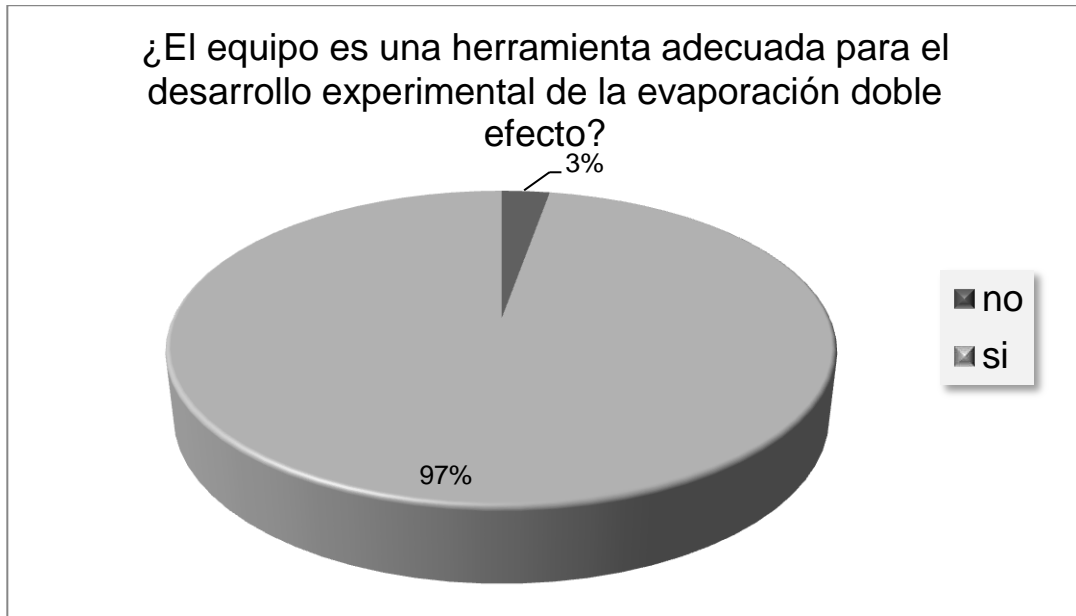
Fuente: Resultados de la evaluación.

Comprensión del proceso de evaporación en el desarrollo de la práctica



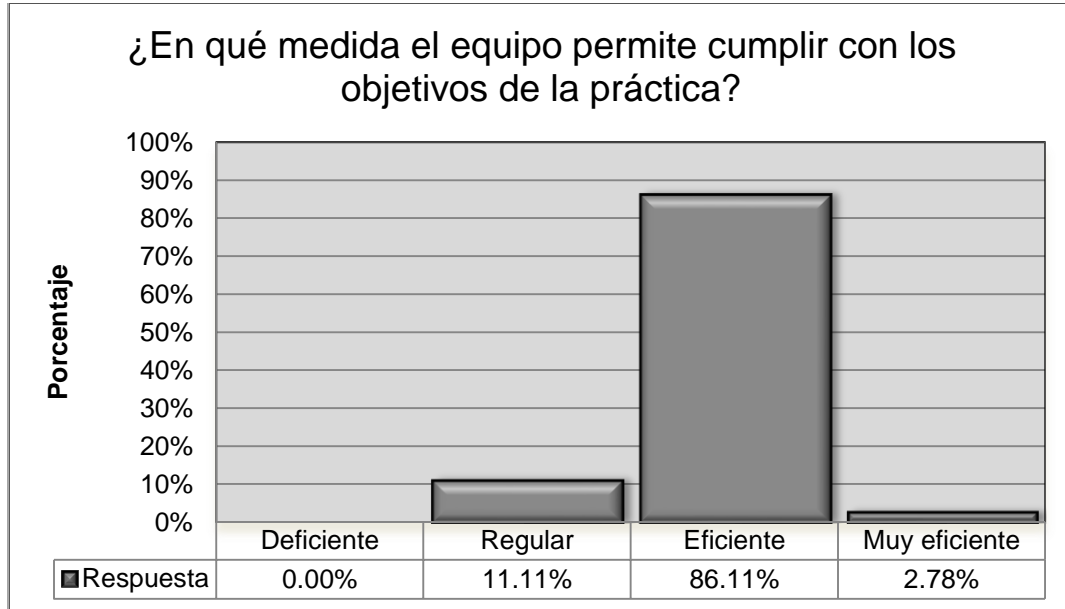
Fuente: Resultados de la evaluación.

Funcionamiento del equipo para el desarrollo del experimento



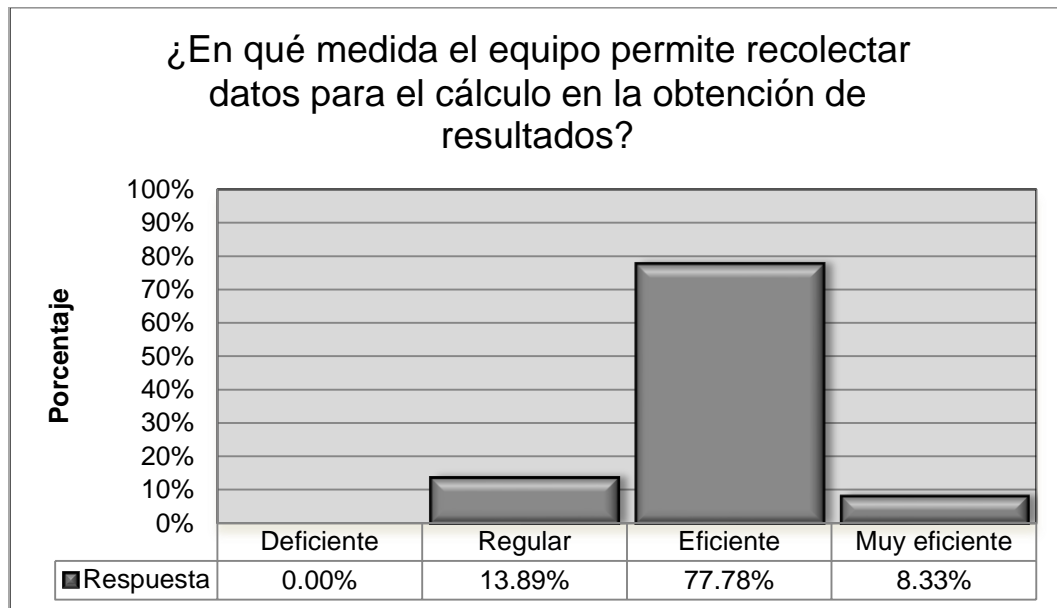
Fuente: Resultados de la evaluación.

Cumplimento de los objetivos de la práctica utilizando el equipo



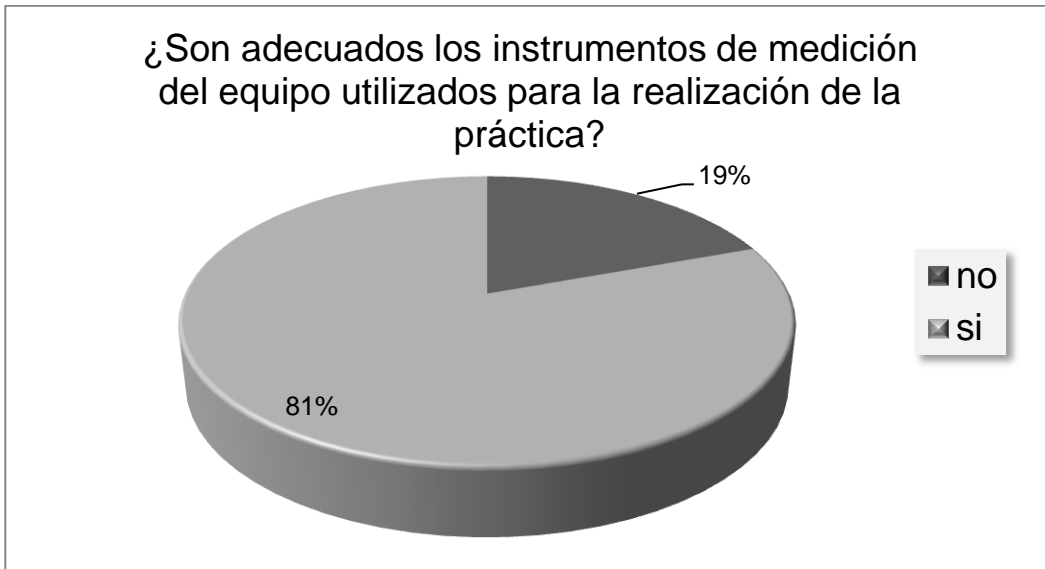
Fuente: Resultados de la evaluación.

Recolección de datos utilizando el equipo



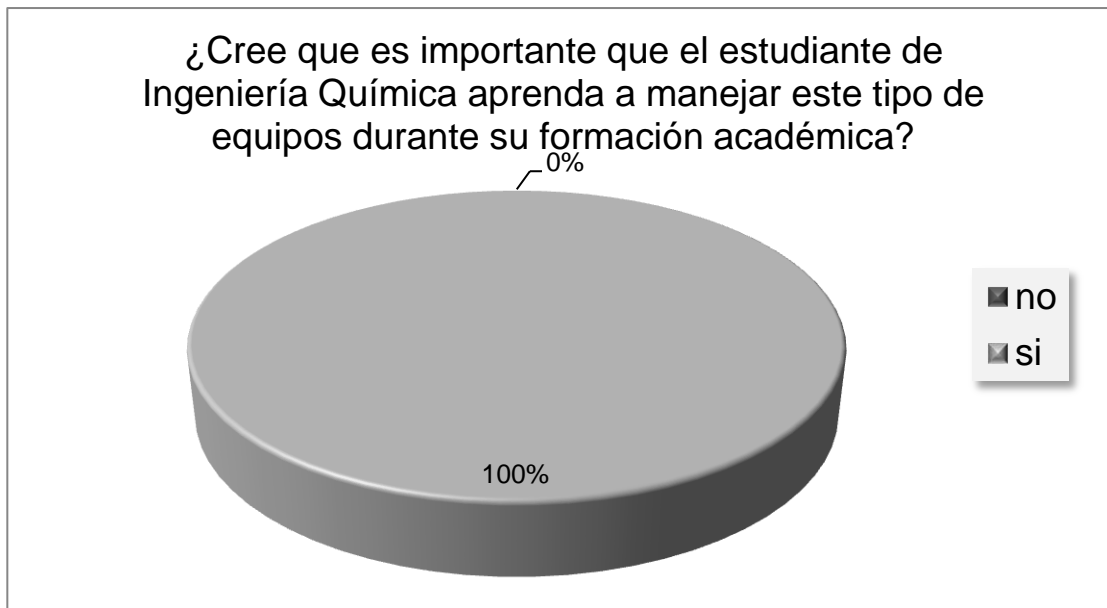
Fuente: Resultados de la evaluación.

Funcionamiento de los instrumentos de medición en la realización de la práctica



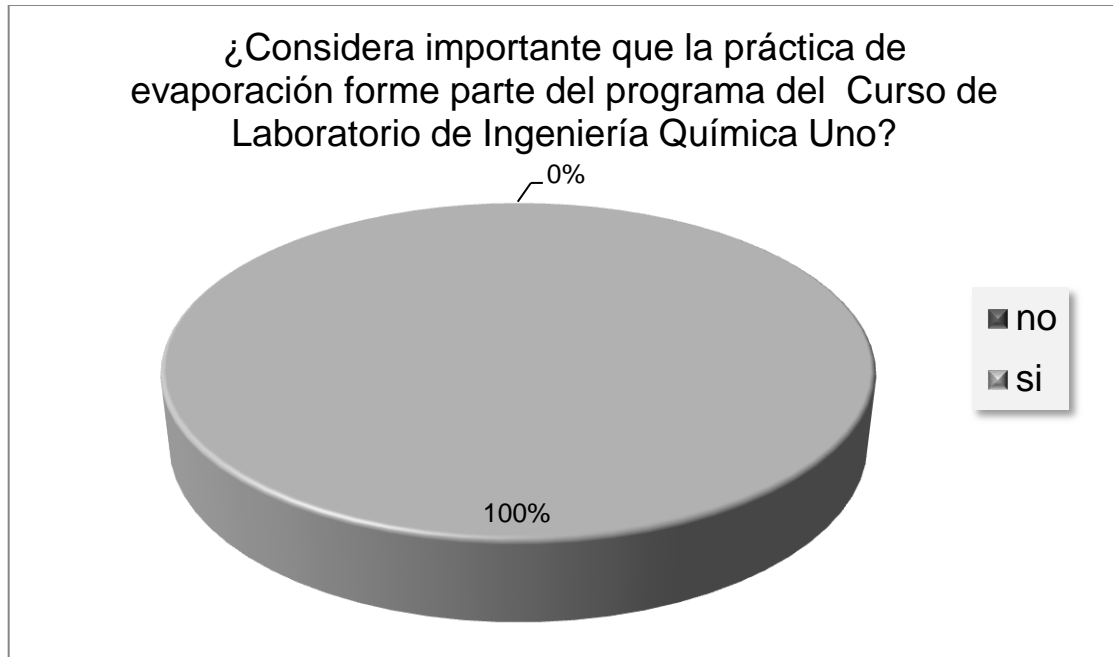
Fuente: Resultados de la evaluación.

Importancia de la realización de la práctica de evaporación



Fuente: Resultados de la evaluación.

Importancia de la práctica en el programa del curso

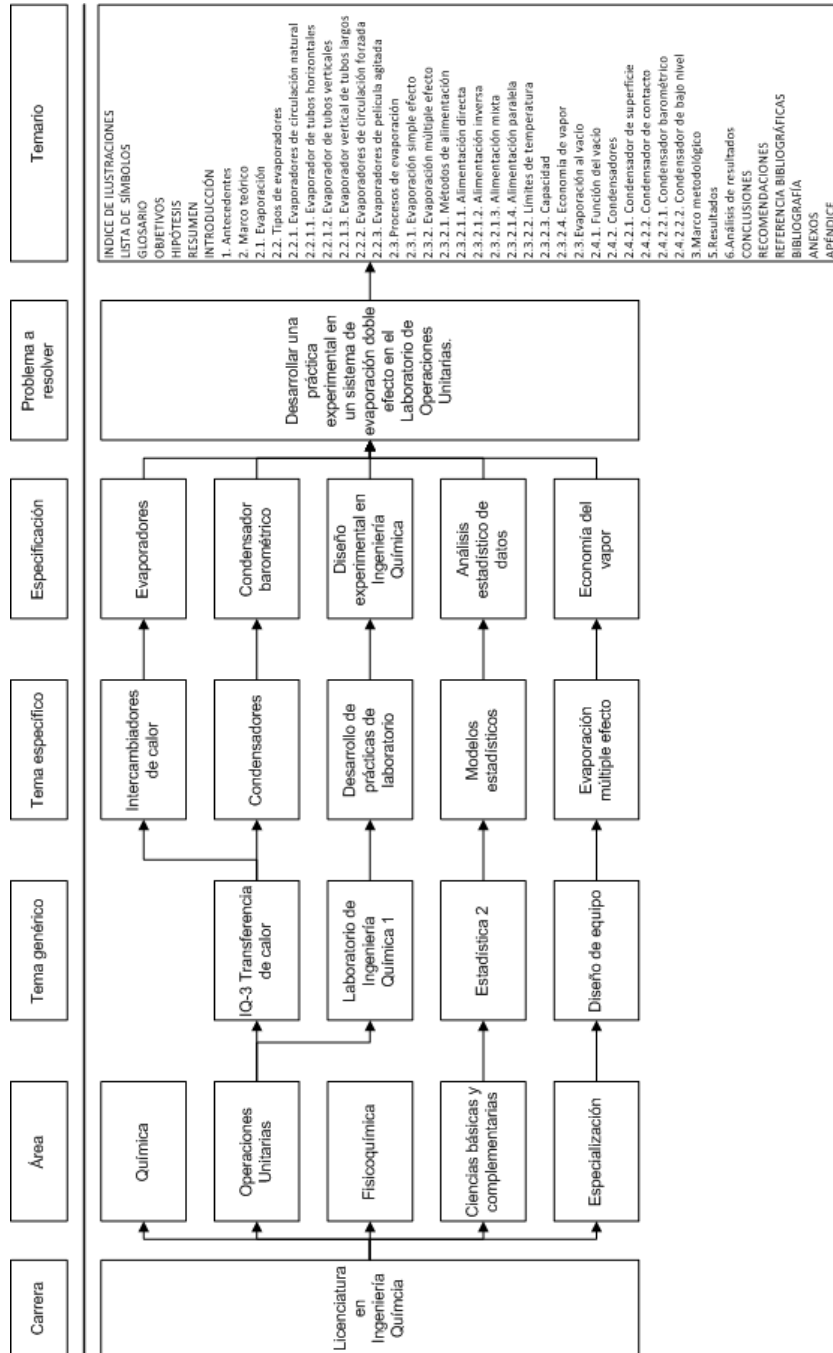


Fuente: Resultados de la evaluación.

ANEXO 1

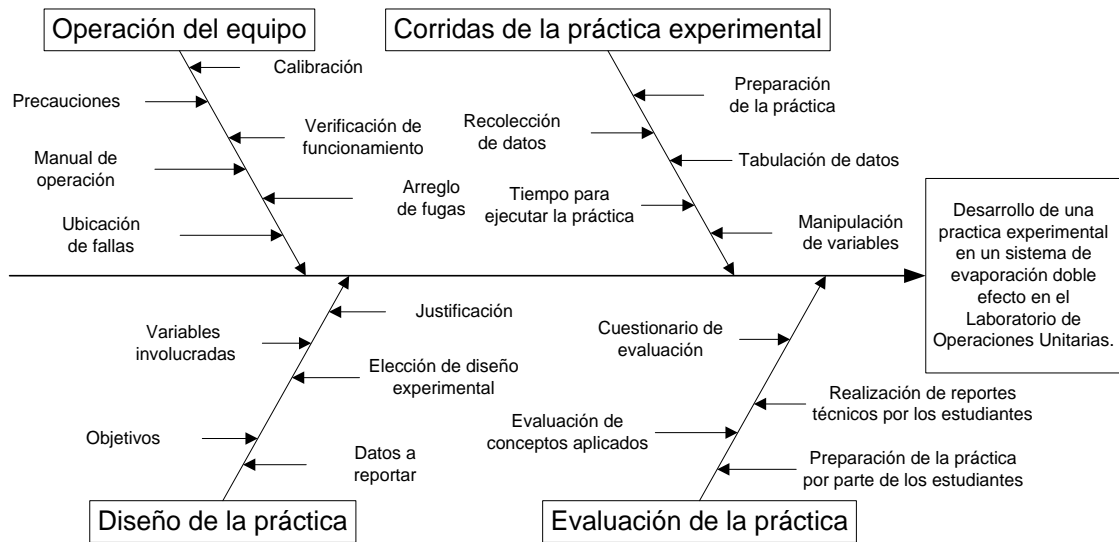
TABLA DE REQUISITOS ACADÉMICOS

Tabla de requisitos académicos



ANEXO 2 DIAGRAMA CAUSA Y EFECTO

Diagrama de causa y efecto



ANEXO 3
FOTOS DEL EQUIPO

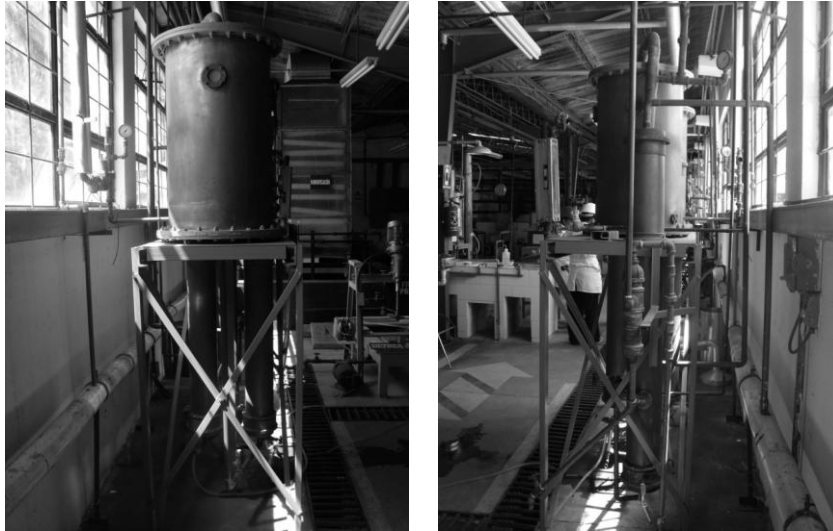
Vistas de la unidad de evaporación doble efecto

Vista frontal del equipo



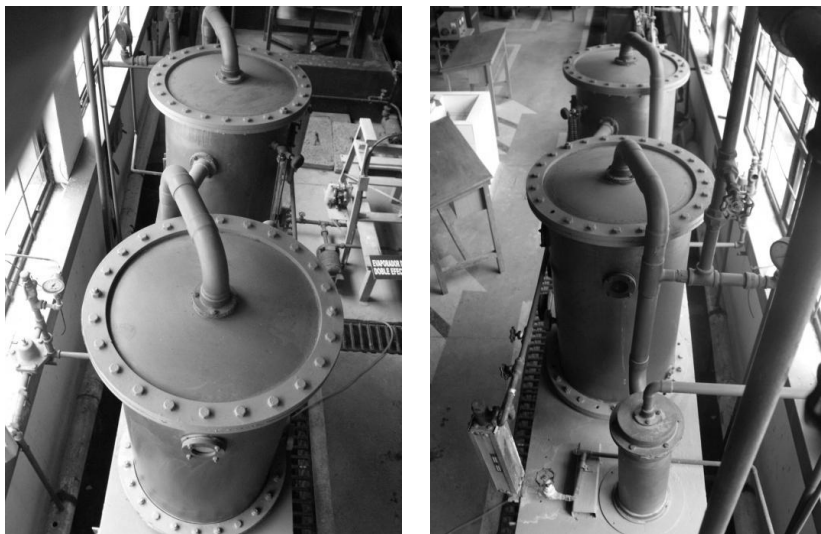
Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

Vistas laterales del equipo



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

Vistas superiores del equipo



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

Componentes Principales

Separadores o cuerpos de los evaporadores

Primer efecto



Segundo efecto



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

Intercambiadores de Calor

Calandrias



Condensador de superficie



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

Condensador Barométrico



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

Componentes auxiliares

Trampas de vapor



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

Intercambiadores de tubos concéntricos



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

Tanque principal del laboratorio



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

Tanque de descarga del condensador barométrico



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

Rotámetro



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

Manómetros



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

Termómetro de carátula



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

Vacuómetro



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.