



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

**DISEÑO DE UNA PRÁCTICA EXPERIMENTAL PARA EL MONITOREO
DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR
DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS**

Ana Rufina Herrera Soto

Asesorado por el Ing. José Manuel Tay Oroxom

Guatemala, septiembre de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UNA PRÁCTICA EXPERIMENTAL PARA EL MONITOREO
DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR
DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ANA RUFINA HERRERA SOTO

ASESORADO POR EL ING. JOSÉ MANUEL TAY OROXOM

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León de Paz
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**DISEÑO DE UNA PRÁCTICA EXPERIMENTAL PARA EL MONITOREO
DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR
DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS.**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 30 de abril de 2013.



Ana Rufina Herrera Soto



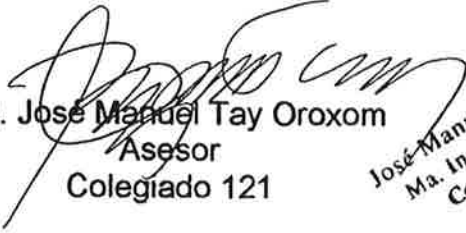
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 30 de abril de 2014

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

Ingeniero Monzón:

Me dirijo a usted para comunicarle que he revisado y aprobado el informe final titulado: **DISEÑO DE UNA PRÁCTICA EXPERIMENTAL PARA EL MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS**, de la estudiante Ana Rufina Herrera Soto. Atentamente,


Ing. José Manuel Tay Oroxom
Asesor
Colegiado 121

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

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



Guatemala, 05 de agosto de 2014
Ref. EIQ.TG-IF.024.2014

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

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **047-2013** 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 la estudiante universitaria: **Ana Rufina Herrera Soto**.
Identificada con número de carné: **2009-15196**.

Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.

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 DE UNA PRÁCTICA EXPERIMENTAL PARA EL MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **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. Jorge Mario Estrada Asturias
COORDINADOR DE TERNA

Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.180.2014

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 de la estudiante, **ANA RUFINA HERRERA SOTO** titulado: "**DISEÑO DE UNA PRÁCTICA EXPERIMENTAL PARA EL MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.


 Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
 DIRECTOR
 Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, septiembre 2014

CC: Archivo
 VMM/ida

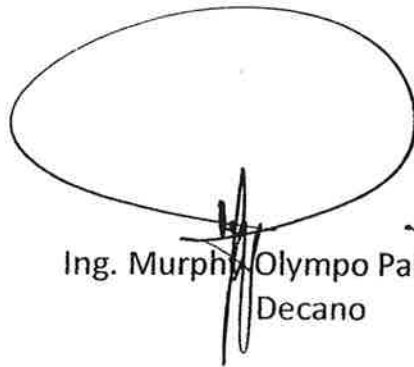




DTG. 483.2014

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 DE UNA PRÁCTICA EXPERIMENTAL PARA EL MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS**, presentado por la estudiante universitaria **Ana Rufina Herrera Soto**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 18 de septiembre de 2014

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por guiar mis pasos.
Mi papá	Felipe Herrera (q.e.p.d.), por haberme enseñado que solo Dios es perfecto.
Mi abuela	Berta Arévalo (q.e.p.d.), por su amor incondicional.
Mi mamá	Elizabeth Soto, porque este camino lo hemos recorrido juntas.
La familia Tecú Soto	Porque siempre han estado a mi lado apoyándome.
Mis amigos	Francia Castillo, José Leppe, Ivonne Soto, Ana Urbina, Alejandrina Tórtola y Dulce Prado.
Mi tía	Margarita Tórtola.
Mi maestra	Claudia Segura.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por abrirme las puertas para realizarme como profesional.
Facultad de Ingeniería	Por darme la oportunidad de desarrollar mis habilidades para convertirme en una ingeniera.
Mi mamá	Elizabeth Soto, porque sin su apoyo, ayuda y paciencia jamás habría salido adelante.
Mi familia	Vinicio Soto y la familia Tecú Soto, por su apoyo incondicional.
Ing. Manuel Tay	Por haberme enseñado el verdadero significado de la palabra ingeniería.
Laboratorio Dra. Alba Tabarini	A su personal por su ayuda y apoyo para realizar este proyecto.
Laboratorio Físicoquímica ESIQ	A su personal por haberme dado la oportunidad de dar mis primeros pasos como profesional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
Hipótesis	XVI
INTRODUCCIÓN	XVII
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Calidad del agua de alimentación a las calderas.....	5
2.2. Análisis de calidad del agua	6
2.2.1. Índice de Langelier	7
2.3. Monitoreo de la calidad del agua.....	8
2.3.1. Monitorear.....	8
2.3.2. Indicadores para el monitoreo de la calidad del agua de alimentación a los sistemas de generación de vapor	10
2.3.3. Requerimientos para el muestreo del agua para alimentación de calderas	10
2.3.4. Frecuencia de muestreo	11
2.4. Pedagogía activa	11
2.4.1. Métodos activos.....	11
2.4.2. Métodos productivos.....	12

2.5.	Métodos didácticos utilizados en la enseñanza de ciencias.....	12
2.6.	Recurso didáctico.....	13
2.6.1.	Actividades prácticas.....	13
2.6.2.	Examen	13
2.6.3.	Encuesta	14
2.7.	Ingeniería didáctica	14
2.7.1.	Análisis preliminares	14
2.7.2.	Concepción y análisis a priori de las situaciones didácticas	15
2.7.3.	Experimentación.....	15
2.7.4.	Análisis a posteriori y evaluación	15
2.8.	Currículo.....	16
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	17
3.1.	Variables	17
3.2.	Delimitación de campo de estudio	18
3.3.	Recursos humanos disponibles	18
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	19
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa.....	21
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	22
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	24
3.7.1.	Tabulación de la información y ordenamiento de la información.....	24
3.7.2.	Procesamiento de la información	25
3.7.2.1.	Procedimiento analítico	25
3.7.2.2.	Preparación de la práctica.....	27
3.7.2.3.	Implementación de la práctica.....	28
3.8.	Análisis estadístico.....	29

3.8.1.	Primera etapa: procedimiento analítico	29
3.8.1.1.	Determinación del tamaño de la muestra.....	29
3.8.1.2.	Determinación del promedio	31
3.8.2.	Segunda etapa: desarrollo de la práctica	32
3.8.2.1.	Determinación del tamaño de la muestra.....	32
3.8.3.	Tercera etapa: implementación de la práctica	34
3.8.3.1.	Elección de exámenes cortos que forman parte de la muestra.....	34
3.8.3.2.	Promedio de nota de los exámenes cortos.....	34
3.8.3.3.	Determinación de la desviación estándar.....	35
3.8.3.4.	Coeficiente de variación	37
3.8.3.5.	Determinación del intervalo de confianza para la población	38
3.8.3.6.	Prueba de hipótesis.....	39
4.	RESULTADOS	41
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	61
	CONCLUSIONES	67
	RECOMENDACIONES	69
	BIBLIOGRAFÍA.....	71
	APÉNDICES	73
	ANEXO	125

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Análisis de la información para diagnosticar el estado del sistema.....	26
2.	Preparación de las herramientas pedagógicas	27
3.	Procesamiento de la información obtenida de la práctica	28
4.	Comparación de las notas promedio.....	43
5.	Comparación del coeficiente de variación para las calificaciones de los exámenes cortos realizados antes y después de llevar a cabo la práctica.....	44
6.	Pregunta 1.1.....	45
7.	Pregunta 2.1.....	45
8.	Pregunta 3.1.....	46
9.	Pregunta 4.1.....	46
10.	Pregunta 6.1.....	47
11.	Pregunta 8.1.....	48
12.	Pregunta 1.1.....	49
13.	Pregunta 2.1.....	49
14.	Pregunta 3.1.....	50
15.	Pregunta 4.1.....	50
16.	Pregunta 6.1.....	51
17.	Pregunta 8.1.....	52
18.	Pregunta 1.2.....	53
19.	Pregunta 2.2.....	53
20.	Pregunta 3.2.....	54
21.	Pregunta 4.2.....	54

22.	Pregunta 1.2	56
23.	Pregunta 2.2	56
24.	Pregunta 3.2	57
25.	Pregunta 4.2	57

TABLAS

I.	Antecedentes	2
II.	Componentes que pueden perjudicar a las calderas	6
III.	Interpretación del Índice de Langelier	7
IV.	Criterios para la selección de indicadores	9
V.	Clasificación de variables	18
VI.	Equipo instalado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.....	19
VII.	Recursos materiales para la recolección de la información	20
VIII.	Clasificación de técnicas de evaluación	21
IX.	Procedimientos para la recolección de la información	23
X.	Tabulación de la información	24
XI.	Tamaño de la muestra para el procedimiento analítico.....	31
XII.	Tamaño de la muestra de alumnos	33
XIII.	Concentración de calcio, Índice de Langelier promedio e interpretación	41
XIV.	Calificación del examen de conocimientos teóricos previo a la realización de la práctica.....	42
XV.	Calificación del examen de conocimientos teóricos posterior a la realización de la práctica.....	42
XVI.	Comprobación de la hipótesis	43
XVII.	Pregunta 5.1	47
XVIII.	Pregunta 7.1	47
XIX.	Pregunta 5.1	51

XX.	Pregunta 7.1	52
XXI.	Pregunta 5.2	55
XXII.	Pregunta 6.2	55
XXIII.	Pregunta 5.2	58
XXIV.	Pregunta 6.2	58
XXV.	Clasificación de las preguntas realizadas en las encuestas	58

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$z^2_{a/2}$	Área bajo la curva normal
γ_D	Coeficiente de actividad de los iones divalentes
γ_m	Coeficiente de actividad de los iones monovalentes
Z	Coeficiente de oxidación de las especies químicas
C_v	Coeficiente de variación
HCO_3^-	Concentración del ion bicarbonato
Ca^{+2}	Concentración de iones de calcio
Q	Concentración de la solución de ácido sulfúrico
Y	Concentración de la solución de EDTA utilizada en la titulación
D	Constante dieléctrica del agua
s	Desviación estándar de la muestra, probabilidad de ocurrencia
s	Desviación estándar de la población, error estándar
e	Error por estimación
I	Fuerza iónica
V	Grados de libertad
I_L	Índice de Langelier
x	Media aritmética de la muestra
μ	Media aritmética de la población
N_c	Nivel de confianza
a	Nivel de significancia
pH	Potencial de hidrógeno

pK_s	Potencial de la constante de actividad
pH_s	Potencial de saturación de carbonatos y calcio
p	Probabilidad de éxito u ocurrencia
S_{TD}	Sólidos totales disueltos
n	Tamaño de la muestra
n*	Tamaño de la muestra sin ajustar
N	Tamaño de la población
T	Temperatura
t	Valor de t de <i>Student</i>
H	Volumen de EDTA gastado en una titulación
V	Volumen de la muestra
P	Volumen gastado de ácido sulfúrico en la titulación

GLOSARIO

Ablandador	Equipo utilizado para el acondicionamiento del agua por medio de un intercambio iónico entre los iones de una zeolita y los solutos presentes en el agua.
Agua cruda	Agua que no ha sido trata para eliminar los solutos con los que pueda estar contaminada.
Agua de alimentación	Agua que ingresa al sistema de generación de vapor.
Conocimientos teóricos	Conocimientos que los estudiantes han obtenido durante su formación profesional.
Coefficiente de variación	Razón entre la desviación estándar y la media aritmética que representa la variabilidad de los datos de una muestra analizados bajo un mismo tratamiento.
Generador de vapor	Equipo que se utiliza a nivel industrial para generar vapor a partir del calentamiento del agua.
Evaporación	Paso del estado líquido al estado gaseoso.
Índice de Langelier	Indicador de la concentración y equilibrio de carbonatos en el agua.

Intercambio iónico	Fenómeno de transporte en el cual un sólido y un fluido intercambian iones.
Monitoreo de la calidad del agua	Medir y registrar los parámetros físicos y químicos que sirven para determinar la calidad del agua.
Parámetros físicos y químicos	Análisis de propiedades físicas y químicas del agua. Los parámetros evaluados para determinar el Índice de Langelier son: alcalinidad, dureza de calcio, conductividad eléctrica, potencial de hidrógeno y temperatura.
Percepción cualitativa	Opinión de los alumnos sobre la práctica.
Zeolita	Mineral aluminosilicato cuyas propiedades permiten utilizarlo para realizar filtraciones o intercambios iónicos.

RESUMEN

El informe contiene los resultados de la investigación que se realizó para diseñar una práctica para que los estudiantes de los Laboratorios de Ingeniería Química 1 y 2 aprendieran a monitorear la calidad del agua, que se alimenta al sistema de generación de vapor instalado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

En la primera etapa del trabajo de investigación, se evaluó el estado del sistema de acondicionamiento del agua que ingresa a la caldera del laboratorio, constituido por un ablandador de zeolitas de sodio. Por medio de análisis físicos y químicos se determinó el valor del Índice de Langelier del agua, a la entrada y a la salida del ablandador y se compararon sus magnitudes, determinando que el ablandador cumplía con su función, disminuyendo la concentración de los iones de calcio en el agua y la magnitud del Índice de Langelier, sin embargo, el agua que ingresa a la caldera es altamente corrosiva.

En la siguiente etapa se diseñó la práctica para los estudiantes. Se redactó un manual, donde se plantearon los objetivos de la práctica y se describieron los fundamentos teóricos y los procedimientos que se llevarían a cabo para realizar un análisis físico y químico del agua, que permitiera determinar el Índice de Langelier, para evaluar la potencialidad incrustante o corrosiva del agua que se alimenta a la caldera del laboratorio. Sin embargo, antes de realizar la práctica, se evaluaron los conocimientos teóricos de los alumnos sobre el tema y su percepción cualitativa de la importancia del monitoreo de la calidad del agua que se utiliza para la generación de vapor.

A partir de estas evaluaciones se determinó que los alumnos no contaban con los conocimientos teóricos necesarios para determinar el Índice de Langelier y evaluar la eficacia del sistema de acondicionamiento de agua.

Las encuestas de percepción cualitativa mostraron que no todos los estudiantes valoraban el monitoreo de la calidad del agua de alimentación a un sistema de generación vapor, como parte importante de un plan de mantenimiento preventivo del equipo.

Posteriormente a realizar la práctica diseñada con los estudiantes, se evaluó de nuevo sus conocimientos teóricos. A partir de los resultados obtenidos en esta evaluación se determinó que la práctica diseñada ayudó a incrementar los conocimientos de los alumnos de ambos cursos sobre el tema. Luego de llevar a cabo la práctica, los estudiantes reconocieron la importancia de este tipo de monitoreo.

A partir de la primera parte de la investigación se concluyó que, aunque el ablandador de zeolitas instalado cumple con su función, pues disminuye la concentración de iones de calcio en el fluido, el agua que ingresa a la caldera es corrosiva. En el caso de la realización de la práctica de monitoreo de la calidad del agua con los estudiantes, se concluyó que realizar una práctica de esta naturaleza incrementa sus conocimientos sobre el tema y cambia su percepción cualitativa, creando conciencia en ellos sobre la importancia del monitoreo de la calidad del agua de alimentación a los sistemas de generación de vapor.

OBJETIVOS

General

Diseñar una práctica experimental que permita a los alumnos aprender a monitorear la calidad del agua de alimentación de un sistema de generación de vapor.

Específicos

1. Diagnosticar el estado del sistema de alimentación del agua de la caldera del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
2. Evaluar la calidad del agua de alimentación a la caldera por medio de análisis fisicoquímicos que se rigen por las orientaciones del libro: *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*.
3. Desarrollar una práctica en la cual los estudiantes monitoreen la calidad del agua de alimentación a la caldera siguiendo las indicaciones del manual elaborado para tal propósito.
4. Llevar a cabo la práctica con un grupo control de estudiantes de los Laboratorios de Ingeniería Química 1 y 2, durante el segundo semestre del 2013, para evaluar la eficacia de la práctica, y establecer el sistema

de monitoreo de calidad de agua de alimentación de la caldera del laboratorio.

Hipótesis

Si se diseña una práctica de monitoreo de la calidad del agua de alimentación al sistema de generación de vapor, del Laboratorio de Operaciones Unitarias, entonces los alumnos de los cursos de Laboratorio de Ingeniería Química 1 y 2 podrían integrar sus conocimientos de Química Analítica y Operaciones Unitarias para evaluar la calidad del agua de alimentación a dicho sistema.

Hipótesis nula:

La práctica no mejora los conocimientos de los alumnos.

Hipótesis alternativa:

La práctica mejora los conocimientos de los alumnos.

INTRODUCCIÓN

El agua que se alimenta a los sistemas de generación de vapor debe de ser tratada para evitar que los compuestos que se encuentran disueltos en este líquido dañen la estructura de las calderas y sus accesorios. Sin embargo, el acondicionamiento del agua de alimentación no es suficiente para prevenir que el agua dañe los equipos, también es necesario llevar a cabo un monitoreo de la calidad de este líquido. Implementar un de monitoreo de la calidad del agua, como parte del plan de mantenimiento preventivo de las calderas, tiene como resultado alargar la vida útil de estos equipos, ahorrar dinero y mejorar la calidad del vapor producido.

Para el caso de la caldera instalada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, de la Escuela de Ingeniería Química, se ha diseñado una práctica en la cual los estudiantes de los cursos de Laboratorio de Ingeniería Química 1 y 2 puedan monitorear la calidad del agua de alimentación a la caldera, llevando a cabo análisis fisicoquímicos que les permitan determinar el valor del Índice de Langelier, cuya magnitud permite clasificar al agua como incrustante o corrosiva en función de su concentración de carbonato de calcio. Antes de realizar esta actividad con los alumnos, se evaluó la calidad del agua que se alimenta al sistema y el estado del sistema de acondicionamiento del agua, el cual está constituido por un ablandador de zeolitas de sodio.

A continuación, se procedió a redactar un manual en el cual se plantearon los objetivos de la práctica que llevarían a cabo los alumnos y las instrucciones y fundamentos teóricos necesarios para que llevaran a cabo las evaluaciones necesarias para determinar el Índice de Langelier y evaluaran la efectividad

del equipo de acondicionamiento. Sin embargo, antes de poner a disposición de los alumnos el manual, se llevó a cabo una evaluación de sus conocimientos teóricos y una encuesta de su percepción cualitativa sobre el tema. Posteriormente, se realizó la práctica y se evaluó de nuevo los conocimientos de los alumnos y su percepción cualitativa. Los resultados de dichas evaluaciones permitieron determinar si la práctica diseñada ayudó a mejorar los conocimientos de los alumnos sobre el tema planteado.

1. ANTECEDENTES

Existen diversos tipos de investigaciones que constituyen antecedentes para la que se presenta en este informe. Estas investigaciones se pueden clasificar según el tema que analizar de la siguiente forma:

- Evaluación de la calidad del agua
- Calidad del agua para uso industrial
- Acondicionamiento del agua para uso industrial
- Mantenimiento de equipo
- Desarrollo de práctica con fines didácticos

Las investigaciones dedicadas a la evaluación de la calidad del agua para consumo humano e industrial se enfocan en el análisis de este líquido por medio de la determinación del Índice de Langelier. Por otra parte, las investigaciones orientadas al acondicionamiento del agua para uso industrial y al mantenimiento de equipo como calderas o torres de enfriamiento, solamente se enfocan en la evaluación y reparación de los equipos instalados. Ninguna investigación consultada presenta una combinación entre el concepto de la evaluación del agua con el concepto de mantenimiento preventivo de los equipos. Respecto a la parte didáctica de la investigación existen trabajos de graduación dedicados al diseño de prácticas experimentales que los alumnos pueden desarrollar en las instalaciones del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Tabla I. Antecedentes

Nombre del investigador	Título de la investigación	Año de publicación	Tema principal
Alfredo Andrade López	<i>Mantenimiento preventivo para calderas y circuitos de refrigeración en función del tratamiento del agua de alimentación.</i>	2005	Mantenimiento de equipo
Byron Gramajo Cifuentes	<i>Determinación de la calidad del agua para consumo humano y uso industrial, obtenida de pozos mecánicos en la zona 11, Mixco, Guatemala.</i>	2004	Calidad del agua
Marco Villar Alvarado	<i>Determinación cuantitativa de la agresividad y la dureza total del agua subterránea de uso industrial, en el área Metropolitana de Guatemala (región i), a través del Índice de Langelier considerando iones ajenos al sistema carbonato.</i>	2008	Calidad del agua, Índice de Langelier.
Carlos Morales Chávez	<i>Diseño experimental para la operación de un sistema de evaporación doble efecto ubicado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.</i>	2012	Desarrollo de práctica con fines didácticos
Erick Cifuentes Pérez	<i>Análisis y rehabilitación del ablandador de agua para el Laboratorio de Ingeniería Química.</i>	2007	Acondicionamiento de agua para uso industrial
Rita Solórzano Ponce	<i>Determinación de la calidad del agua para consumo humano y uso industrial proveniente de la planta de tratamiento la Carbonera, municipio de Sanarate, departamento de El Progreso, Guatemala.</i>	2005	Calidad del agua
María Montserrat Suasnávar Gavilán	<i>Determinación de la calidad del agua de los laboratorios de la Universidad de San Carlos de Guatemala y sus posibles tratamientos.</i>	2000	Calidad del agua
Aura Leticia López López	<i>Determinación de la calidad del agua de los tanques de distribución para uso industrial que suministra la Empresa Municipal de Agua en la ciudad de Guatemala.</i>	2000	Calidad del agua para uso industrial

Continuación de la tabla I.

Oscar Alfonso de León Marizuya	<i>Determinación de la calidad de agua para uso industrial proveniente de la planta de bombeo Ojo de Agua.</i>	2002	Calidad de agua para uso industrial
Milton Lisandro Cifuentes	<i>Determinación de los parámetros físicos, químicos y bacteriológicos, para evaluar la calidad del agua para consumo humano y su uso industrial en la población de nuevo San Carlos, Retalhuleu.</i>	1996	Calidad del agua

Fuente: elaboración propia.

2. MARCO TEÓRICO

Para generar vapor de agua a nivel industrial se utilizan equipos denominados calderas, en los cuales se provoca una reacción de combustión cuya energía exotérmica es utilizada para calentar el agua, que se alimenta al equipo en estado líquido, hasta su punto de ebullición. Esta agua de alimentación lleva disueltos una diversa cantidad de compuestos químicos, que al cambiar el fluido de estado líquido a gaseoso no se volatilizan y permanecen dentro de la caldera provocando daños en su estructura.

2.1. Calidad del agua de alimentación a las calderas

El agua que se utiliza como alimentación a los sistemas de generación de vapor idealmente debería de estar libre de solutos que pudieran dañar su estructura, sin embargo, obtener agua en dicho estado es imposible, a menos de que el líquido sea tratado para disminuir la concentración de los compuestos que pudieran provocar problemas. El sistema de acondicionamiento del agua para generación de vapor puede estar integrado por tratamientos químicos o físicos, específicos para reducir la magnitud de la concentración de los componentes perjudiciales, hasta que sus parámetros se encuentren dentro de aquellos recomendados por el fabricante del equipo.

En la siguiente tabla se enumeran los diferentes componentes que pueden ocasionar daños en la estructura de los sistemas de generación de vapor:

Tabla II. **Componentes que pueden perjudicar a las calderas**

Componentes	Efecto posible cuando se encuentra presente en agua para calderas.
Sólidos en suspensión	Arrastres, espuma, lodos, incrustación
Sílice	Incrustación
Carbonato de calcio	Incrustación
Bicarbonato de calcio	Incrustación
Sulfato de calcio	Incrustación, corrosión
Cloruro de calcio	Incrustación
Carbonato de magnesio	Incrustación
Bicarbonato de magnesio	Incrustación
Cloruro de magnesio	Incrustación, corrosión
Ácidos libres	Corrosión
Cloruro de sodio	Inerte, pero puede ser corrosivo bajo ciertas condiciones
Carbonato de sodio	Arrastres, espuma, fragilización
Bicarbonato de sodio	Arrastres, espuma, fragilización
Ácido carbónico	Corrosión
Oxígeno	Corrosión
Grasa y aceite	Corrosión, depósitos, arrastres, espuma
Materia orgánica y aguas negras	Corrosión, depósitos, arrastres, espuma

Fuente: SHEPPARD, Powell. *Acondicionamiento de aguas para la industria*. p. 2.

2.2. Análisis de calidad del agua

Para determinar la concentración de los componentes mencionados en la tabla II se pueden utilizar diversas técnicas analíticas como las titulaciones o la espectrofotometría, sin embargo, es necesario contar con un sistema que permita evaluar los efectos que estos componentes pueden provocar cuando actúan en conjunto, para ello se han desarrollado diversos tipos de relaciones matemáticas que permiten analizar la potencialidad dañina del agua de alimentación a las calderas. Entre estos métodos se encuentran: el Índice de Langelier, el Índice de Estabilidad de Ryznar y el indicador de estabilidad de Enslow.

2.2.1. Índice de Langelier

Evalúa la diferencia y el equilibrio entre el potencial de hidrógeno y la dureza de calcio y carbonatos, permitiendo determinar si el agua es incrustante o corrosiva. Matemáticamente se define como:

[Ecuación 1]

$$I_L = \text{pH} - \text{pH}_s$$

Donde:

I_L = Índice de Langelier (adimensional).

pH = potencial de hidrógeno (adimensional).

pH_s = saturación de carbonatos y calcio (adimensional).

La magnitud del Índice de Langelier se interpreta de la siguiente manera:

Tabla III. Interpretación del Índice de Langelier

Magnitud del Índice de Langelier	Significado
$-2,0 < I_L < 0,5$	Corrosión severa. Agua no saturada con respecto a carbonato de calcio, elimina láminas de carbonato de calcio que protegen las tuberías de equipos.
$-0,5 < I_L < 0$	Corrosión leve pero sin formación de incrustaciones. Agua no saturada con respecto a carbonato de calcio, elimina las láminas de Carbonato de calcio que protegen las tuberías de equipos.
$I_L = 0$	Equilibrada pero posible corrosión leve.
$0 < I_L < 0,5$	Formación leve de incrustaciones y corrosión. Agua sobresaturada de carbonato de calcio.
$0,5 < I_L < 2$	Formación de incrustaciones pero no de corrosión. Agua sobresaturada de carbonato de calcio.

Fuente: calculadora del Índice de saturación de Langelier.

www.lenntech.es/calculadoras/langelier/langelier.htm

Consulta: 23 de marzo de 2014.

Para determinar la magnitud del Índice de Langelier es necesario evaluar los siguientes parámetros en el agua:

- Potencial de hidrógeno: determinación de la concentración de iones hidronio en el agua. La evaluación del potencial de hidrógeno se puede realizar utilizando un electrodo específico para dicho fin, titulaciones o papel tornasol.
- Concentración de calcio: se evalúa mediante la titulación de la muestra de agua con EDTA.
- Alcalinidad: evaluación de la concentración de bicarbonato en el agua, por medio de una titulación con ácido sulfúrico.
- Sólidos totales disueltos: medida de la cantidad de todas las sustancias orgánicas e inorgánicas ionizadas en el agua. La evaluación de este parámetro se realiza mediante la utilización de un electrodo específico.

2.3. Monitoreo de la calidad del agua

La evaluación constante de la calidad del agua de alimentación a la caldera es una parte importante del mantenimiento de estos equipos, ayuda a mejorar los sistemas de acondicionamiento y a reducir costos por potenciales daños en la estructura de los equipos y accesorios.

2.3.1. Monitorear

Significa analizar y registrar diversos parámetros de forma rutinaria, con el objetivo de detectar posibles anomalías; esta acción puede ser utilizada para

gestionar o supervisar, analizando el avance de un proyecto, la eficacia de un programa o el estado de un sistema específico.

Un plan de monitoreo requiere la evaluación, procesamiento y registro de los datos de los insumos, programas y resultados de un proceso, además de la selección de indicadores que permitan analizar e interpretar la información obtenida.

Los indicadores constituyen un parámetro que muestra el desempeño de un programa o sistema. Al momento de elegir un indicador debe de especificarse las dimensiones de cantidad y calidad.

La siguiente tabla describe los criterios necesarios para la selección de indicadores para el diseño de un monitoreo:

Tabla IV. Criterios para la selección de indicadores

Criterio	Descripción
Válidos	Deben medir las condiciones o eventos que intentan valorar.
Fiables	Si todas las condiciones son iguales, deben producir los mismos resultados cada vez que sean utilizados para medir igual condición o evento.
Específicos	Deben medir únicamente la condición o el evento para el cual fueron diseñados.
Sensibles	Deben reflejar los cambios que ocurren en las condiciones o en los eventos.
Operacionales	Deben ser medidos con definiciones que se hayan desarrollado y probado a nivel del programa y con estándares de referencia.
Asequibles	Los costos deben de ser razonables.
Factibles	Debe ser posible la recolección de datos.
Comparables	Deben ser comparables a través del tiempo y de límites geográficos.

Fuente: CONI, Emilio. Indicadores para el monitoreo y la evaluación de las actividades de control de la tuberculosis.

www.redbioquimicasf.com.ar/bibliografia/bacterio/curso_tbc/curso_tbc_4_lectura_2.pdf.

Consulta: 23 de marzo 2014.

2.3.2. Indicadores para el monitoreo de la calidad del agua de alimentación a los sistemas de generación de vapor

Como se mencionó anteriormente existen diversas expresiones matemáticas que pueden ser utilizadas para evaluar la calidad del agua utilizada para la generación de vapor, el más utilizado es el Índice de Langelier, ya sea evaluando sus parámetros por los métodos tradicionales de análisis fisicoquímico o por medio de la implementación de monitores digitales instalados en los equipos.

2.3.3. Requerimientos para el muestreo del agua para alimentación de calderas

El sistema de tubería que conduce el agua a la caldera y al sistema de acondicionamiento debe de incorporar el equipo necesario para que se lleve a cabo el muestreo de forma adecuada, los puntos de muestreo deben de ubicarse en lugares claves en el sistema de acondicionamiento, los tubos de muestreo utilizados deben de ser lo más corto posible.

Las muestras de agua deben de ser tomadas de forma isocinética, es decir que la velocidad y dirección del flujo en el punto de muestreo deben de ser las mismas que la del líquido en el resto del equipo.

Se recomienda utilizar recipientes de HDPE de 0,001 metros cúbicos. Cada recipiente debe de ser identificado con el nombre del lugar donde se tomó la muestra, fecha, hora y número de la muestra. Antes de realizar el muestreo, el recipiente y su tapón deben de ser lavados por lo menos tres veces con el agua del punto de muestreo.

2.3.4. Frecuencia de muestreo

Según la Norma ASTM D3370 el agua tratada de manera continua o intermitente debe de ser analizada con una frecuencia tal que asegure el control de los parámetros claves para su utilización.

2.4. Pedagogía activa

Tipo de pedagogía que aparece a principios del siglo XX. La pedagogía activa busca desarrollar en el alumno habilidades críticas, democráticas y de cooperación, convirtiendo el aprendizaje en una actividad multidisciplinar en donde el maestro tiene la función de estimular el interés del alumno por aprender. Por tanto el objetivo primordial de la pedagogía activa es fomentar el aprendizaje a través del desarrollo de las capacidades creadoras del alumno, tanto de forma individual como grupal.

Los alumnos aprenden a través de actividades que les permiten observar aquello que les permite aprender, experimentando, reflexionando y analizando las implicaciones de los conocimientos adquiridos.

2.4.1. Métodos activos

Aplicación de la pedagogía activa a través de métodos en los cuales el maestro orienta al alumno para realice un trabajo a partir del cual adquirirá habilidades y herramientas que le permitirán afianzar sus conocimientos.

2.4.2. Métodos productivos

Aplicación de la pedagogía activa a través de métodos en los cuales el maestro orienta al alumno para que realice un trabajo a partir del cual adquirirá habilidades y herramientas que le permitirán afianzar sus conocimientos.

2.5. Métodos didácticos utilizados en la enseñanza de ciencias

Para llevar a cabo la enseñanza de ciencias naturales se han desarrollado diversos métodos, los cuales se llevan a cabo con el objetivo de desarrollar el pensamiento crítico en el estudiante, entre estos métodos se pueden enumerar:

- Métodos prácticos: los estudiantes participan en actividades relacionadas con los fenómenos estudiados. Estos métodos buscan la participación activa del estudiante, a través de la cual adquirirá nuevos conocimientos y afianzará los que había adquirido con anterioridad.
- Método histórico: se estudia el desarrollo histórico de los conocimientos.
- Método biográfico: se estudia la biografía de las personas que han desarrollado los conceptos que deben de aprender los estudiantes.
- Método de grupos: la clase se divide en grupos de trabajo para realizar actividades prácticas, que permiten socializar los conocimientos adquiridos, desarrollar el sentido crítico y democrático.

2.6. Recurso didáctico

Material que se utiliza en el contexto educativo para proporcionar al estudiante y al maestro las herramientas necesarias para llevar a cabo el proceso de enseñanza-aprendizaje, como por ejemplo: diagramas, cuadros comparativos y mapas conceptuales.

Un recurso didáctico tiene como objetivo organizar la información que el maestro transmitirá al alumno, planificando actividades que le permitan desarrollar y ejercitar habilidades específicas, y evaluar los conocimientos del alumno.

2.6.1. Actividades prácticas

En el estudio de ciencias naturales se realizan actividades prácticas que incluyen demostraciones, experimentos y prácticas de laboratorio, las cuales tienen la finalidad de que los estudiantes analicen la información obtenida por medio de gráficas y tablas que les permitan hacer abstracciones sobre los fenómenos estudiados.

2.6.2. Examen

Recurso didáctico utilizado para evaluar los conocimientos de una persona sobre un tema en específico, los resultados obtenidos se utilizan para diseñar otros recursos didácticos o para medir el aprendizaje de los estudiantes.

2.6.3. Encuesta

Cuestionario prediseñado a través del cual el investigador recauda datos. Pueden ser de dos tipos: de respuestas abiertas, en los cuales las personas escriben con sus propias palabras sus respuestas, o de respuestas cerradas, en los cuales las personas deben de escoger entre dos o más opciones para responder.

2.7. Ingeniería didáctica

Investigación pedagógica realizada con el fin de controlar, con la información que se ha adquirido con anterioridad, los procesos de enseñanza-aprendizaje. Está constituida por una serie de pasos organizados a través de los cuales el maestro obtendrá la información necesaria para planificar el proceso de enseñanza.

Como ya se ha descrito, la aplicación de la ingeniería didáctica conlleva una serie de pasos que son los siguientes:

2.7.1. Análisis preliminares

Consiste en adquirir y analizar la información necesaria para desarrollar el proceso de enseñanza. Tomando en cuenta los objetivos de la investigación, se debe analizar:

- Epistemológicamente los conceptos que se enseñaran.
- Cómo se ha enseñado dichos conceptos tradicionalmente, y los resultados de dicha enseñanza.

- Los conocimientos de los estudiantes, su concepción sobre el tema, incluyendo sus dificultades. Para ello se pueden utilizar herramientas didácticas como exámenes o encuestas.
- Las restricciones que tendrá el ejercicio didáctico.

2.7.2. Concepción y análisis a priori de las situaciones didácticas

La información adquirida durante la primera fase es analizada y utilizada para decidir la forma en que se actuará para llevar a cabo el proceso de enseñanza-aprendizaje. Se preparan los instrumentos necesarios para la recolección de la información aportada por los estudiantes, así como los materiales didácticos necesarios.

2.7.3. Experimentación

Se lleva a cabo lo planificado en la etapa anterior, explicando a los alumnos los objetivos y condiciones de la investigación y aplicando los instrumentos de investigación para registrar la información que se obtendrá.

2.7.4. Análisis a posteriori y evaluación

La información obtenida durante la experimentación se analiza, llevando a cabo una comparación entre la información obtenida a priori y a posteriori, el resultado de esta comparación permitirá aceptar o rechazar la hipótesis establecida al principio de la investigación.

2.8. Currículo

Para poder orientar y definir el proceso pedagógico de enseñanza-aprendizaje las instituciones que laboran en tal ámbito deben de diseñar sus currículos, los cuales constituirán un conjunto de actividades, objetivos, criterios y técnicas que definirán el trabajo que realizarán y que orientarán el trabajo de los maestros, delimitando los conocimientos que serán impartidos a los alumnos.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Las variables que se analizan en esta investigación se clasifican en función de cada una de las etapas en las cuales se divide el trabajo. En la primera etapa, en la cual se analizó la calidad del agua de alimentación a la caldera y se diagnosticó el estado del equipo de alimentación y acondicionamiento, se analizaron las variables: potencial de hidrógeno, conductividad, concentración de iones de calcio y carbonatos, temperatura y el Índice de Langelier de las muestras recolectadas en la alimentación y salida del sistema de acondicionamiento.

En la segunda etapa de la investigación se recolectó la información bibliográfica necesaria para llevar a cabo el diseño de la práctica, por lo cual no existían variables a analizar. En la tercera etapa, se evaluaron los conocimientos teóricos y la percepción cualitativa de los estudiantes sobre la práctica propuesta, analizando los promedios de las calificaciones obtenidas por los estudiantes y realizando una tabulación de sus respuestas a las encuestas realizadas.

La siguiente tabla muestra la clasificación de las variables analizadas en el trabajo de investigación:

Tabla V. **Clasificación de variables**

Etapa de la investigación	Factor de ruido	Variable respuesta
Diagnóstico y evaluación de la calidad del agua.	Potencial de Hidrógeno. Sólidos totales disueltos. Concentración de iones de Calcio. Concentración total de Carbonatos. Temperatura.	Índice de Langelier.
Implementación de la práctica.	Conocimientos teóricos de los estudiantes antes de la realización de la práctica. (Promedio de calificación de la herramienta escrita de evaluación). Percepción cualitativa de los estudiantes sobre la utilidad de la práctica antes de llevarla a cabo. (Evaluada con una encuesta)	Conocimientos teóricos de los estudiantes después de la realización de la práctica. (Promedio de calificación de la herramienta escrita de evaluación). Percepción cualitativa de los estudiantes sobre la utilidad de la práctica después de llevarla a cabo. (Evaluada con una encuesta)

Fuente: elaboración propia.

3.2. **Delimitación de campo de estudio**

Los *ítems* que se mencionan a continuación permiten delimitar el trabajo de investigación realizado de forma temporal y física, así como identificar el equipo utilizado para desarrollar la investigación:

- Ubicación: Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Equipo: caldera y equipo de acondicionamiento del agua.
- Unidad de análisis: agua de alimentación a la caldera del laboratorio.
- Curso: Laboratorio de Ingeniería Química 1 y 2.
- Espacio temporal: segundo semestre del 2013.

3.3. **Recursos humanos disponibles**

A continuación se mencionan a las personas que intervinieron en el trabajo de investigación realizado. También se identifica al grupo de estudiantes de la Escuela de Ingeniería Química con los que se trabajó:

- Trabajo realizado por: Ana Rufina Herrera Soto
- Asesor: Ingeniero Manuel Tay
- Estudiantes: asignados los cursos de Laboratorio de Ingeniería Química 1 y 2

3.4. Recursos materiales disponibles

Para realizar el trabajo de investigación con los estudiantes de los cursos de Laboratorio de Ingeniería Química 1 y 2 en el Laboratorio de Operaciones Unitarias se utilizaron los siguientes recursos materiales:

Tabla VI. **Equipo instalado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias**

Equipo	Específicos
Generador de vapor	Caldera Power Master, modelo JL de 50 HP
Acondicionamiento del agua	Columna de intercambio iónico
	Tanque auxiliar
	Llave de múltiple paso
	Llaves de globo
	Llave de compuerta
	Llave de dos direcciones
	Bomba de ½ HP

Fuente: elaboración propia.

Para recolectar la información necesaria para los análisis químicos, físicos y estadísticos se utilizaron los siguientes recursos materiales:

Tabla VII. Recursos materiales para la recolección de la información

Etapa de la investigación	Variable	Equipo y cristalería	Reactivos	Material para la documentación
Diagnóstico y evaluación de la calidad del agua.	Potencial de hidrógeno	Potenciómetro <i>Beacker</i>	Agua destilada	Hoja de datos originales (apéndice 4)
	Sólidos totales disueltos	Conductímetro <i>Beacker</i>	Agua destilada	Hoja de datos originales (apéndice 4)
	Concentración de iones de calcio (dureza total)	Bureta automática <i>Beacker</i> Erlenmeyer	EDTA, hidróxido de sodio, murexida, fenolftaleína	Hoja de datos originales (apéndice 4)
	Concentración de HCO_3^-	Bureta automática <i>Beacker</i> Erlenmeyer	Ácido sulfúrico, naranja de metilo	Hoja de datos originales (apéndice 4)
	Temperatura del agua	Termómetro		Hoja de datos originales (apéndice 4)
	Índice de Langelier			Muestra de cálculo (apéndice 3)
Desarrollo de la práctica	Información teórica			Marco teórico informe final
	Descripción procedimientos analíticos			Manual para la realización de la práctica (apéndice 13)
Implementación de la práctica	Conocimientos teóricos de los estudiantes antes de la realización de la práctica			Examen de conocimientos teóricos anterior a la realización de la práctica (apéndice 14)
	Conocimientos teóricos de los estudiantes después de la realización de la práctica			Examen de conocimientos teóricos posterior a la realización de la práctica (apéndice 16)
	Percepción cualitativa de los estudiantes sobre la utilidad de la práctica antes de llevarla a cabo			Encuesta de percepción cualitativa anterior a la realización de la práctica (apéndice 15)
	Percepción cualitativa de los estudiantes sobre la utilidad de la práctica después de llevarla a cabo			Encuesta de percepción cualitativa posterior a la realización de la práctica (apéndice 17)

Fuente: elaboración propia.

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

Cada una de las etapas del trabajo de investigación realizado posee características cualitativas y cuantitativas, la siguiente tabla ofrece una clasificación de las técnicas utilizadas para realizar el trabajo y recolectar la información necesaria:

Tabla VIII. Clasificación de técnicas de evaluación

Etapa de la investigación	Variable	Técnica cuantitativa	Técnica cualitativa
Procedimiento analítico	pH	Medición directa	
	Temperatura	Medición directa	
	Dureza del agua	Titulación con EDTA	
	Alcalinidad	Titulación con Ácido Sulfúrico	
	Sólidos totales disueltos (conductividad)	Medición directa	
	Índice de Langelier	Cálculo	Evaluación de la magnitud para determinar la potencialidad incrustante o corrosiva. Comparación de la magnitud antes y después de que el agua pase por el suavizador.
Desarrollo de la práctica	Conocimientos teóricos de los estudiantes		Realización de exámenes cortos antes y después de la aplicación de la práctica. Comparación de promedios.
	Percepción cualitativa de los estudiantes		Realización de encuestas antes y después de realizar la práctica. Comparación de resultados binomiales por medio de gráficas de barras.

Fuente: elaboración propia.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Este estudio se realizó con la finalidad de determinar la posibilidad de implementar una práctica en la cual los estudiantes de los Laboratorios de Ingeniería Química 1 y 2 monitorearan la calidad del agua de alimentación a la caldera del Laboratorio de Operaciones Unitarias, mediante la utilización de técnicas de química analítica.

La investigación se dividió en 3 partes:

- Procedimiento analítico
- Desarrollo de la práctica de monitoreo de la calidad del agua
- Implementación de la práctica

El procedimiento analítico se llevó a cabo con la finalidad de evaluar la calidad del agua de alimentación a la caldera del Laboratorio y diagnosticar el estado del sistema de acondicionamiento del agua. Para ello se realizó un diagrama del equipo y posteriormente se analizó el agua de alimentación al sistema de acondicionamiento de agua y el agua que sale del sistema, determinando su dureza, alcalinidad, pH y conductividad, para así poder calcular el Índice de Langelier, el cual permitió determinar si el agua era corrosiva o incrustante.

Se desarrolló una práctica en donde los estudiantes aprendieron a monitorear la calidad del agua de alimentación a la caldera del Laboratorio. Para ello fue necesaria la recopilación de información sobre los fundamentos teóricos y procedimientos analíticos necesarios. La información fue utilizada para redactar el manual que los estudiantes utilizaron para realizar la práctica.

En la tercera etapa de la investigación, los estudiantes realizaron la práctica propuesta y se evaluó su aprendizaje por medio de exámenes cortos: uno realizado antes de que se llevará a cabo la práctica, y otro al finaliza. Además, se analizó la percepción cualitativa de los estudiantes, por medio de dos encuestas realizadas antes y después de la práctica.

Tabla IX. **Procedimientos para la recolección de la información**

Etapa de la investigación	Procedimiento
Procedimiento analítico	<ol style="list-style-type: none"> 1. Realización de diagrama del equipo de acondicionamiento de agua para la caldera. 2. Recolección de muestra de agua de alimentación a la caldera (antes del ablandador). Medición de la temperatura de la muestra. 3. Determinación del pH, dureza total y carbonatos de la muestra de agua para calcular el Índice de Langelier. Evaluación de la calidad del agua. 4. Recolección de muestra de agua que sale del ablandador. Medición de la temperatura de la muestra. 5. Determinación del pH, dureza total y carbonatos de la muestra de agua para calcular el Índice de Langelier. 6. Comparación del Índice de Langelier del agua antes de entrar al ablandador y después de salir de este.
Desarrollo de la práctica de monitoreo de la calidad del agua	<ol style="list-style-type: none"> 1. Investigación de fundamentos teóricos. 2. Descripción de procedimientos analíticos. 3. Descripción de los resultados obtenidos a partir de los procedimientos analíticos y forma de interpretarlos. 4. Redacción de manual para la realización de la práctica. 5. Redacción de las pruebas de conocimientos teóricos. 6. Redacción de las encuestas de percepción cualitativa de los alumnos. 7. Elección del lugar en donde se realizará la práctica. Preparación del equipo y reactivos necesarios para la implementación.
Implementación de la práctica de monitoreo de la calidad del agua	<ol style="list-style-type: none"> 1. Programación de la ejecución. 2. Realización de examen de conocimientos teóricos a los estudiantes. 3. Realización de encuesta (datos cualitativos) a los estudiantes. 4. Realización de la práctica. 5. Realización de examen de conocimientos teóricos a los estudiantes. 6. Realización de encuesta (datos cualitativos) a los estudiantes. 7. Calificación de exámenes de conocimientos teóricos. 8. Determinación y comparación de la media aritmética de las calificaciones obtenidas en los exámenes de conocimientos teóricos. 9. Tabulación de la información cualitativa obtenida en las encuestas. 10. Realización de gráficas circular para representar la información obtenida por medio de las encuestas. 11. Comparación de resultados obtenidos por los alumnos del Laboratorio de Ingeniería Química 1 y 2.

Fuente: elaboración propia.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

La información obtenida durante la investigación fue ordenada y procesada en función de la etapa a la cual pertenecía. En primer lugar, se tabuló la información utilizando las tablas presentadas en el apéndice, y luego, se procesó la información en el orden mostrado en los diagramas de flujo que se incluyen en esta sección.

3.7.1. Tabulación de la información y ordenamiento de la información

En la siguiente tabla se ofrece una clasificación de la forma en que la información obtenida fue tabulada:

Tabla X. Tabulación de la información

Etapa de la investigación	Variable	Instrumentos para la obtención de datos	Documentación
Diagnóstico y evaluación de la calidad del agua.	Potencial de hidrógeno	Potenciómetro	Apéndice 5
	Sólidos totales disueltos	Conductímetro	Apéndice 5
	Concentración de iones de calcio (dureza total)	Titulación con EDTA	Apéndice 5
	Concentración de HCO ₃ ⁻	Titulación con Ácido sulfúrico	Apéndice 5
	Temperatura del agua	Termómetro	Apéndice 5
	Índice de Langelier	Muestra de cálculo	Apéndice 12
Desarrollo de la práctica	Información teórica	Investigación	Marco teórico informe final
	Procedimientos analíticos	Investigación	Manual para la realización de la práctica (Apéndice 13)
Implementación de la práctica	Conocimientos teóricos de los estudiantes antes de la realización de la práctica	Examen de conocimientos teóricos (antes de la práctica)	Apéndice 18

Continuación de la tabla X.

	Conocimientos teóricos de los estudiantes después de la realización de la práctica	Examen de conocimientos teóricos (después de la práctica)	Apéndice 19
	Percepción cualitativa de los estudiantes sobre la utilidad de la práctica antes de llevarla a cabo	Encuesta (antes de la práctica)	Apéndice 24
	Percepción cualitativa de los estudiantes sobre la utilidad de la práctica después de llevarla a cabo	Encuesta (después de la práctica)	Apéndice 25

Fuente: elaboración propia.

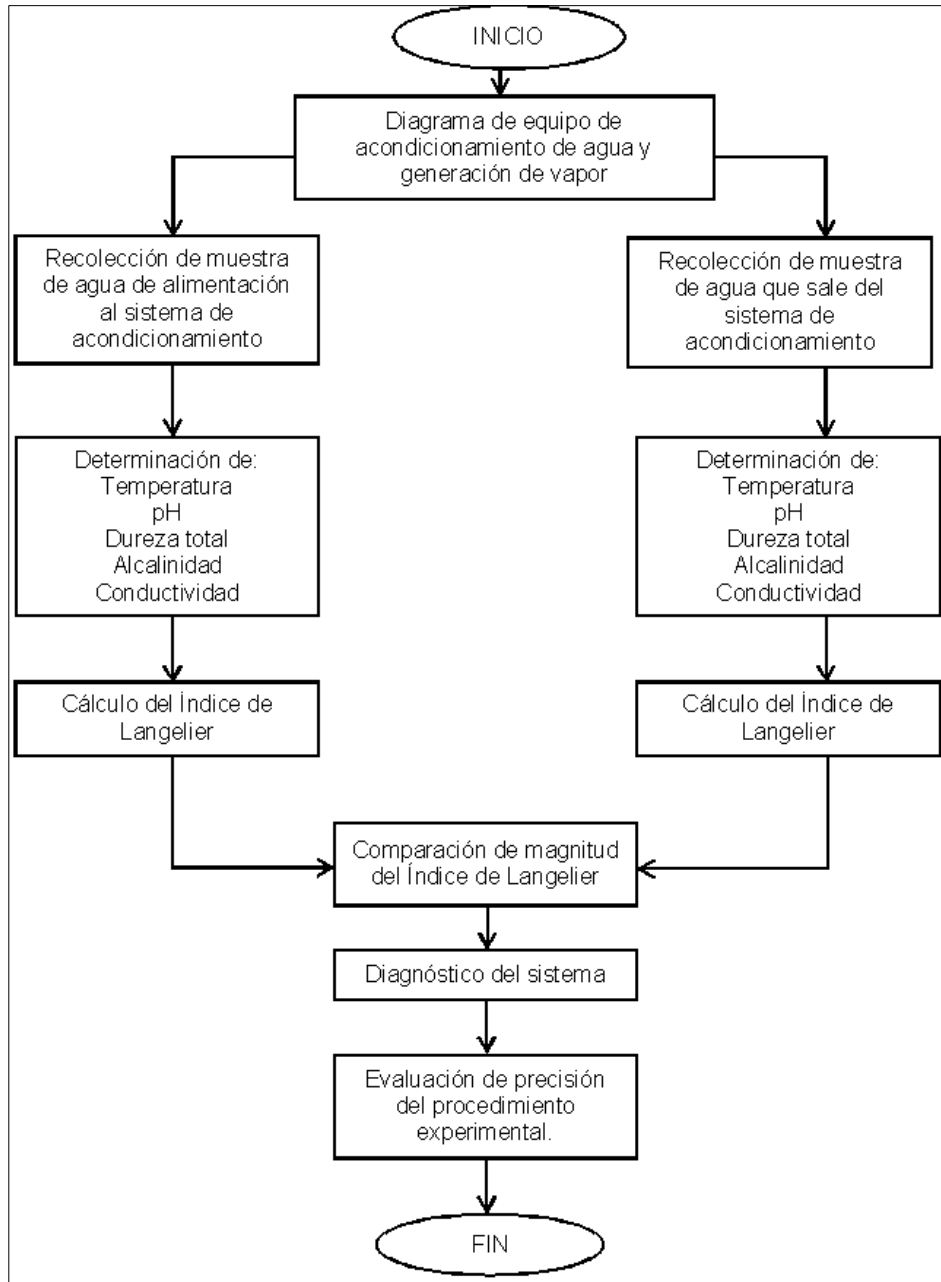
3.7.2. Procesamiento de la información

Las tres etapas en las cuales se dividió la investigación, proporcionaron distintos tipos de información, que fueron procesadas según su naturaleza para: evaluar el estado del sistema de acondicionamiento de agua instalado en el laboratorio, preparar las herramientas pedagógicas necesarias para desarrollar la práctica y evaluar la eficacia de la práctica.

3.7.2.1. Procedimiento analítico

Se determinaron los parámetros de: potencial de hidrógeno, temperatura, dureza total, alcalinidad y conductividad, del agua en la alimentación y salida del sistema de acondicionamiento del agua para determinar su Índice de Langelier y evaluar el estado del sistema.

Figura 1. **Análisis de la información para diagnosticar el estado del sistema**

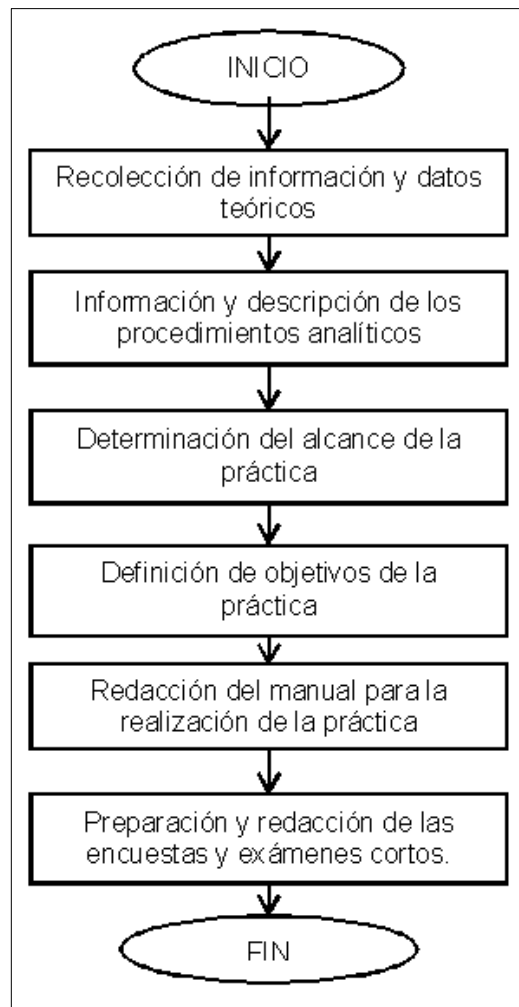


Fuente: elaboración propia.

3.7.2.2. Preparación de la práctica

Para poder redactar el manual que los estudiantes utilizarían durante la realización de la práctica propuesta, se llevó a cabo una investigación de los conceptos teóricos que intervendrían en el proceso de enseñanza-aprendizaje.

Figura 2. Preparación de las herramientas pedagógicas

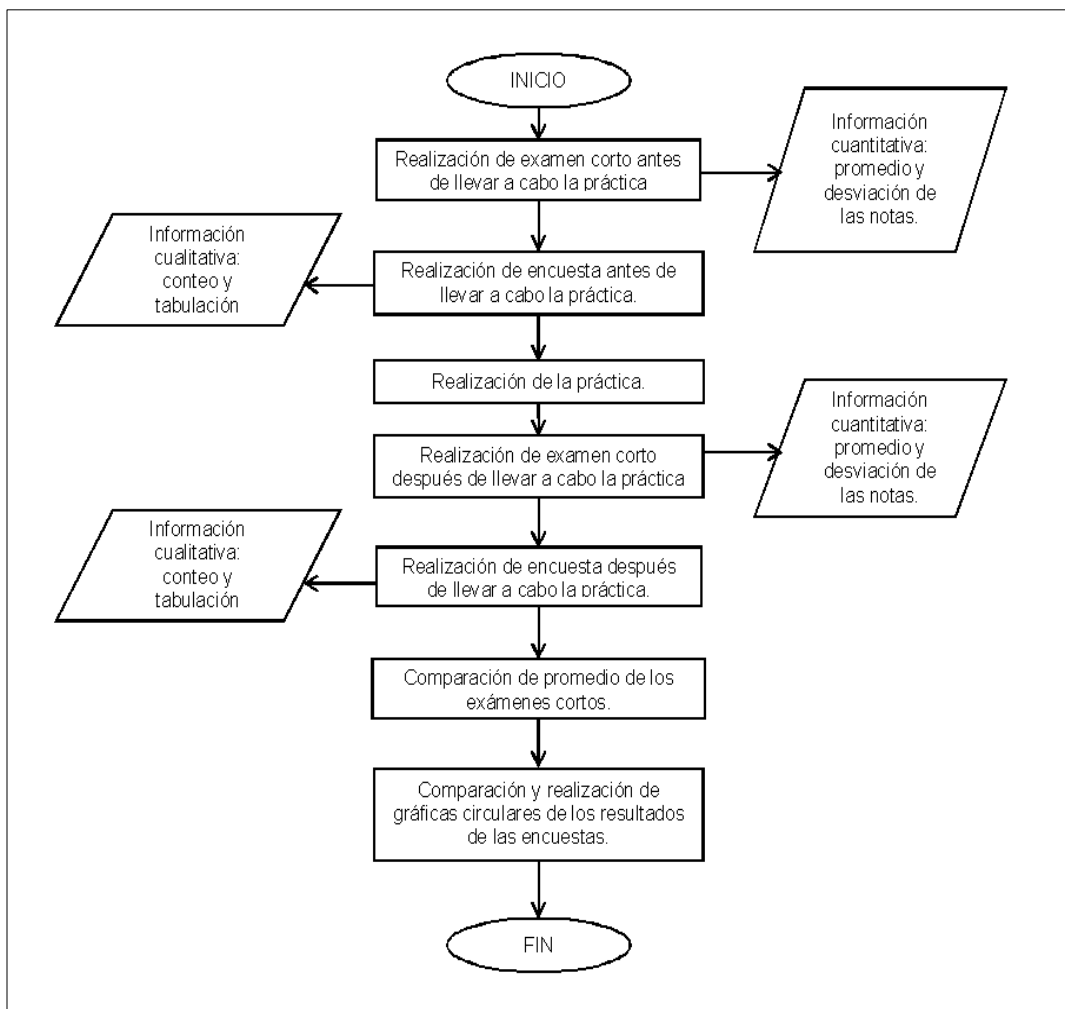


Fuente: elaboración propia.

3.7.2.3. Implementación de la práctica

Las herramientas pedagógicas elaboradas en la etapa anterior se utilizaron en la tercera etapa para llevar a cabo la práctica propuesta y obtener información que permitiera inferir si está había incrementado los conocimientos de los estudiantes.

Figura 3. **Procesamiento de la información obtenida de la práctica**



Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó con el objetivo de determinar el tamaño de la muestra que se utilizaría en la primera y segunda etapa de la investigación, así como para enunciar las hipótesis estadísticas que permitirían evaluar la eficacia de la práctica propuesta.

3.8.1. Primera etapa: procedimiento analítico

Descripción de la forma en que se determinó el número de veces que se llevarían a cabo los procedimientos analíticos necesarios para determinar el Índice de Langelier y como se calcula el promedio de estos datos.

3.8.1.1. Determinación del tamaño de la muestra

Determinación del número de veces que se debían de llevar a cabo los análisis químicos necesarios para determinar la calidad del agua de alimentación al sistema y evaluar el estado del sistema de alimentación y acondicionamiento.

[Ecuación 2]

$$n = \frac{z_{\alpha/2}^2 * p * q}{e^2}$$

Donde:

n = tamaño de la muestra (número de repeticiones)

$z_{\alpha/2}^2$ = área bajo la curva normal

p = probabilidad de éxito

q = probabilidad de fracaso

e = error por estimación

Para la primera etapa de la investigación se determinó: el potencial de hidrógeno, la temperatura, la concentración de calcio y carbonatos, la conductividad y el Índice de Langelier. Todos estos parámetros se analizaron con una probabilidad de éxito de 95,00 por ciento, un nivel de confianza del 99,00 por ciento y un error por estimación de 20,00 por ciento. Utilizando la ecuación 2 se determinó:

$$\alpha = 1 - 0,99 = 0,01$$

$$\frac{\alpha}{2} = 0,005$$

$$1 - \frac{\alpha}{2} = 0,995$$

$$z_{\frac{\alpha}{2}}^2 = 2,575855$$

$$n = \frac{(2,575855)^2 * (0,95) * (0,05)}{(0,20)^2}$$

$$n = 7,8791 \approx 8$$

Por lo tanto los análisis de la primera etapa de la investigación se repitieron 8 veces.

Tabla XI. **Tamaño de la muestra para el procedimiento analítico**

Parámetro	Nivel de confianza	Error por estimación	Probabilidad de éxito	Tamaño de la muestra
pH	95,00%	0,20	0,95	8,00
Ca ⁺²	95,00%	0,20	0,95	8,00
HCO ₃ ⁻	95,00%	0,20	0,95	8,00
Temperatura	95,00%	0,20	0,95	8,00
Índice de Langelier	95,00%	0,20	0,95	8,00

Fuente: elaboración propia.

3.8.1.2. Determinación del promedio

Los datos obtenidos a partir del procedimiento analítico se utilizaron para determinar el valor del Índice de Langelier del agua a la entrada y a la salida del ablandador, para comparar sus magnitudes se promediaron los valores de este parámetro de las 8 muestras tomadas en cada punto de análisis.

[Ecuación 3]

$$x = \frac{\sum x_i}{n}$$

Donde:

- x = media aritmética de la muestra
- x_i = valor del Índice de Langelier
- n = tamaño de la muestra

3.8.2. Segunda etapa: desarrollo de la práctica

Todos los estudiantes inscritos en los cursos de Laboratorio de Ingeniería Química 1 y 2 realizaron la práctica propuesta, los exámenes cortos y las encuestas anteriores y posteriores a la práctica. En el caso de los resultados obtenidos a partir de las encuestas se compararon las respuestas de los grupos completos evaluados. Para comprobar la hipótesis planteada se compararon los resultados de los exámenes cortos realizados antes y después de la práctica, tomando como población a todos los estudiantes evaluados anteriormente a la realización de la práctica, y delimitando una muestra de los estudiantes evaluados después de la práctica. Los siguientes cálculos describen la forma en que se delimitó la muestra utilizada en el análisis.

3.8.2.1. Determinación del tamaño de la muestra

Para determinar la cantidad de exámenes cortos realizados que se utilizarían para evaluar la hipótesis estadística propuesta, se determinó el tamaño de la muestra asumiendo una probabilidad de ocurrencia de 0,95 y un error estándar de 0,10.

[Ecuación 4]

$$s^2 = p(1 - p)$$

Donde:

s = desviación estándar de la muestra

p = probabilidad de ocurrencia

[Ecuación 5]

$$n^* = \frac{s^2}{\sigma^2}$$

Donde:

- n^* = tamaño de la muestra sin ajustar
 s = desviación estándar de la muestra, probabilidad de ocurrencia
 σ = desviación estándar de la población, error estándar

[Ecuación 6]

$$n = \frac{n^*}{1 + n^* N}$$

- n = tamaño de la muestra
 n^* = tamaño de la muestra sin ajustar
 N = tamaño de la población, alumnos inscritos

Tabla XII. **Tamaño de la muestra de alumnos**

	LOPU 1	LOPU 2
Alumnos inscritos	38,00	32,00
Probabilidad de ocurrencia	0,95	0,95
Error estándar	0,10	0,10
Tamaño de la muestra sin ajustar	4,75	4,75
Tamaño de la muestra	4,22	4,14

Fuente: elaboración propia.

Nota: para ambos cursos el tamaño de la muestra se aproxima a 5 estudiantes. Los exámenes cortos utilizados para realizar el análisis se escogieron al azar, según el método que se describirá en la siguiente sección.

3.8.3. Tercera etapa: implementación de la práctica

A partir de la realización de la práctica, se obtuvo la información necesaria para evaluar la efectividad de la práctica, para seleccionar los exámenes cortos que formarían parte de la muestra se utilizó una tabla de números aleatorios, y posteriormente se calculó el promedio de la muestra y de la población.

3.8.3.1. Elección de exámenes cortos que forman parte de la muestra

Para seleccionar los exámenes cortos posteriores a la práctica que formarían parte de la muestra para el análisis, se tabularon todas las calificaciones obtenidas por los alumnos en dicha evaluación y se les asignó una clave a cada una. A continuación se utilizó la tabla de número aleatorios (anexo 1) seleccionando un número de una fila y una columna al azar, se tomaron los números de dicha fila, leyéndolos hacia abajo, y tomando los primeros 5 (tamaño de la muestra) menores o iguales al número total de claves, estas fueron las claves cuyas calificaciones se incluyeron en el análisis estadístico.

3.8.3.2. Promedio de nota de los exámenes cortos

Para poder comparar el promedio de la calificación de los exámenes cortos realizados antes y después de implementar la práctica propuesta, se calculó el promedio de la nota de la población y el promedio de la muestra. El promedio de la población (exámenes cortos realizados antes de la implementación de la práctica):

[Ecuación 7]

$$\mu = \frac{\sum x_i}{N}$$

Donde:

- μ = media aritmética de la población
- x_i = calificación
- N = tamaño de la población, alumnos inscritos

El promedio de la muestra (exámenes cortos realizados después de la implementación de la práctica):

[Ecuación 8]

$$x = \frac{\sum x_i}{n}$$

Donde:

- x = promedio de calificación de la muestra
- x_i = calificación
- n = tamaño de la muestra

3.8.3.3. Determinación de la desviación estándar

Para poder evaluar la variación entre las notas obtenidas en los exámenes cortos, se determinó la desviación estándar tanto para las pruebas realizadas antes de implementar la prueba, como para las realizadas después de la implementación. Desviación estándar de la población:

[Ecuación 9]

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum x_i - \mu^2}{N}}$$

Donde:

- σ = desviación estándar de la población
- x_i = calificación
- μ = promedio poblacional
- N = tamaño de la población

Desviación estándar de la muestra:

[Ecuación 10]

$$s = \sqrt{\frac{\sum x_i - x^2}{n - 1}}$$

Donde:

- s = desviación estándar de la muestra
- x_i = calificación
- x = promedio de la muestra
- n = tamaño de la muestra

3.8.3.4. Coeficiente de variación

Una vez calculada la desviación estándar se utilizó el coeficiente de variación como parámetro de comparación entre los resultados obtenidos de los exámenes cortos realizados antes de la implementación de la práctica y los que se hicieron después de ella. Para la población:

[Ecuación 11]

$$C_V = \frac{\sigma}{\mu} * 100$$

Donde:

σ = desviación estándar de la población

μ = promedio poblacional

C_V = coeficiente de variación

Para la muestra:

[Ecuación 12]

$$C_V = \frac{s}{x} * 100$$

Donde:

s = desviación estándar de la muestra

x = promedio de la muestra

C_V = coeficiente de variación

3.8.3.5. Determinación del intervalo de confianza para la población

Se determinó un intervalo de confianza dentro del cual el promedio de las calificaciones de los exámenes cortos tiene mayores probabilidades de existir. Este intervalo se determinó para la población y la muestra.

Determinación de los grados de libertad:

[Ecuación 13]

$$v = n - 1$$

Donde:

v = grados de libertad

n = tamaño de la muestra

Nivel de significancia:

[Ecuación 14]

$$\alpha = 1 - N_c$$

Donde:

α = nivel de significancia

N_c = nivel de confianza

Intervalo de confianza

[Ecuación 15]

$$\text{Intervalo de confianza} = x \pm \frac{t_{\alpha} z s}{n}$$

Donde:

- x = media de la muestra
- t = valor de t de *Student*
- s = desviación estándar de la muestra
- n = tamaño de la muestra

3.8.3.6. Prueba de hipótesis

La prueba de hipótesis se realizó con el objetivo de evaluar si el promedio de los exámenes cortos realizados después de la implementación de la práctica era significativamente mayor que el promedio de los exámenes realizados antes de llevar a cabo la práctica.

Hipótesis nula: la práctica no mejora los conocimientos de los alumnos.

$$x = \mu$$

Hipótesis alternativa: la práctica mejora los conocimientos de los alumnos (1 cola).

$$x \neq \mu$$

Determinación del estadístico de prueba (z calculado):

[Ecuación 16]

$$z_{\text{calc}} = \frac{x - \mu}{\frac{\sigma}{n}}$$

Donde:

z_{calc} = Z calculado

\bar{x} = media de la muestra

μ = media de la población

σ = varianza de la población

Valor crítico (z tabulado):

[Ecuación 17]

$$\alpha = 1 - N_c$$

Donde:

α = nivel de significancia

N_c = nivel de confianza

Regla de decisión:

$Z_{\text{Calculada}} > Z_{\text{Crítico}} \Rightarrow$ Se rechaza la hipótesis nula
 \Rightarrow La práctica mejora los conocimientos de los alumnos

$Z_{\text{Calculada}} \ll Z_{\text{Crítico}} \Rightarrow$ Se acepta la hipótesis nula
 \Rightarrow La práctica no mejora los conocimientos de los alumnos

4. RESULTADOS

Los resultados de la investigación se dividen en tres partes; la primera corresponde a los resultados de la evaluación de la calidad del agua alimentada a la caldera, la segunda parte presenta el resultado de la preparación de la práctica propuesta, y la tercera parte corresponde a la evaluación de la efectividad de la práctica.

- Primera parte: diagnóstico y evaluación de la calidad del agua

Tabla XIII. **Concentración de calcio, Índice de Langelier promedio e interpretación**

Punto	Ca ⁺² (mol/l) promedio	Índice de Langelier promedio (adimensional)	Interpretación de la magnitud del Índice de Langelier
Antes del ablandador	7,74E-04	-0,72	Corrosión severa
Después del ablandador	6,01E-4	-0,60	Corrosión severa

Fuente: elaboración propia, apéndice 6 y 12.

- Segunda parte: desarrollo de la práctica de monitoreo de la calidad del agua

El resultado de esta parte es el manual para la realización de la práctica que se incluye en el apéndice 13

- Tercera parte: implementación de la práctica
 - Calificación de los exámenes de conocimientos teóricos

Tabla XIV. **Calificación del examen de conocimientos teóricos previo a la realización de la práctica**

Aspecto a evaluar	LOPU 1	LOPU 2
Total evaluados	38,00	32,00
Promedio (100 puntos)	15,63	12,70
Desviación estándar	11,45	10,65
Coefficiente de variación (%)	73,27	83,91

Fuente: elaboración propia, apéndice 18.

Tabla XV. **Calificación del examen de conocimientos teóricos posterior a la realización de la práctica**

Aspecto a evaluar	LOPU 1	LOPU 2
Promedio (puntos)	53,25	36,50
Desviación estándar	32,13	12,00
Coefficiente de variación (%)	60,34	32,88
Tamaño de la muestra	5,00	5,00
Grados de libertad	4,00	4,00
Nivel de confianza	0,95	0,95
Nivel de significancia	0,05	0,05
$\bar{\alpha}/2$	0,025	0,025
$1-\alpha/2$	0,975	0,975
T	2,78	2,78
Intervalo de confianza	93,20	51,42
Intervalo de confianza	13,30	21,58

Continuación de la tabla XV.

Z calculada	7,35	5,00
1-a	0,95	0,95
Z crítico	1,64	1,64

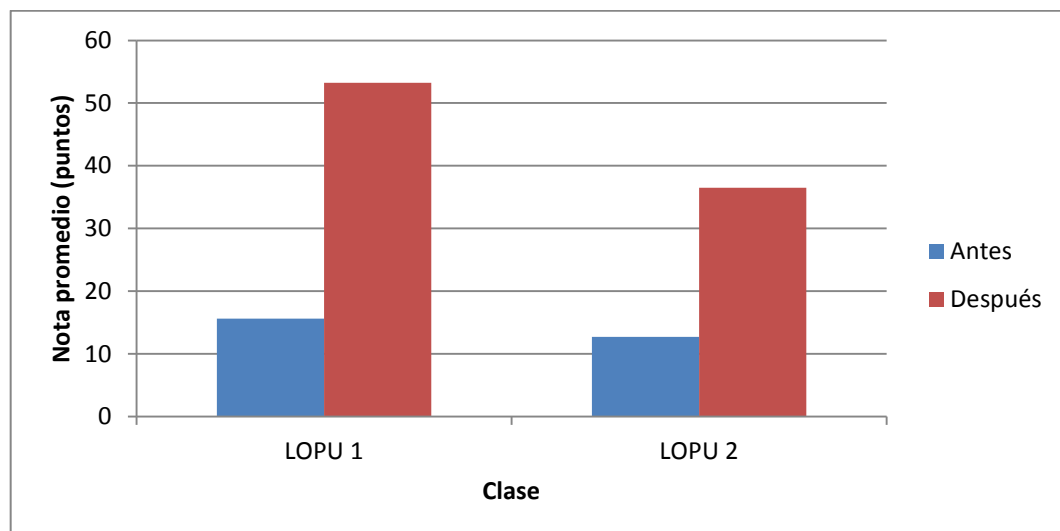
Fuente: elaboración propia, apéndice 21.

Tabla XVI. **Comprobación de la hipótesis**

Curso	Z calculado	Z crítico	Interpretación	
Lopu 1	7,35	1,64	Se acepta la hipótesis alternativa	La práctica mejora los conocimientos de los estudiantes en el tema
Lopu 2	5,00	1,64	Se acepta la hipótesis alternativa	La práctica mejora los conocimientos de los estudiantes

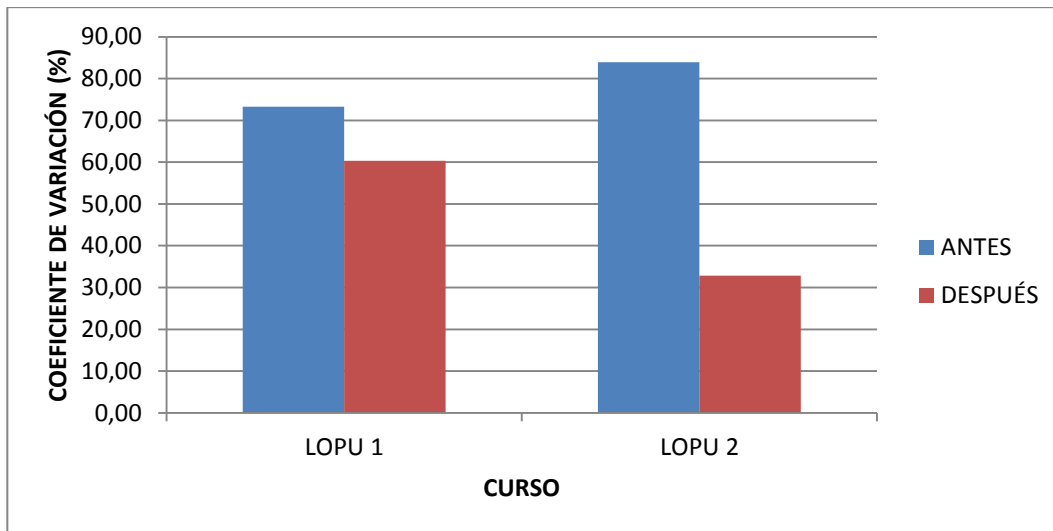
Fuente: elaboración propia, apéndice 22.

Figura 4. **Comparación de las notas promedio**



Fuente: elaboración propia, apéndice 23.

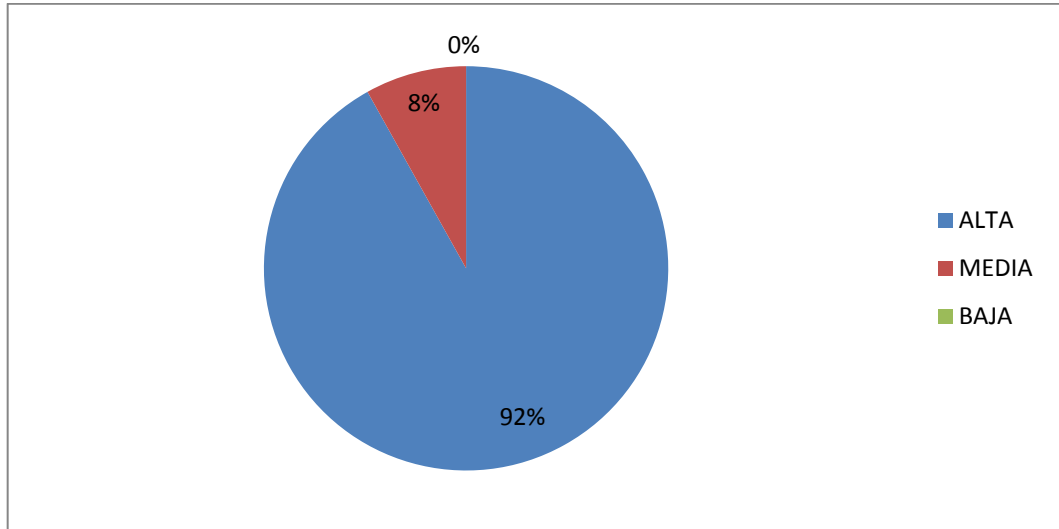
Figura 5. **Comparación del coeficiente de variación para las calificaciones de los exámenes cortos realizados antes y después de llevar a cabo la práctica**



Fuente: elaboración propia, apéndice 23.

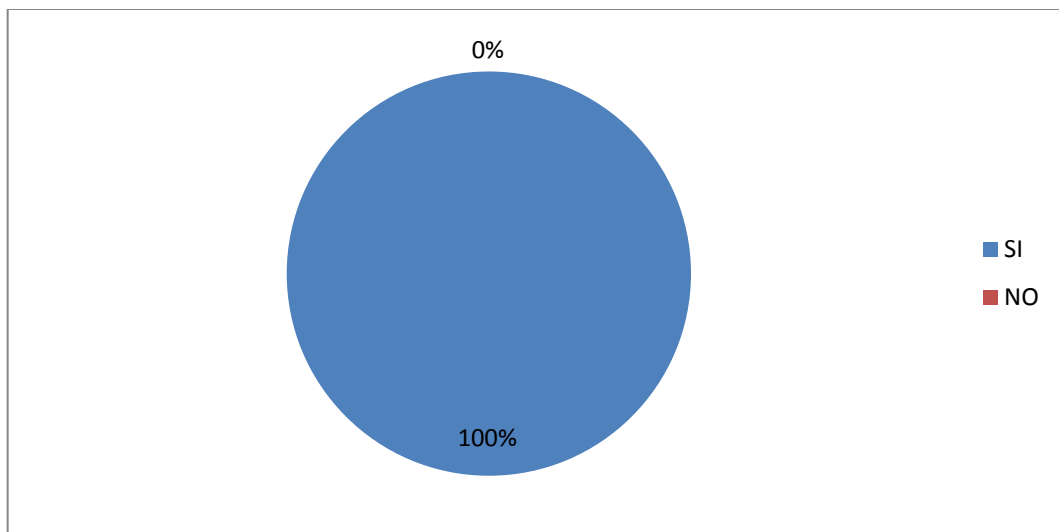
- Resultados de las encuestas de percepción cualitativa
 - Encuesta anterior a la implementación de la práctica realizada con los estudiantes del Laboratorio de Ingeniería Química 1

Figura 6. **Pregunta 1.1**



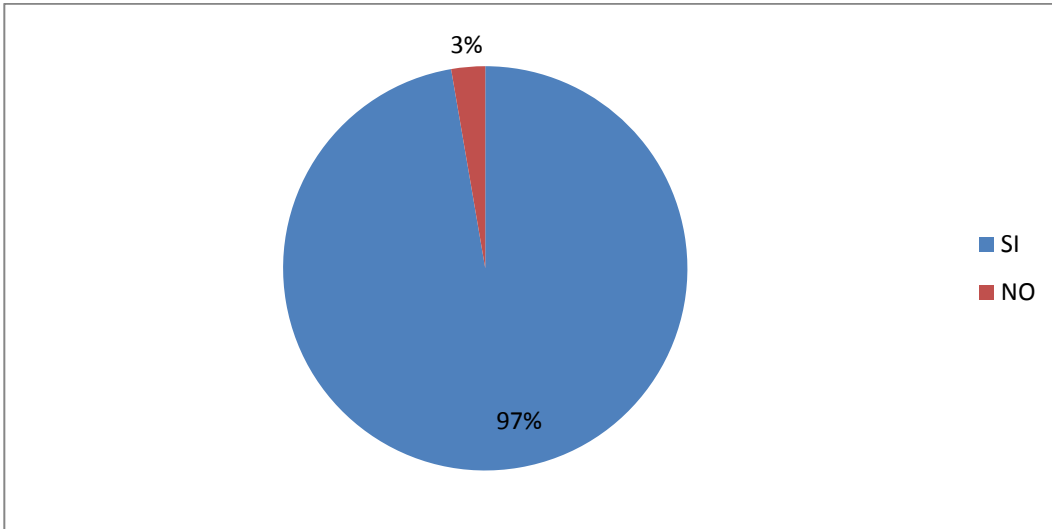
Fuente: elaboración propia, apéndice 24.

Figura 7. **Pregunta 2.1**



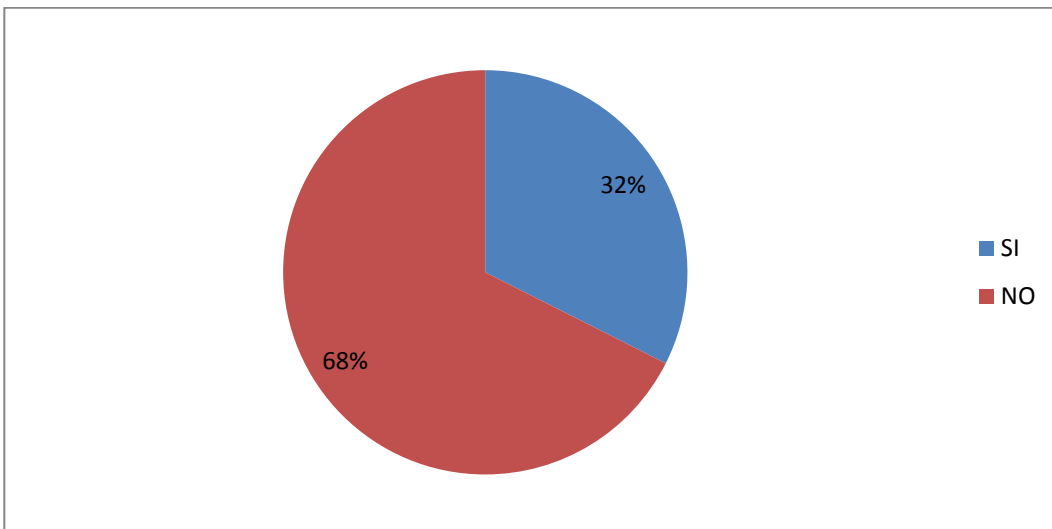
Fuente: elaboración propia, apéndice 24.

Figura 8. Pregunta 3.1



Fuente: elaboración propia, apéndice 24.

Figura 9. Pregunta 4.1



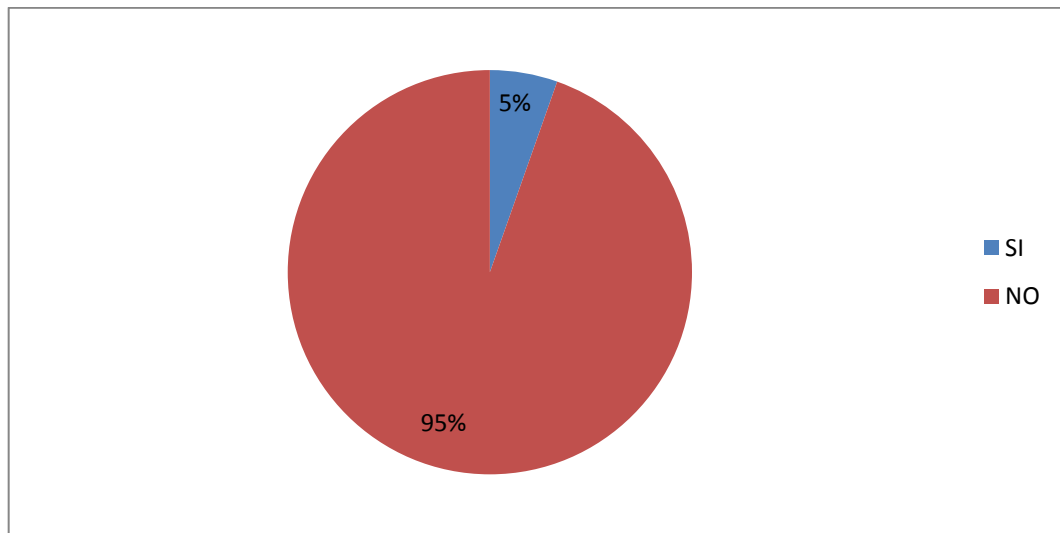
Fuente: elaboración propia, apéndice 24.

Tabla XVII. **Pregunta 5.1**

CURSO
Balace de masa y energía (IQ-1)
Transferencia de calor (IQ-3)
Análisis Cuantitativo
Calidad del agua
Análisis cualitativo
Química ambiental
Monitoreo de aguas residuales (Cursos ESIQ)

Fuente: elaboración propia, apéndice 24.

Figura 10. **Pregunta 6.1**



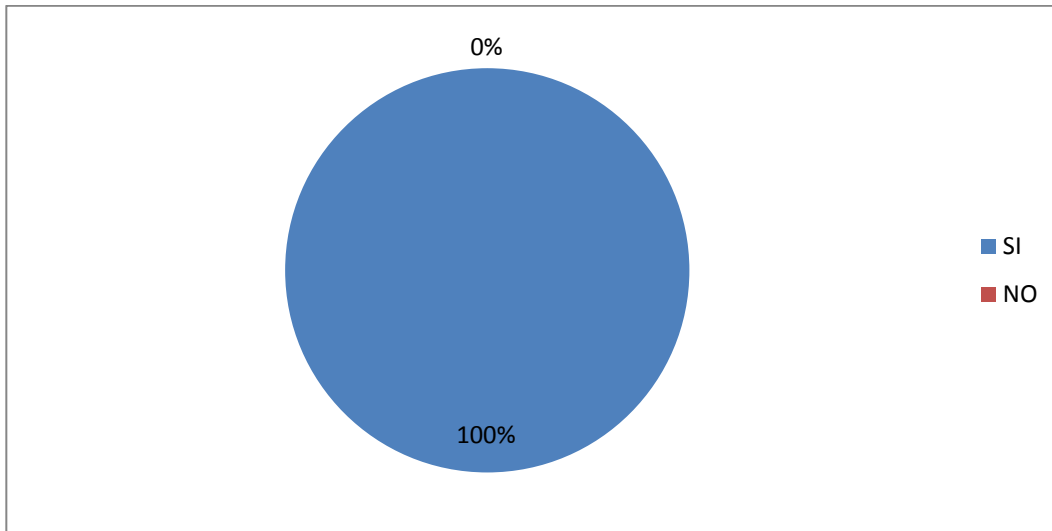
Fuente: elaboración propia, apéndice 24.

Tabla XVIII. **Pregunta 7.1**

CURSO
Análisis cualitativo
Flujo de fluidos (IQ-2)
Transferencia de calor (IQ-3)

Fuente: elaboración propia, apéndice 24.

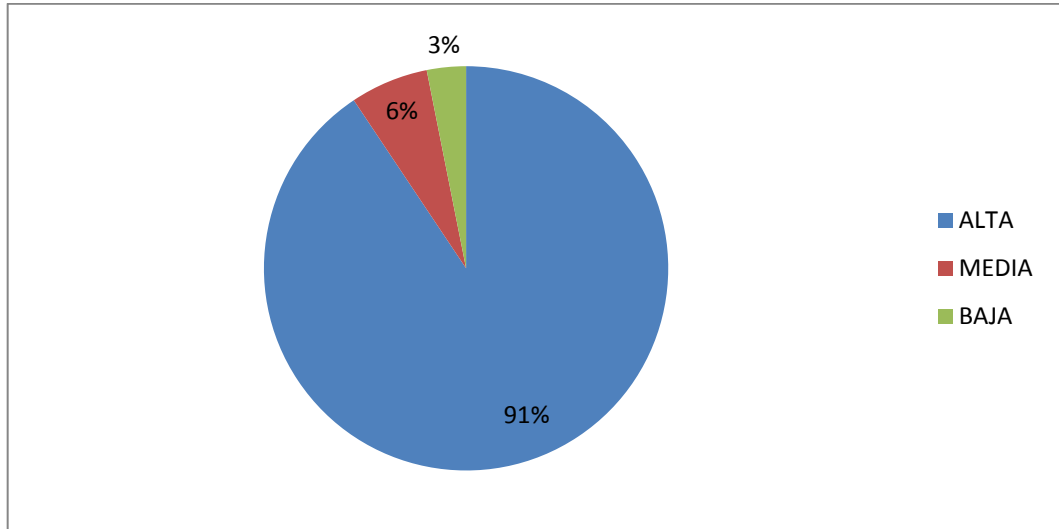
Figura 11. **Pregunta 8.1**



Fuente: elaboración propia, apéndice 24.

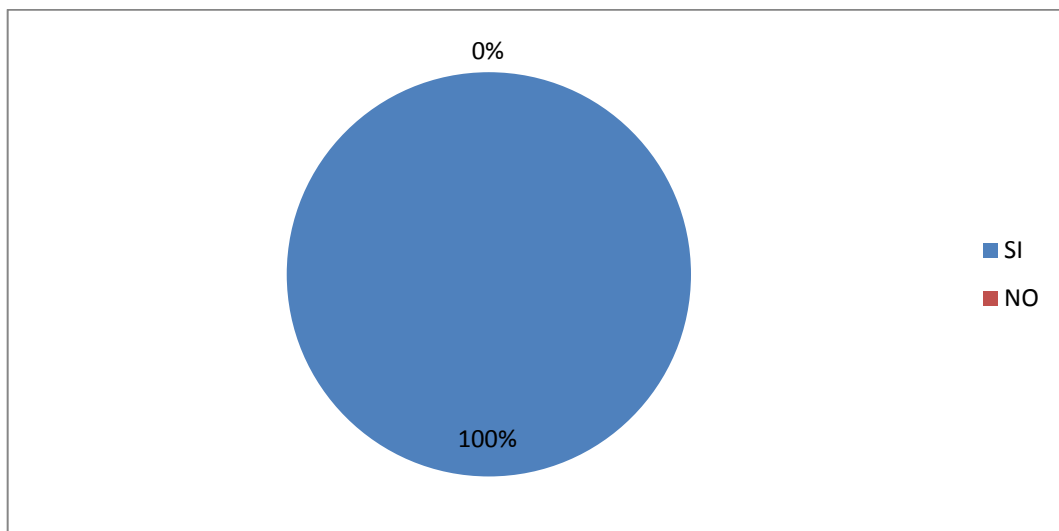
- Encuesta anterior a la implementación de la práctica realizada con los estudiantes del Laboratorio de Ingeniería Química 2

Figura 12. **Pregunta 1.1**



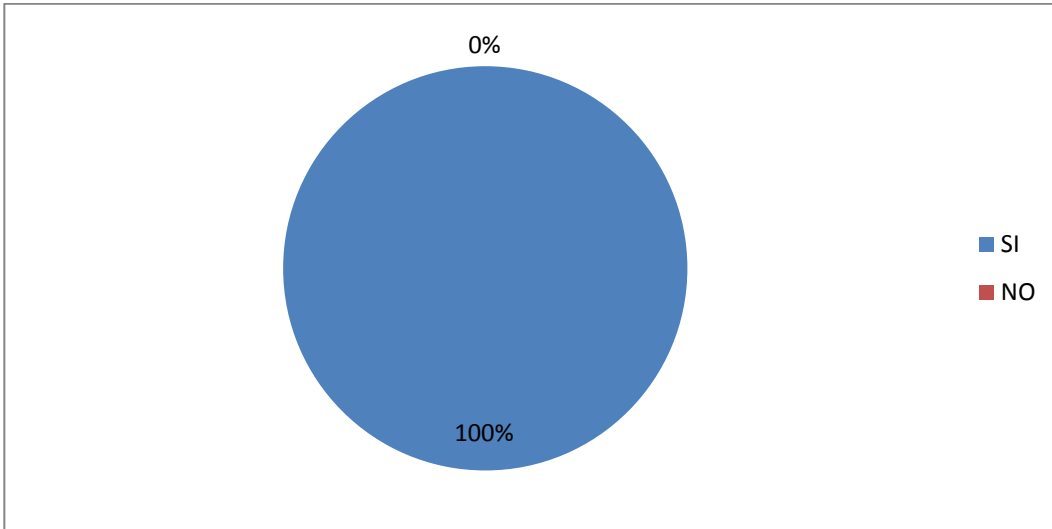
Fuente: elaboración propia, apéndice 24

Figura 13. **Pregunta 2.1**



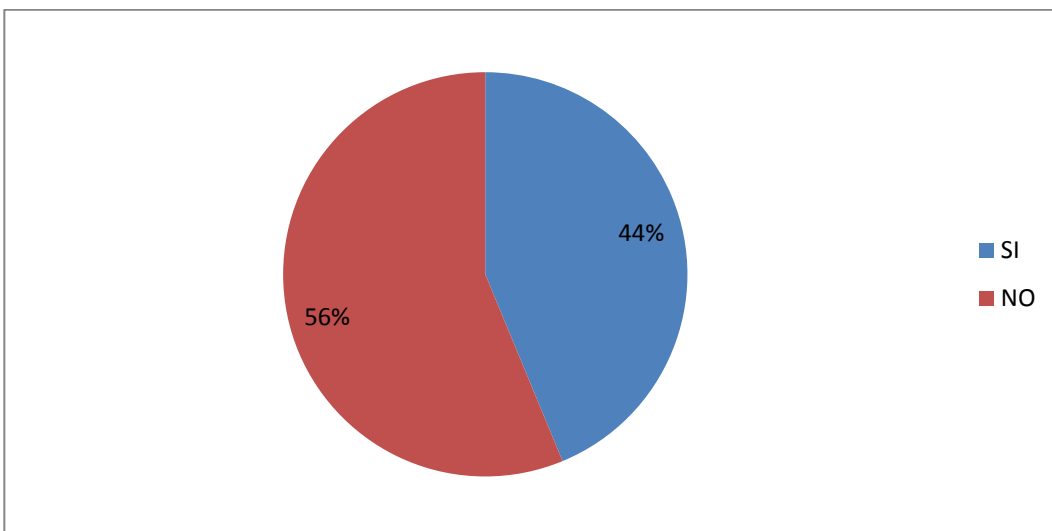
Fuente: elaboración propia, apéndice 24.

Figura 14. **Pregunta 3.1**



Fuente: elaboración propia, apéndice 24.

Figura 15. **Pregunta 4.1**



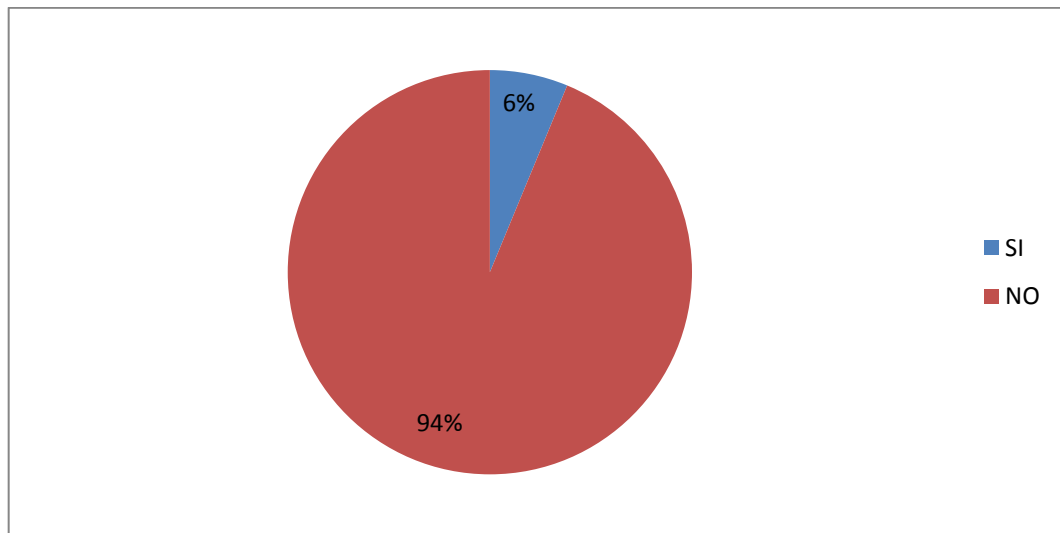
Fuente: elaboración propia, apéndice 24.

Tabla XIX. **Pregunta 5.1**

CURSO
Calidad del Agua
Termodinámica 3
Diplomado de Acondicionamiento de Agua para la Industria
Transferencia de Calor (IQ- 3)
Análisis Cuantitativo
Laboratorio de Ingeniería Química 1
Análisis Cualitativo

Fuente: elaboración propia, apéndice 24.

Figura 16. **Pregunta 6.1**



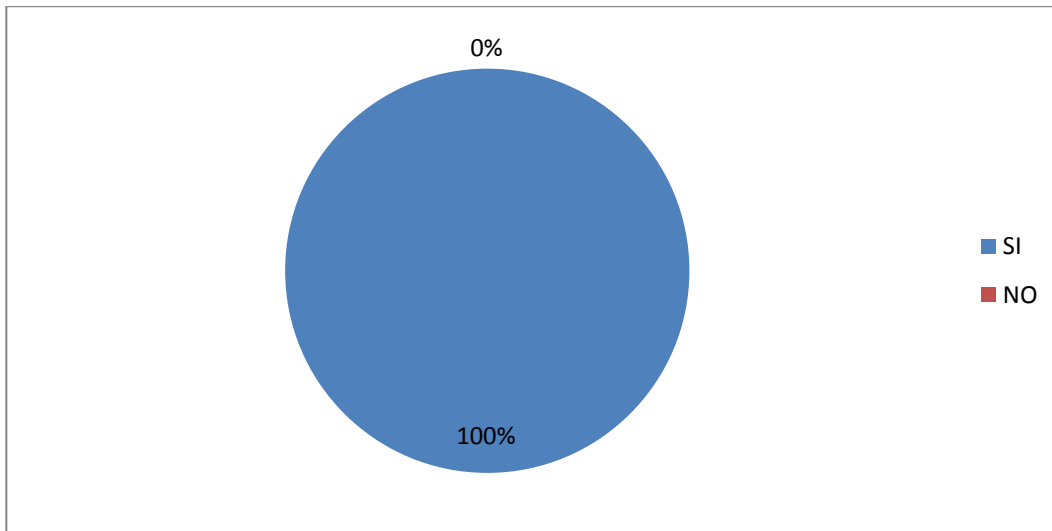
Fuente: elaboración propia, apéndice 24.

Tabla XX. **Pregunta 7.1**

CURSO
Transferencia de Calor (IQ-3)
Diplomado de Acondicionamiento de Agua para la Industria
Transferencia de Masa (IQ-4)
Transferencia de Masa en Unidades Continuas (IQ-5)

Fuente: elaboración propia, apéndice 24.

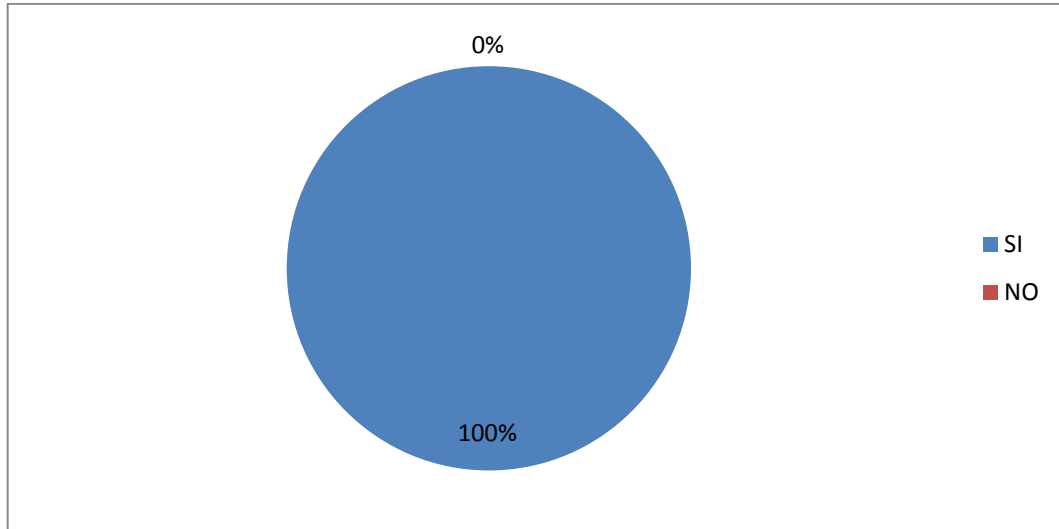
Figura 17. **Pregunta 8.1**



Fuente: elaboración propia, apéndice 24.

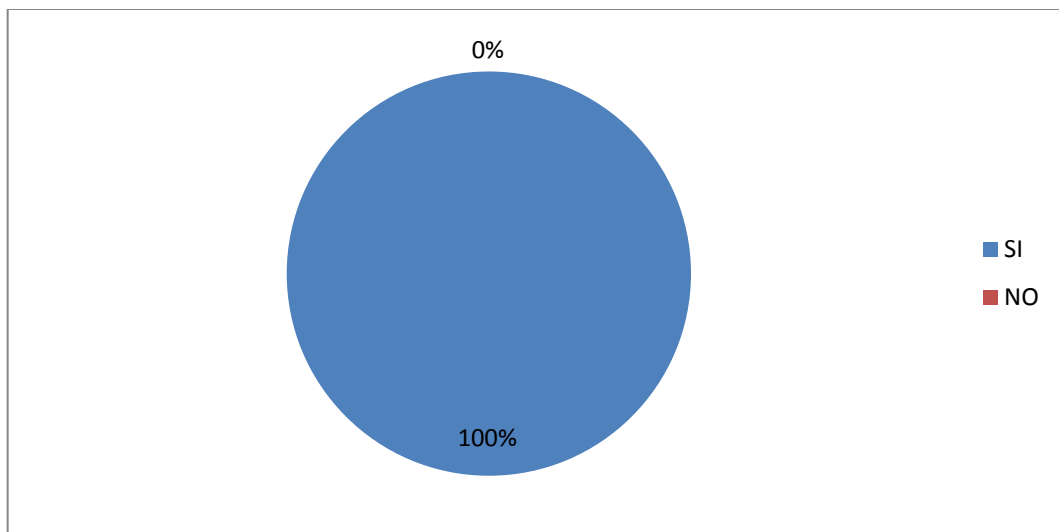
- Encuesta posterior a la implementación de la práctica realizada con los estudiantes del Laboratorio de Ingeniería Química 1

Figura 18. **Pregunta 1.2**



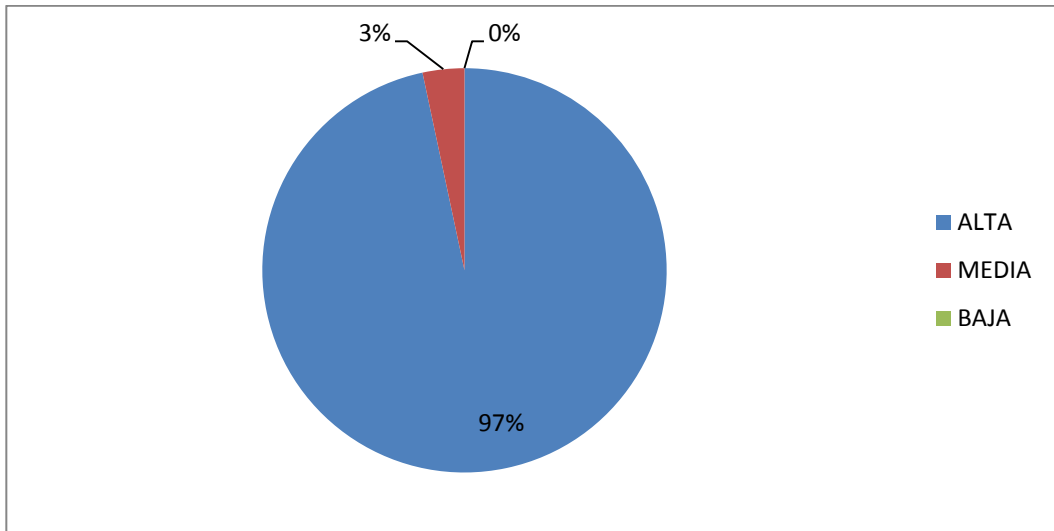
Fuente: elaboración propia, apéndice 25.

Figura 19. **Pregunta 2.2**



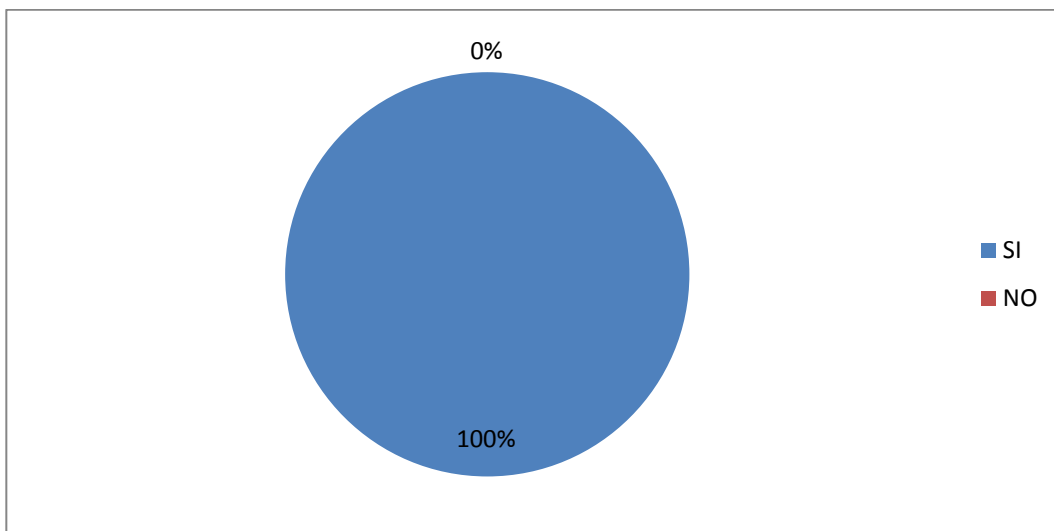
Fuente: elaboración propia, apéndice 25.

Figura 20. **Pregunta 3.2**



Fuente: elaboración propia, apéndice 25.

Figura 21. **Pregunta 4.2**



Fuente: elaboración propia, apéndice 25.

Tabla XXI. **Pregunta 5.2**

Curso
Calidad del Agua
Flujo de Fluidos (IQ-2)
Análisis Cuantitativo
Análisis Cualitativo
Termodinámica 3
Transferencia de Calor (IQ-3)
Transferencia de Masa (IQ-4)
Diplomado de Acondicionamiento de Agua para la Industria
Química Ambiental
Laboratorio de Ingeniería Química 1

Fuente: elaboración propia, apéndice 25.

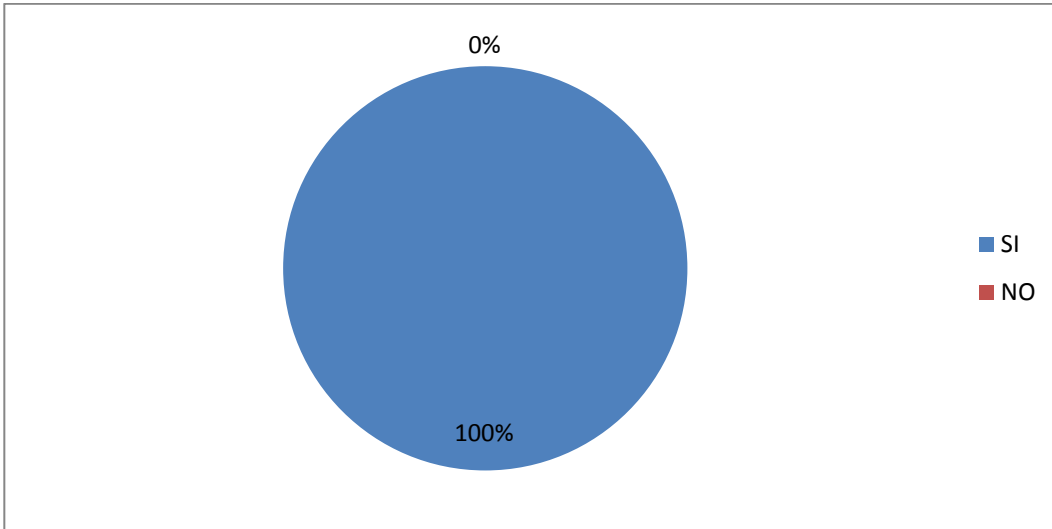
Tabla XXII. **Pregunta 6.2**

Curso
Análisis Químico
Termodinámica 3
Termodinámica 4
Flujo de Fluidos (IQ-2)
Transferencia de Calor (IQ-3)
Análisis Cuantitativo
Laboratorio de Ingeniería Química 1
Diplomado de Acondicionamiento de Agua para la Industria
Transferencia de Masa y Energía (IQ-1)

Fuente: elaboración propia, apéndice 25.

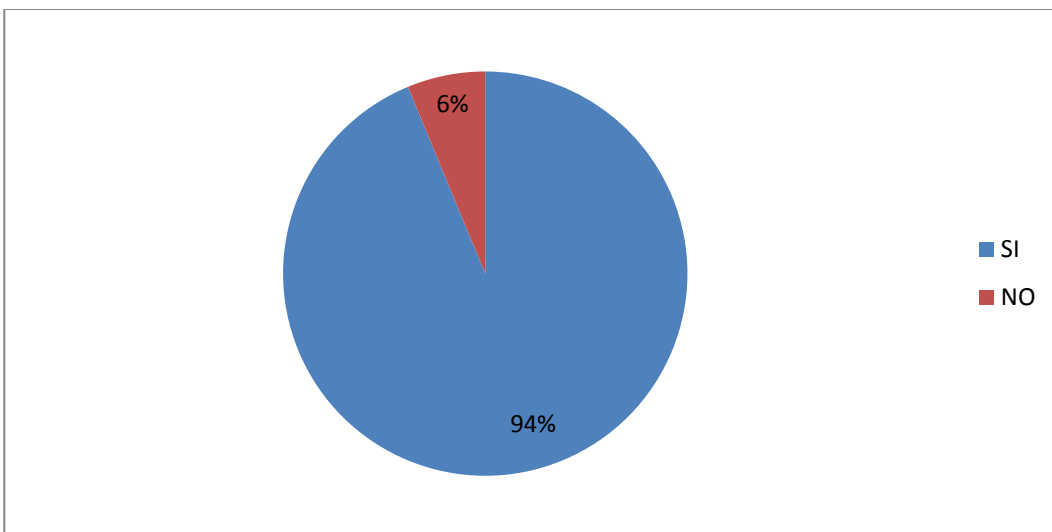
- Encuesta posterior a la implementación de la práctica realizada con los estudiantes del Laboratorio de Ingeniería Química 2.

Figura 22. **Pregunta 1.2**



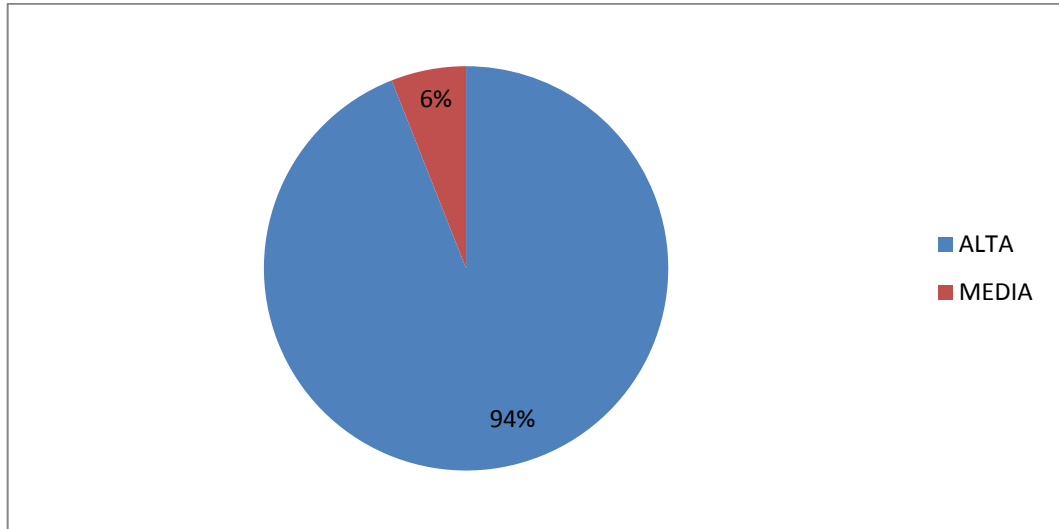
Fuente: elaboración propia, apéndice 25.

Figura 23. **Pregunta 2.2**



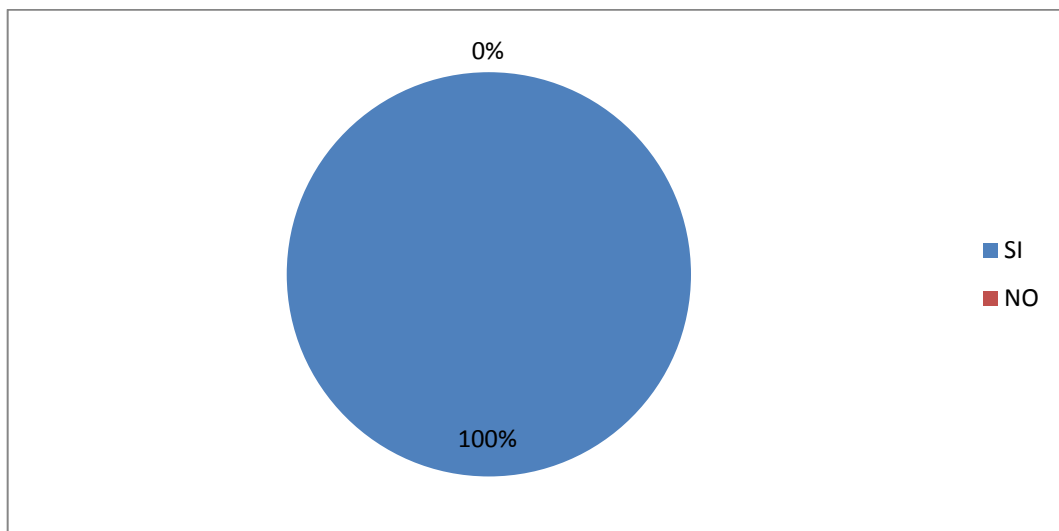
Fuente: elaboración propia, apéndice 25.

Figura 24. **Pregunta 3.2**



Fuente: elaboración propia, apéndice 25.

Figura 25. **Pregunta 4.2**



Fuente: elaboración propia, apéndice 25.

Tabla XXIII. **Pregunta 5.2**

CURSO
Diplomado de Acondicionamiento de Agua para la Industria
Análisis Cuantitativo
Laboratorio de Ingeniería Química 2
Análisis Cualitativo

Fuente: elaboración propia, apéndice 25.

Tabla XXIV. **Pregunta 6.2**

CURSO
Diplomado de acondicionamiento de agua para la industria
Análisis cuantitativo
Procesos químicos industriales

Fuente: elaboración propia, apéndice 25.

Tabla XXV. **Clasificación de las preguntas realizadas en las encuestas**

Clasificación	Pregunta	Respuestas	Código
Antes de la realización de la práctica	¿Cómo calificaría usted la importancia de monitorear la calidad del agua que se alimenta a una caldera?	Alta Media Baja	Pregunta 1.1
	¿Considera que monitorear la calidad del agua que se alimenta a la caldera puede tener incidencia en el tiempo de vida útil de una caldera?	Si No	Pregunta 2.1
	¿Cree que el monitoreo del agua que se alimenta a la caldera debe de formar parte del mantenimiento preventivo del equipo?	Si No	Pregunta 3.1
	Durante sus estudios de Ingeniería Química ¿ha adquirido los conocimientos necesarios para llevar a cabo un monitoreo de la calidad del agua que se alimenta a los equipos de generación de vapor?	Si No	Pregunta 4.1
	Cursos en donde los estudiantes consideran que han adquirido los conocimientos necesarios para llevar a cabo un monitoreo de la calidad del agua de alimentación a los sistemas de generación de vapor	Respuesta abierta	Pregunta 5.1

Continuación de la tabla XXV.

	Durante sus estudios de Ingeniería Química ¿ha adquirido los conocimientos necesarios para diseñar un sistema para acondicionar el agua que se alimenta a una caldera?	Si No	Pregunta 6.1
	Cursos en donde los estudiantes consideran que han adquirido los conocimientos necesarios para diseñar sistemas de acondicionamiento de agua	Respuesta abierta	Pregunta 7.1
	¿Cree que es importante que durante la carrera de Ingeniería Química adquiera los conocimientos necesarios para llevar a cabo el monitoreo de la calidad del agua que se alimenta a la caldera y diseñar sistemas de acondicionamiento de este líquido?	Si No	Pregunta 8.1
Posterior a la realización de la práctica	Al diseñar un plan de mantenimiento preventivo de las instalaciones de generación de vapor ¿debe de tomarse en cuenta el monitoreo de la calidad del agua alimentada al equipo?	Si No	Pregunta 1.2
	¿Considera que la implementación del plan de monitoreo de la calidad del agua de alimentación a la caldera ayudará a incrementar la vida útil de la caldera?	Si No	Pregunta 2.2
	Monitorear la calidad del agua que se alimenta a la caldera tiene una importancia	Alta Media Baja	Pregunta 3.2
	¿Es importante que durante la carrera de Ingeniería Química aprenda a monitorear la calidad del agua que se alimenta a los equipos de generación de vapor, así como a diseñar sistemas de acondicionamiento para el agua de uso industrial?	Si No	Pregunta 4.2
	¿En qué cursos de la carrera de Ingeniería Química ha adquirido los conocimientos necesarios para monitorear y evaluar la calidad del agua que se alimenta a un equipo de generación de vapor?	Respuesta abierta	Pregunta 5.2
	¿En qué cursos de la carrera de Ingeniería Química ha adquirido los conocimientos necesarios para diseñar un sistema de acondicionamiento del agua que se alimenta a la caldera?	Respuesta abierta	Pregunta 6.2

Fuente: elaboración propia

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En la primera etapa de esta investigación, al comparar la magnitud del valor de la concentración de calcio del agua antes y después de pasar por el ablandador, se observa que ésta disminuye, indicando que el ablandador es eficaz. Al evaluar el Índice de Langelier se observa que la magnitud promedio de este parámetro disminuye, pasando de -0,72 a -0,60, reduciendo la potencialidad corrosiva del agua. Sin embargo, el agua que ingresa a la caldera continúa siendo altamente corrosiva.

Se observó al tomar las muestras de agua a la salida del ablandador que arrastraba una cantidad relativamente alta de cloruro de sodio, que provenía del ablandador, lo que perjudica a la caldera, incrementando la posibilidad de corrosión en su estructura, ya que el cloruro de sodio se clasifica como altamente corrosivo en equipos de generación de vapor.

En la segunda etapa, se diseñó una práctica para que los estudiantes aprendieran a monitorear la calidad del agua que ingresa a la caldera, y se redactó un manual para este fin (apéndice 13). Sin embargo, antes de poner a disposición de los alumnos el manual elaborado y realizar la práctica, se llevó a cabo una evaluación de sus conocimientos sobre el tema de acondicionamiento del agua utilizada para la generación de vapor y su monitoreo (apéndice 14).

Del curso de Laboratorio de Ingeniería Química 1 se evaluaron 38 alumnos, quienes obtuvieron una calificación promedio de 15,63 puntos sobre 100,00 puntos, con un coeficiente de variación de 73,2 por ciento, de igual forma se evaluaron 32 alumnos del curso de Laboratorio de Ingeniería Química

2 cuya calificación promedio fue de 12,69 puntos, con un coeficiente de variación de 83,91 por ciento.

La calificación promedio de los alumnos del curso de Laboratorio de Ingeniería Química 2 fue menor que la de los alumnos del primer laboratorio, a pesar de que los primeros contaban ya con conocimientos de transferencia de masa, que fue uno de los aspectos evaluados en el examen corto (apéndice 14). Se cuestionó, en las preguntas 7 y 8 sobre el intercambio iónico, que constituye una operación unitaria basada en la transferencia de masa. De los 32 alumnos evaluados del segundo curso, solamente 1 contestó correctamente a las preguntas referentes al intercambio iónico, evidenciando que sus conocimientos sobre las aplicaciones de transferencia de masa no están afianzados en los 31 alumnos restantes.

A partir de los resultados obtenidos en este examen corto se evidencia que los alumnos desconocen: la manera en que el agua puede dañar la estructura de un equipo de generación de vapor, cómo evaluar la calidad de este líquido, los procedimientos analíticos que se deben de llevar a cabo para realizar tales evaluaciones, y el significado del Índice de Langelier.

A partir de la encuesta de percepción cualitativa (apéndice 15) se determinó que el 92,00 por ciento de los alumnos del Laboratorio de Ingeniería Química 1 si consideraron que es de alta importancia monitorear la calidad del agua que se alimenta a una caldera, en tanto que solo el 8,00 por ciento consideró que tal monitoreo tiene una relevancia media.

Cuando se les cuestionó sobre si el monitoreo de la calidad del agua incidiría en el tiempo de vida útil de la caldera, todos los alumnos encuestados respondieron que sí, el 97,00 por ciento cree que tal monitoreo debe de llevarse

a cabo como parte de un plan de mantenimiento preventivo del equipo, sin embargo, un 68,00 por ciento indicó que durante sus estudio de Ingeniería Química no ha adquirido los conocimientos necesarios para lleva a cabo una evaluación de esta naturaleza. El 32,00 por ciento restante indicó que ha adquirido este tipo de conocimientos en los cursos: Balance de Masa y Energía (IQ-1), Transferencia de Calor (IQ-3), Análisis Cuantitativo, Calidad del Agua, Análisis Cualitativo, Química Ambiental, y en un cursos impartidos por el Congreso de Estudiantes de Ingeniería Química denominado: monitoreo de aguas residuales.

Respecto al diseño de sistemas de acondicionamiento de aguas para la generación de vapor, el 95,00 por ciento de los estudiantes respondieron que no han adquirido los conocimientos necesarios para desarrollar tales diseños. El 5,00 por ciento que respondió afirmativamente sobre la adquisición de estos conocimientos mencionó que lo aprendió en los cursos de: Análisis Cualitativo, Flujo de Fluidos (IQ-2) y Transferencia de Calor (IQ-3).

Todos los estudiantes coincidieron en que es importante que durante su formación como ingenieros químicos adquieran los conocimientos necesarios para monitorear la calidad del agua que se utiliza como alimentación a las calderas, y el diseño de sistemas para acondicionar este líquido.

En el caso de los alumnos del curso de Laboratorio de Ingeniería Química 2 se obtuvieron los siguientes resultados al realizar la encuesta: 91,00 por ciento de los estudiantes calificaron la importancia de monitorear la calidad del agua que se alimenta a una caldera como alta, el 100,00 por ciento de ellos afirmó que llevar a cabo este tipo de monitoreo puede incidir en el tiempo de vida útil de una caldera y que tal análisis debería de formar parte del mantenimiento preventivo del equipo.

Solamente el 56,00 por ciento de los alumnos encuestados indicó que durante su formación académica ha adquirido los conocimientos necesarios para llevar a cabo un monitoreo de la calidad del agua que se alimenta a un sistema de generación de vapor, en cursos como: Calidad del agua, Termodinámica 3, Transferencia de calor (IQ-3), Análisis Cuantitativo, Análisis Cualitativo, Laboratorio de Ingeniería Química 1, y en el Diplomado de Acondicionamiento de Agua para la Industria impartido por la Facultad de Ingeniería.

Cuando se le preguntó a los alumnos si habían adquirido los conocimientos necesarios para diseñar un sistema de acondicionamiento de agua para uso industrial, solamente el 6,00 por ciento de ellos respondió que si lo había hecho en los cursos de: Transferencia de Calor (IQ-3), Transferencia de Masa (IQ-4), Transferencia de Masa en Unidades Continuas (IQ-5) y el Diplomado de Acondicionamiento de Agua para la Industria.

Todos los estudiantes coincidieron en que es importante que durante su formación académica como ingenieros químicos adquieran los conocimientos necesarios para monitorear la calidad del agua y diseñar sistemas de acondicionamiento de dicho líquido para uso industrial.

Después de llevar a cabo la práctica diseñada con los alumnos, se evaluó el aprendizaje de los estudiantes por medio de un examen corto (apéndice 16) y la realización de una nueva encuesta sobre su percepción cualitativa de la práctica realizada (apéndice 17).

El examen corto y la encuesta se realizó a todos los estudiantes de ambos cursos, pero para comprobar la hipótesis planteada por medio del examen corto, se tomó una muestra de 5 alumnos con una probabilidad de ocurrencia

del 95,00 por ciento y un error estándar del 10,00 por ciento utilizando el método de los números al azar para seleccionar los exámenes que formarían parte de la muestra. En este segundo examen corto, los alumnos del curso de Laboratorio de Ingeniería Química 1 obtuvieron un puntaje promedio de 53,25 puntos sobre 100,00, en tanto que los del segundo cursos obtuvieron un puntaje de 36,5 puntos.

Como se puede apreciar en la figura 1 de la sección de resultados, la magnitud del coeficiente de variación entre las calificaciones de los alumnos evaluados disminuyó luego de realizar la práctica. Al momento de realizar la evaluación de las hipótesis planteadas, calculando un factor de comparación Z , en el caso de ambos cursos, se obtuvieron valores de Z calculados mayores a los Z críticos, lo que implica que con un nivel de confianza del 95,00 por ciento se acepta la hipótesis alternativa que la práctica realizada mejoró los conocimientos de los alumnos sobre el monitoreo del agua de alimentación a los sistemas de generación de vapor.

En el caso de las encuestas de percepción cualitativa realizadas luego de llevar a cabo la práctica se obtuvieron resultados que indican que ahora los estudiantes reconocían la importancia de llevar a cabo un monitoreo de la calidad del agua de alimentación a las calderas como parte de un plan de mantenimiento preventivo que incidiría en la vida útil del equipo.

Al cuestionarles sobre cursos en donde habían aprendido sobre el monitoreo del agua respondieron indicando que lo habían hecho en los siguientes cursos: Calidad del Agua, Flujo de Fluidos (IQ-2), Transferencia de Calor (IQ-3), Transferencia de Masa (IQ-4), Análisis Cualitativo, Análisis Cuantitativo, Termodinámica 3, Química Ambiental, Laboratorio de Ingeniería Química 1 y 2, Química Ambiental y el Diplomado de Acondicionamiento de

Agua para la Industria, sin embargo, los únicos cursos que se relacionan con esta temática son Calidad del Agua, Análisis Cualitativo y Cuantitativo, y el Diplomado de Acondicionamiento de Agua para la Industria.

A la pregunta sobre los cursos en donde aprendieron sobre el diseño de equipo para el acondicionamiento del agua para su uso en calderas, indicaron que lo habían hecho en los cursos de Procesos Químicos Industriales, Análisis Cualitativo y Cuantitativo, Termodinámica 3 y 4, Balance de Masa y Energía (IQ-1), Flujo de Fluidos (IQ-2), Transferencia de Calor (IQ-3), Laboratorio de Ingeniería Química 1 y el Diplomado de Acondicionamiento de Agua para la Industria. Ninguno de los estudiantes mencionó los cursos de Transferencia de Masa (IQ-4) y Transferencia de Masa en Unidades Continuas (IQ-5) en donde se aprenden las bases de la transferencia, la cual constituye una base importante para el diseño de este tipo de equipos.

CONCLUSIONES

1. El sistema de acondicionamiento de agua del Laboratorio de Operaciones Unitarias es efectivo al reducir la concentración de iones de calcio y la potencialidad incrustante del agua.
2. El agua cruda que se utiliza en la caldera es altamente corrosiva por poseer un Índice de Langelier de $-0,72$ al entrar al ablandador y de $-0,62$ una vez acondicionada.
3. Es posible implementar un sistema de monitoreo de la calidad del agua utilizada en la generación en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, en donde participen los estudiantes de los cursos de Laboratorio de Ingeniería Química 1 y 2, realizando una práctica en donde aprendan las rutinas necesarias para desarrollar el monitoreo.
4. Con la aplicación de la práctica desarrollada, los estudiantes incrementan sus conocimientos sobre monitoreo de la calidad de agua utilizada en equipos de generación de vapor.

RECOMENDACIONES

1. Cambiar las zeolitas de sodio que se encuentran dentro del ablandador instalado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.
2. Revisar el mecanismo de regeneración de la salmuera que se alimenta al ablandador.
3. Llevar a cabo un trabajo de investigación que permita evaluar la forma y orden en que se deberían de instalar ablandadores de zeolitas de sodio e hidrógeno, para determinar cuál es la configuración idónea (en serie o en paralelo) para acondicionar el agua de alimentación a la caldera del laboratorio.
4. Instalar un sistema de monitoreo del agua que ingresa a la caldera, de tipo digital.
5. Introducir en el pensum de estudios de la carrera de Ingeniería Química los aspectos indicados en este trabajo de graduación relacionados con el monitoreo de la calidad del agua en equipos de generación de vapor.
6. Establecer un vínculo de necesidad formativa entre el perfil de egreso del Ingeniero Químico y los aspectos relacionados con el manejo de equipos de generación de vapor.

7. Crear las condiciones físicas para introducir en el Laboratorio de Operaciones Unitarias un sistema de rutina de monitoreo del agua para la generación de vapor en la caldera y otros usos.

BIBLIOGRAFÍA

1. *Calculadora del Índice de saturación de Langelier* [en línea]. España
<http://www.lenntech.es/calculadoras/langelier/langelier.htm>.
[Consulta: 10 de febrero de 2013].
2. CONI, Emilio. *Indicadores para el monitoreo y la evaluación de .las actividades de control de la tuberculosis* [en línea]. Argentina.
http://www.redbioquimicasf.com.ar/bibliografia/bacterio/curso_tbc/curso_tbc_4_lectura_2.pdf. [Consulta: 10 de febrero de 2013].
3. DE FARIA, Edison. *Ingeniería didáctica* [en línea]. Costa Rica.
www.cimm.ucr.ac.cr/ojs/index.php/CIFEM/article/download/12/17.
[Consulta: 28 de marzo de 2013].
4. HERRERA, Julian. *Métodos de enseñanza-aprendizaje* [en línea].
Cuba. <http://casanchi.com/did/metoea01.pdf>. [Consulta: 28 de marzo de 2013].
5. LARROYO, Francisco. *Historia general de la pedagogía*. 20a ed.
México: Porrúa, S 1984. 638-640 p.
6. *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*.
17a ed. España: Diaz de Santos, 1992. 34-67 p.
7. POWELL, Sheppard. *Acondicionamiento de aguas para la industria*.
México: Limusa, 1966. 7-13 p.

8. SKOOG, Douglas. *Química analítica*. 7a ed. México: McGraw-Hill, 2000. 122-154 p.
9. SPIEGEL, Murray. *Estadística*. McGraw-Hill. 167-177 p.
10. UNDA, Francisco. *Ingeniería sanitaria aplicada a saneamiento y salud pública*. México: UTEHA, 1969. 98-99 p.
11. VILLEGAS, Allan. *La tabla de números al azar* [en línea]. Costa Rica. <http://www.uaca.ac.cr/bv/ebooks/estadistica/11.pdf>. [Consulta: 15 de abril de 2014].

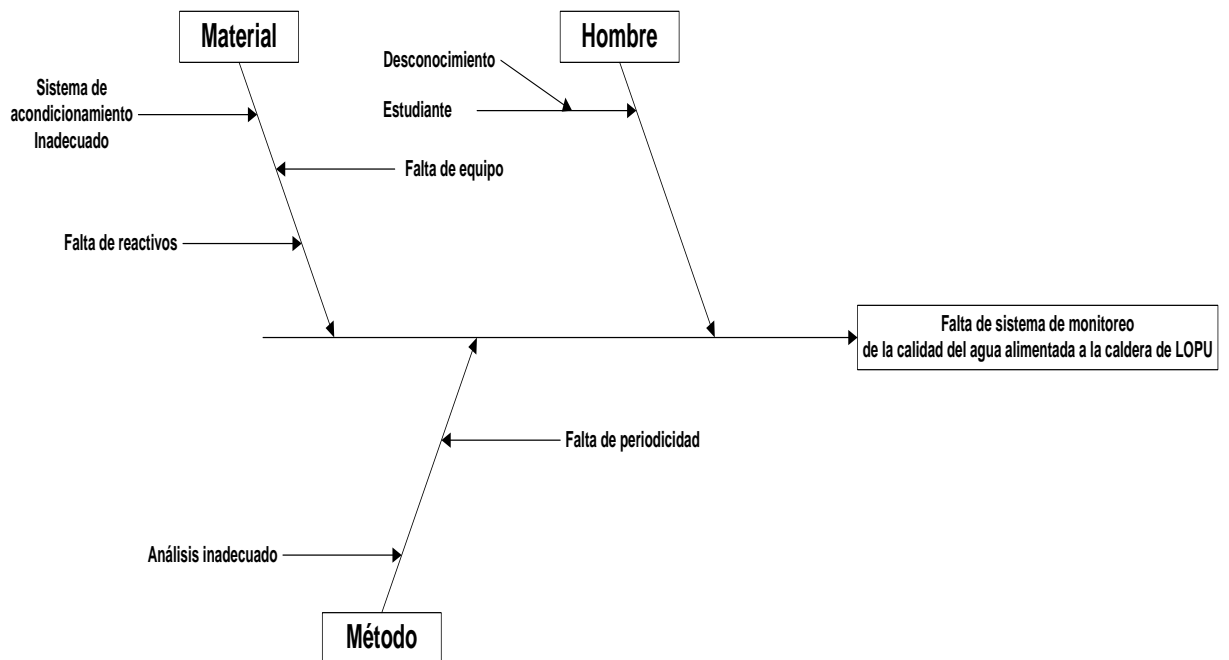
APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**

Etapa de la investigación	Información	Requisito académico
Procedimiento analítico	Determinación del tamaño de la muestra	Estadística 2
	Análisis químico	Análisis cuantitativo
	Evaluación del equipo de acondicionamiento de agua	Laboratorio de Ingeniería Química 2
	Evaluación de la calidad del agua	Calidad del agua
Desarrollo de la práctica	Determinación del tamaño de la muestra	Estadística 2
	Teoría: Procedimiento analítico	Análisis cuantitativo
Implementación de la práctica	Evaluación de la hipótesis	Estadística 2

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Diagrama de Ishikawa**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3 **Muestra de cálculo para la determinación del Índice de Langelier (primera parte)**

Determinación de la fuerza iónica (I) del agua:

[Ecuación 18]

$$I = 2,5E - 5 * S_{TD} * (1E9)$$

Donde:

I = fuerza iónica (mol/L)

S_{TD} = sólidos totales disueltos (kg/cm³)

Ejemplo: fuerza iónica cuando la magnitud de los sólidos totales disueltos es de 1,97E-7 kilogramos por centímetro cúbico (197 mg/L).

$$I = 2,5E - 5 * 1,97E - 7 * 1E9$$

$$I = 4,925E - 3 \text{ mol/L}$$

Determinación el coeficiente de actividad (γ) de los iones monovalentes en función de la fuerza iónica (I):

Si $I < 0,5M$

[Ecuación 19]

$$\log \gamma_m = -AZ^2 \frac{\bar{I}}{1 + \bar{I}} - 0,2I$$

Si $0,5M < I < 1,0M$

[Ecuación 20]

$$\log \gamma_m = -AZ^2 \frac{\bar{I}}{1 + \bar{I}}$$

Donde el parámetro A se determina como:

[Ecuación 21]

$$A = 1,82 * 10E6 * D T^{-\frac{3}{2}}$$

Donde:

- γ_m = coeficiente de actividad (adimensional)
- D = constante dieléctrica del agua (78,3)
- T = temperatura (K)
- Z = número de oxidación de las especies químicas (1)
- I = fuerza iónica (mol/L)

Ejemplo: cálculo del coeficiente de actividad cuando la fuerza iónica es de 0,004925 molar y la temperatura del agua es de 303 grados Kelvin (30°C)

$$A = 1,82 * 10E6 * 78,3 * (303,00)^{-\frac{3}{2}}$$

$$A = 0,49$$

$$\log \gamma_m = -(0,49)(1)^2 \frac{0,004925}{1 + 0,004025} - 0,2(0,004925)$$

$$\log \gamma_m = -0,032169$$

Calcular pK_2 :

[Ecuación 22]

$$pK_2 = \frac{2902,39}{T} + 0,02379 T - 6,498$$

Donde:

T = temperatura (K)

Ejemplo: determinación del pK_2 para una muestra de agua a 30 grados *Celsius*.

$$T \text{ K} = T \text{ }^\circ\text{C} + 273$$

$$T \text{ K} = 30^\circ\text{C} + 273 = 303\text{K}$$

$$pK_2 = \frac{2902,39}{303} + 0,02379 \cdot 303 - 6,498$$

$$pK_2 = 10,16$$

Determinar el coeficiente de actividad de los iones divalentes (γ_D):

[Ecuación 23]

$$\log \gamma_D = -AZ^2 \frac{\bar{I}}{1 + \bar{I}}$$

[Ecuación 24]

$$A = 1,82 * 10E6 * DT^{-\frac{3}{2}}$$

Donde:

D = constante dieléctrica del agua (78,3)

T = temperatura (K)

Z = número de oxidación de las especies químicas (2)

I = fuerza iónica (mol/L)

Ejemplo: coeficiente de actividad de los iones divalentes, cuando la muestra de agua tiene una fuerza iónica de 0,004925 molar, y una temperatura de 303 grados Kelvin (30°C):

$$A = 1,82 * 10E6 * 78,3 * (303)^{-\frac{3}{2}}$$

$$A = 0,49$$

$$\log\gamma_D = -(0,49)(2)^2 \frac{0,004925 \text{ mol/L}}{1 + 0,004925 \text{ mol/L}}$$

$$\log\gamma_D = -0,13$$

Calcular K'_2

[Ecuación 25]

$$K'_2 = \frac{K_2}{\gamma_D}$$

Ejemplo: determinación de K'_2 cuando pK_2 tiene una magnitud de 10,16 y $\log\gamma_D$ tiene una magnitud de -0,13:

$$K_2 = 10^{-10,29}$$

$$K_2 = 5,12E - 11$$

$$\gamma_D = 10^{-0,13}$$

$$\gamma_D = 0,74$$

$$K'_2 = \frac{5,12E - 11}{0,74}$$

$$K'_2 = 6,94E - 11$$

Calcular pK_s y K'_s

[Ecuación 26]

$$pK_s = 0,01183(T - 273) + 8,03$$

Donde:

T = temperatura (K)

pK'_s = potencial de la constante de actividad (adimensional)

[Ecuación 27]

$$k'_s = \frac{K_s}{(\gamma_D)^2}$$

Ejemplo: determinación de pK_s cuando la temperatura de trabajo es de 303 grados Kelvin y γ_D tiene una magnitud de 0,74.

$$pK_s = 0,01183(303 - 273) + 8,03$$

$$pK_s = 8,38$$

$$k_s = 10^{-8,38} = 4,12E - 9$$

$$k'_s = \frac{4,12E - 9}{(0,74)^2} = 7,52E - 9$$

Determinación de la dureza de calcio:

[Ecuación 28]

$$H \text{ EDTA} * \frac{1L}{1000\text{cm}^3 \text{ EDTA}} * \frac{Y\text{mol EDTA}}{L} * \frac{1\text{mol Ca}^{+2}}{1\text{mol EDTA}} = \text{Mol de Ca}^{+2}$$

Donde:

H = volumen de EDTA gastado en la titulación (cm³)

Y = concentración de la solución de EDTA empleada en la titulación (mol/L)

[Ecuación 29]

$$[\text{Ca}^{+2}] = \frac{\text{Mol de Ca}^{+2}}{V}$$

Donde:

[Ca⁺²] = concentración de calcio (mol/L)

V = volumen de la muestra (L)

Ejemplo: determinación de la concentración de calcio en una muestra de 50 cm³ titulada con una solución de EDTA 0,01 moles por litro, de la cual se utilizaron 4 centímetros cúbicos:

$$4\text{cm}^3 \text{ EDTA} * \frac{1\text{L}}{1000\text{cm}^3 \text{ EDTA}} * \frac{0,01\text{mol EDTA}}{\text{L}} * \frac{1\text{mol Ca}^{+2}}{1\text{mol EDTA}} = 0,00004\text{mol}$$

$$[\text{Ca}^{+2}] = \frac{0,00004\text{mol}}{(50\text{cm}^3 * \frac{1\text{L}}{1000\text{cm}^3})} = 0,0008 \text{ mol/L}$$

Determinación de la alcalinidad:

Determinación de la concentración de carbonato de calcio, por medio de la titulación con ácido sulfúrico y fenolftaleína:

[Ecuación 30]

$$ZH_2SO_4 * \frac{1LH_2SO_4}{1000cm^3 H_2SO_4} * \frac{WmolH_2SO_4}{1LH_2SO_4} * \frac{1mol CaCO_3}{1mol H_2SO_4} = molCaCO_3$$

[Ecuación 31]

$$CaCO_3 = \frac{mol CaCO_3}{V}$$

Donde:

Z = volumen gastado de ácido sulfúrico en la titulación (cm³)

W = concentración molar de la solución de ácido sulfúrico (mol/L)

[CaCO₃] = concentración de carbonato de calcio (mol/L)

V = volumen de la muestra (L)

Ejemplo: concentración de carbonato de calcio en la primera repetición de los análisis realizados al agua de alimentación al ablandador. El agua no cambió de color al agregar la fenolftaleína, el gasto de ácido, en este caso fue de cero mililitros.

$$0 cm^3 H_2SO_4 * \frac{1LH_2SO_4}{1000cm^3 H_2SO_4} * \frac{0,02 \text{ Equivalente gramo } H_2SO_4}{1LH_2SO_4} * \frac{1 mol H_2SO_4}{2 \text{ Equivalente gramo } H_2SO_4} * \frac{1mol CaCO_3}{1mol H_2SO_4} = 0molCaCO_3$$

Determinación de la concentración del ion bicarbonato mediante la titulación con ácido sulfúrico y naranja de metilo.

[Ecuación 32]

$$P \text{ H}_2\text{SO}_4 * \frac{1\text{LH}_2\text{SO}_4}{1000\text{cm}^3 \text{ H}_2\text{SO}_4} * \frac{Q \text{ molH}_2\text{SO}_4}{1\text{LH}_2\text{SO}_4} * \frac{1\text{mol HCO}_3^-}{1\text{mol H}_2\text{SO}_4} = \text{molHCO}_3^-$$

[Ecuación 33]

$$\text{HCO}_3^- = \frac{\text{molHCO}_3^-}{V}$$

Donde:

P = volumen gastado de ácido sulfúrico en la titulación (cm³)

Q = concentración molar de la solución de ácido sulfúrico (mol/L)

HCO₃⁻ = concentración del ion bicarbonato (mol/L)

V = volumen de la muestra (L)

Ejemplo: concentración del ion bicarbonato en la primera repetición de los análisis realizados al agua de alimentación al ablandador, con una muestra de 50 centímetros cúbicos. En este caso el volumen desplazado de ácido sulfúrico fue de 6,70 centímetros cúbicos.

$$6,7 \text{ cm}^3\text{H}_2\text{SO}_4 * \frac{1\text{LH}_2\text{SO}_4}{1000\text{cm}^3 \text{ H}_2\text{SO}_4} * \frac{0,02 \text{ Equivalente gramo H}_2\text{SO}_4}{1\text{LH}_2\text{SO}_4} * \frac{1 \text{ mol H}_2\text{SO}_4}{2\text{Equivalente gramo H}_2\text{SO}_4} * \frac{1\text{mol HCO}_3^-}{1\text{mol H}_2\text{SO}_4} = 0,000067\text{molHCO}_3^-$$

$$\text{HCO}_3^- = \frac{0,000067 \text{ mol HCO}_3^-}{(50 \text{ cm}^3 * \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ cm}^3})} = 0,00134 \text{ mol/L}$$

Determinación del pH de saturación del agua (pH_s):

[Ecuación 34]

$$\text{pH}_s = \text{pK}'_2 + \text{pCa}^{+2} - \text{pK}'_s - \log(2 \text{ Alc}) - \log \gamma_m$$

Donde:

pH_s = potencial de hidrógeno de saturación (adimensional)

pK'₂ = potencial de la constante de actividad (adimensional)

pCa⁺² = potencial de la concentración de calcio (adimensional)

pK'_s = potencial de la constante de actividad (adimensional)

Alc = alcalinidad, expresada como la concentración del ion bicarbonato (M)

γ_m = coeficiente de actividad (adimensional)

Ejemplo:

$$\text{pH}_s = 10,16 + 3,10 - 8,12 - \log 2 \cdot 0,00134 - -0,032169$$

$$\text{pH}_s = 7,74$$

Cálculo de la magnitud del Índice de Langelier:

[Ecuación 35]

$$I_L = \text{pH} - \text{pH}_s$$

Donde:

I_L = Índice de Langelier (adimensional)

pH = potencial de hidrógeno (adimensional)

pH_s = potencial de hidrógeno de saturación (adimensional)

Ejemplo:

$$IL = 7,24 - 7,74 = -0,50$$

Determinación del Índice de Langelier promedio:

[Ecuación 36]

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

Donde:

x = promedio de una muestra (puntos)

n = número de observaciones (adimensional)

a_i = dato observado (adimensional)

Ejemplo: promedio de las 8 repeticiones realizadas a la muestra tomada antes de entrar al ablandador.

$$X = \frac{-0,50 - 0,66 - 0,77 - 0,79 - 0,76 - 0,75 - 0,74 - 0,8}{8} = -0,72$$

Datos calculados (primera parte)

Apéndice 4. **Hoja de datos originales (primera parte)**

Fecha: 16/5/2013

Laboratorio: Unificado de Química y microbiología Sanitaria. Dra. Alba Tabarini

Hoja De recolección de datos

Región del sistema	Muestra No.	Temperatura (°C)	pH	Volumen desplazado EDTA (ml)	Volumen Desplazado (ml)	Conductividad STD (mg/l)
Antes del ablandador	1	30	7.24	4	6.7	197
	2	30	7.01	4	7.8	198
	3	30	6.86	4.4	7.8	199
	4	30	6.90	3.7	8	200
	5	30	6.92	4	7.7	199
	6	30	6.93	3.8	8	199
	7	30	6.95	3.6	8.2	199
	8	30	6.95	3.4	7.7	199
Después del ablandador	1	30	7.12	3.3	9.6	233
	2	30	7.10	3.1	9.7	232
	3	30	7.11	3	9.7	230
	4	30	7.12	2.5	9.4	230
	5	30	7.12	3.1	10	231
	6	30	7.12	3	9.7	230
	7	30	7.12	2.7	9.8	230
	8	30	7.10	3.3	9.8	231

Fuente: Elaboración propia


 M.Sc. Ing. Zenón Much Santos
 ZENÓN MUCH SANTOS
 Ing. Químico Col. No. 420
 M. Sc. en Ingeniería Sanitaria



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Determinación de parámetros fisicoquímicos del agua de alimentación al sistema de generación instalado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias**

PUNTO	REPETICIÓN	pH (adimensional)	STD (kg/cm ³)	EDTA (cm ³)	H ₂ SO ₄ F (cm ³)	H ₂ SO ₄ T (cm ³)	Temperatura (K)
Antes del ablandador	1	7,24	1,97E-07	4,00	0,00	6,70	303,00
	2	7,01	1,98E-07	4,00	0,00	7,80	303,00
	3	6,86	1,99E-07	4,40	0,00	7,80	303,00
	4	6,90	2,00E-07	3,70	0,00	8,00	303,00
	5	6,92	1,99E-07	4,00	0,00	7,70	303,00
	6	6,93	1,99E-07	3,80	0,00	8,00	303,00
	7	6,95	1,99E-07	3,60	0,00	8,20	303,00
	8	6,95	1,99E-07	3,40	0,00	7,70	303,00
Después del ablandador	1	7,12	2,33E-07	3,30	0,00	9,60	303,00
	2	7,10	2,32E-07	3,10	0,00	9,70	303,00
	3	7,11	2,30E-07	3,00	0,00	9,70	303,00
	4	7,12	2,30E-07	2,50	0,00	9,40	303,00
	5	7,12	2,31E-07	3,10	0,00	10,00	303,00
	6	7,12	2,30E-07	3,00	0,00	9,70	303,00
	7	7,12	2,30E-07	2,70	0,00	9,80	303,00
	8	7,10	2,31E-07	3,30	0,00	9,80	303,00

Fuente: elaboración propia, apéndice 4.

Apéndice 6. **Determinación de la concentración de calcio**

PUNTO	REPETICIÓN	EDTA (cm ³)	Ca ⁺² (mol/L)	Ca ⁺² (mol/L) Promedio	pCa ⁺²
Antes del ablandador	1	4,00	8,02E-04	7,74E-04	3,10
	2	4,00	8,02E-04		3,10
	3	4,40	8,82E-04		3,05
	4	3,70	7,41E-04		3,13
	5	4,00	8,02E-04		3,10
	6	3,80	7,62E-04		3,12
	7	3,60	7,21E-04		3,14
	8	3,40	6,81E-04		3,17
Después del ablandador	1	3,30	6,61E-04	6,01E-04	3,18
	2	3,10	6,21E-04		3,21
	3	3,00	6,01E-04		3,22
	4	2,50	5,01E-04		3,30
	5	3,10	6,21E-04		3,21
	6	3,00	6,01E-04		3,22
	7	2,70	5,41E-04		3,27
	8	3,30	6,61E-04		3,18

Fuente: elaboración propia, apéndice 3: ecuación 28 y 29.

Apéndice 7. **Determinación de la concentración de carbonato de calcio**

PUNTO	REPETICIÓN	H ₂ SO ₄ F (cm ³)	H ₂ SO ₄ T (cm ³)	HCO ₃ ⁻ (mol/L) T
Antes del ablandador	1	0,00	6,70	1,34E-03
	2	0,00	7,80	1,56E-03
	3	0,00	7,80	1,56E-03
	4	0,00	8,00	1,60E-03
	5	0,00	7,70	1,54E-03
	6	0,00	8,00	1,60E-03
	7	0,00	8,20	1,64E-03
	8	0,00	7,70	1,54E-03
Después del ablandador	1	0,00	9,60	1,92E-03
	2	0,00	9,70	1,94E-03
	3	0,00	9,70	1,94E-03
	4	0,00	9,40	1,88E-03
	5	0,00	10,00	2,00E-03
	6	0,00	9,70	1,94E-03
	7	0,00	9,80	1,96E-03
	8	0,00	9,80	1,96E-03

Fuente: elaboración propia, apéndice 3: ecuación 30 y 31.

Apéndice 8. **Determinación de la fuerza iónica del agua y el coeficiente de actividad**

PUNTO	REPETICIÓN	STD (kg/cm ³)	I(mol/L)	Log _{y_m}
Antes del ablandador	1	1,97E-07	4,93E-03	-3,22E-02
	2	1,98E-07	4,95E-03	-3,22E-02
	3	1,99E-07	4,98E-03	-3,23E-02
	4	2,00E-07	5,00E-03	-3,24E-02
	5	1,99E-07	4,98E-03	-3,23E-02
	6	1,99E-07	4,98E-03	-3,23E-02
	7	1,99E-07	4,98E-03	-3,23E-02
	8	1,99E-07	4,98E-03	-3,23E-02
Después del ablandador	1	2,33E-07	5,83E-03	-3,47E-02
	2	2,32E-07	5,80E-03	-3,47E-02
	3	2,30E-07	5,75E-03	-3,45E-02
	4	2,30E-07	5,75E-03	-3,45E-02
	5	2,31E-07	5,78E-03	-3,46E-02
	6	2,30E-07	5,75E-03	-3,45E-02
	7	2,30E-07	5,75E-03	-3,45E-02
	8	2,31E-07	5,78E-03	-3,46E-02

Fuente: elaboración propia, apéndice 3: ecuación 18, 19 y 20.

Apéndice 9. **Determinación de pK_2 y el coeficiente de actividad de los iones divalentes**

PUNTO	REPETICIÓN	Temperatura (K)	pK_2	K_2	$\log \gamma_D$	γ_D	K_2'	pK_2'
Antes del ablandador	1	303,00	10,29	0,00	-0,13	0,74	6,94E-11	10,16
	2	303,00	10,29	0,00	-0,13	0,74	6,95E-11	10,16
	3	303,00	10,29	0,00	-0,13	0,74	6,95E-11	10,16
	4	303,00	10,29	0,00	-0,13	0,74	6,96E-11	10,16
	5	303,00	10,29	0,00	-0,13	0,74	6,95E-11	10,16
	6	303,00	10,29	0,00	-0,13	0,74	6,95E-11	10,16
	7	303,00	10,29	0,00	-0,13	0,74	6,95E-11	10,16
	8	303,00	10,29	0,00	-0,13	0,74	6,95E-11	10,16
Después del ablandador	1	303,00	10,29	0,00	-0,14	0,72	7,11E-11	10,15
	2	303,00	10,29	0,00	-0,14	0,72	7,11E-11	10,15
	3	303,00	10,29	0,00	-0,14	0,72	7,10E-11	10,15
	4	303,00	10,29	0,00	-0,14	0,72	7,10E-11	10,15
	5	303,00	10,29	0,00	-0,14	0,72	7,10E-11	10,15
	6	303,00	10,29	0,00	-0,14	0,72	7,10E-11	10,15
	7	303,00	10,29	0,00	-0,14	0,72	7,10E-11	10,15
	8	303,00	10,29	0,00	-0,14	0,72	7,10E-11	10,15

Fuente: elaboración propia, apéndice 3: ecuación 22, 23, 24 y 25.

Apéndice 10. **Determinación de pK_s**

PUNTO	REPETICIÓN	Temperatura (K)	pK_s	K_s	K'_s	pK'_s
Antes del ablandador	1	303,00	8,38	4,12E-09	7,52E-09	8,12
	2	303,00	8,38	4,12E-09	7,53E-09	8,12
	3	303,00	8,38	4,12E-09	7,54E-09	8,12
	4	303,00	8,38	4,12E-09	7,55E-09	8,12
	5	303,00	8,38	4,12E-09	7,54E-09	8,12
	6	303,00	8,38	4,12E-09	7,54E-09	8,12
	7	303,00	8,38	4,12E-09	7,54E-09	8,12
	8	303,00	8,38	4,12E-09	7,54E-09	8,12
Después del ablandador	1	303,00	8,38	4,12E-09	7,90E-09	8,10
	2	303,00	8,38	4,12E-09	7,89E-09	8,10
	3	303,00	8,38	4,12E-09	7,87E-09	8,10
	4	303,00	8,38	4,12E-09	7,87E-09	8,10
	5	303,00	8,38	4,12E-09	7,88E-09	8,10
	6	303,00	8,38	4,12E-09	7,87E-09	8,10
	7	303,00	8,38	4,12E-09	7,87E-09	8,10
	8	303,00	8,38	4,12E-09	7,88E-09	8,10

Fuente: elaboración propia, apéndice 3: ecuación 26 y 27.

Apéndice 11. **Determinación del pH de saturación e Índice de Langelier**

PUNTO	REPETICIÓN	pH (adimensional)	pCa ⁺²	HCO ₃ ⁻ (M)	logY _m	pK' ₂	pK' _s	pH _s	Índice de Langelier
Antes del ablandador	1	7,24	3,10	1,34E-03	-3,22E-02	10,16	8,12	7,74	-0,50
	2	7,01	3,10	1,56E-03	-3,22E-02	10,16	8,12	7,67	-0,66
	3	6,86	3,05	1,56E-03	-3,23E-02	10,16	8,12	7,63	-0,77
	4	6,90	3,13	1,60E-03	-3,24E-02	10,16	8,12	7,69	-0,79
	5	6,92	3,10	1,54E-03	-3,23E-02	10,16	8,12	7,68	-0,76
	6	6,93	3,12	1,60E-03	-3,23E-02	10,16	8,12	7,68	-0,75
	7	6,95	3,14	1,64E-03	-3,23E-02	10,16	8,12	7,69	-0,74
	8	6,95	3,17	1,54E-03	-3,23E-02	10,16	8,12	7,75	-0,80
Después del ablandador	1	7,12	3,18	1,92E-03	-3,47E-02	10,15	8,10	7,68	-0,56
	2	7,10	3,21	1,94E-03	-3,47E-02	10,15	8,10	7,70	-0,60
	3	7,11	3,22	1,94E-03	-3,45E-02	10,15	8,10	7,71	-0,60
	4	7,12	3,30	1,88E-03	-3,45E-02	10,15	8,10	7,80	-0,68
	5	7,12	3,21	2,00E-03	-3,46E-02	10,15	8,10	7,68	-0,56
	6	7,12	3,22	1,94E-03	-3,45E-02	10,15	8,10	7,71	-0,59
	7	7,12	3,27	1,96E-03	-3,45E-02	10,15	8,10	7,75	-0,63
	8	7,10	3,18	1,96E-03	-3,46E-02	10,15	8,10	7,67	-0,57

Fuente: elaboración propia, apéndice 3: ecuación 34.

Apéndice 12. **Determinación del Índice de Langelier promedio e interpretación**

PUNTO	ÍNDICE DE LANGUELIER PROMEDIO	INTERPRETACIÓN
Antes del ablandador	-0,72	Corrosión severa
Después del ablandador	-0,60	Corrosión severa

Fuente: elaboración propia, apéndice 3: ecuación 35, 36.

Apéndice 13. **Manual para la realización de la práctica**

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Química

Laboratorio de Operaciones Unitarias

Tesista: Ana Rufina Herrera Soto

**MANUAL PARA LA REALIZACIÓN DE LA PRÁCTICA DE: MONITOREO DE
LA CALIDAD DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN A UN SISTEMA DE
GENERACIÓN DE VAPOR**

Segundo Semestre, 2013

Continuación del apéndice 13.

INTRODUCCIÓN

En el laboratorio de Operaciones Unitarias se encuentra instalado un sistema de generación de vapor junto con un sistema de acondicionamiento del agua que se alimenta a la caldera, el cual tiene la finalidad de adecuar el agua para que los solutos que arrastra no dañen la estructura de la caldera, eliminando por medio de un intercambio iónico, el calcio y el magnesio que pudieran provocar incrustaciones en el equipo.

La presente práctica tiene como objetivo que los alumnos que cursan el laboratorio de Ingeniería Química aprendan a monitorear la calidad del agua que se alimenta a la caldera por medio de la evaluación del Índice de Langelier, y a interpretar el significado de este.

INSTRUCCIONES GENERALES:

- La práctica se llevará a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Operaciones Unitarias. Esta actividad se llevará a cabo al finalizar la tarea correspondiente al equipo de Medidores de flujo (en este documento se adjunta un calendario de actividades específicas para la práctica).
- Para esta práctica no se llevará a cabo una preparación.
- Para la práctica cada alumno debe de llevar impreso este manual. Además de utilizar el equipo de seguridad obligatorio del Laboratorio de Operaciones Unitarias, el estudiante debe de llevar guantes de Látex, Lentes de seguridad y mascarilla.
- Después de llevar a cabo esta actividad los grupos de trabajo deben de entregar un Informe de realización y responderán un examen corto sobre el tema (según el calendario de actividades proporcionado).

Continuación del apéndice 13.

MARCO TEÓRICO

Las calderas son equipos utilizados para generar vapor de agua, dentro de este equipo el agua sufre un cambio de estado pasando de líquido a vapor gracias a la energía suministrada por cualquiera de los combustibles que se quemen en la caldera. El agua que se alimenta al equipo de generación de vapor no es pura, pues lleva disueltos una diversidad de compuestos como bicarbonato de sodio, magnesio, calcio, cloruro de sodio que pueden llegar a dañar la estructura del equipo, provocando incrustación o corrosión. La energía suministrada por el combustible no es suficiente para provocar un cambio de estado de los compuestos disueltos en el agua, por lo tanto estos permanecen dentro de la caldera provocando los problemas antes mencionados.

En la siguiente tabla se clasifican los compuestos que pueden perjudicar la estructura del sistema de generación de vapor:

Tabla I. **Componentes que pueden perjudicar a las calderas**

Componentes	Efecto posible cuando se encuentra presente en agua para calderas
Sólidos en suspensión	Arrastres, espuma, lodos o incrustación
Sílice	Incrustación
Carbonato de Calcio	Incrustación
Bicarbonato de Calcio	Incrustación
Sulfato de Calcio	Incrustación, corrosión
Cloruro de Calcio	Incrustación
Carbonato de Magnesio	Incrustación
Bicarbonato de Magnesio	Incrustación
Cloruro de Magnesio	Incrustación, corrosión
Ácidos libres	Corrosión
Cloruro de Sodio	Inerte, pero puede ser corrosivo bajo ciertas condiciones
Carbonato de Sodio	Arrastres, espuma, fragilización
Bicarbonato de Sodio	Arrastres, espuma, fragilización

Continuación del apéndice 13.

Acido Carbónico	Corrosión
Oxígeno	Corrosión
Grasa y aceite	Corrosión, depósitos, arrastres, espuma
Materia orgánica y aguas negras	Corrosión, depósitos, arrastres, espuma

Fuente: Ref. No.2

Para reducir el potencial dañino del líquido alimentado a los equipos de generación de vapor y optimizar la vida útil de estos es necesario llevar a cabo acciones de mantenimiento preventivo que deben de incluir el acondicionamiento del agua de alimentación y el monitoreo de la calidad de este líquido, que debe de realizarse con frecuencia debido a que la calidad del agua se ve afectada en función de las estaciones, modificando la naturaleza de los solutos arrastrados. El proceso de acondicionamiento del agua que se implementa debe de escogerse de acuerdo al tipo de solutos presentes en el agua y su potencialidad para perjudicar la estructura del equipo, en la industria se pueden encontrar ejemplos de acondicionamiento de agua realizado por medio de la adición de reactivos o mediante procesos de transferencia de masa, el Laboratorio de Operaciones Unitarias cuenta con un sistema de acondicionamiento consistente en un ablandador de zeolitas de sodio dentro del cual se da un proceso de transferencia de masa cuando se realiza un intercambio iónico en la resina contenida dentro de este equipo.

Monitoreo

Sheppard Powell recomienda en su libro "Acondicionamiento de aguas para la industria" monitorear la calidad del agua de una a cuatro veces al día, dependiendo de la variabilidad de la calidad del agua.

Norma ASTM D3370-95a:

Esta norma estandariza la forma en que se deben de tomar muestras de agua en conductos cerrados. En este documento se definen métodos y se designa el equipo más adecuado para llevar a cabo la recolección de muestras.

Continuación del apéndice 13.

Según esta norma la recolección de muestras debe de hacerse con tal regularidad que los parámetros de calidad evaluados se caractericen adecuadamente.

Evaluar la calidad del agua:

Al evaluar la calidad del agua deben de monitorearse aquellos parámetros que sean importantes según el uso que se le dará a este líquido. En el caso del agua que se alimenta a una caldera, como ya se mencionó anteriormente, este líquido sufrirá un cambio de estado a raíz del cual dejará dentro de la estructura solutos que ha arrastrado consigo y que pueden provocar corrosión o incrustación. Para evaluar la potencialidad dañina del agua se han desarrollado indicadores numéricos como el Índice de Langelier, que se describe a continuación:

Índice de Langelier: Es un indicador de la saturación de carbonato de Calcio en el agua. Debido al calentamiento el Bicarbonato de Calcio, presente en el agua, se convierte en Carbonato de Calcio, provocando incrustaciones y disminuyendo la potencialidad corrosiva del Dióxido de Carbono, cuando el Dióxido de Carbono, los carbonatos y los bicarbonatos alcanzan el equilibrio no se provoca ni incrustación ni corrosión, por lo tanto cuantificar la saturación del Carbonato de Calcio en el agua, permite crear una relación que describe al agua como incrustante o corrosiva.

Para evaluar el Índice de Langelier debe de determinarse: la dureza de calcio, la alcalinidad, la temperatura, los sólidos totales disueltos y el pH del agua.

A continuación se describe el procedimiento para determinar el Índice de Langelier:

1. En primer lugar se debe de calcular la fuerza iónica (I) del agua:

$$I = (2.5E - 5) * (TDS)$$

Ecuación No.1

Ref.3

2. Determinar el coeficiente de actividad (γ) de los iones monovalentes en función de la fuerza iónica (I):

Continuación del apéndice 13.

Si $I < 0.5M$

$$\log \gamma_m = -AZ^2 \left(\frac{\sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} - 0.2I \right)$$

Ecuación No.2
Ref.3

Si $0.5M < I < 1.0M$

$$\log \gamma_m = -AZ^2 \left(\frac{\sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} \right)$$

Ecuación No.3
Ref.3

En ambos casos:

$$A = 1.82 * 10E6 * (DT)^{-\frac{3}{2}}$$

Ecuación No.4
Ref.3

$D = 78.3 =$ Constante dieléctrica del agua

$T =$ Temperatura en (k)

$Z = 1 =$ Número de oxidación de las especies químicas.

3. Calcular pK_2

$$pK_2 = \frac{2902.39}{T} + 0.02379(T) - 6.498$$

Ecuación No.5

Continuación del apéndice 13.

Ref.3

$T = \text{Temperatura en } ^\circ\text{C}$

4. Determinar γ_D , es decir el coeficiente de actividad de los iones divalentes:

$$\log \gamma_D = -AZ^2 \left(\frac{\sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} \right)$$

Ecuación No.6

Ref.3

$$A = 1.82 * 10E6 * (DT)^{-\frac{3}{2}}$$

Ecuación No.7

Ref.3

$D = 78.3 = \text{Constante dieléctrica del agua}$

$T = \text{Temperatura en K}$

$Z = 2 = \text{Número de oxidación de las especies químicas.}$

5. Calcular K'_2

$$K'_2 = \frac{K_2}{\gamma_D}$$

Ecuación No.8

Ref.3

6. Calcular pK_s y K'_s

$$pK_s = 0.01183T + 8.03$$

Ecuación No.9

Ref.3

Continuación del apéndice 13.

$T = \text{Temperatura en } ^\circ\text{C}$

$$k'_s = \frac{K_s}{(\gamma_D)^2}$$

Ecuación No.10

Ref.3

7. La dureza de Calcio y la alcalinidad deben de tener unidades de moles/litro, a continuación se especifica la conversión de ppm a dichas unidades:

$$Ca^{+2} \left(\frac{\text{mol}}{\text{l}} \right) = \left(\frac{Ca^{+2}(\text{ppm}) \cdot 10^{-3}}{40} \right)$$

Ecuación No.11

Ref.3

$$Alc \left(\frac{\text{mol}}{\text{l}} \right) = \left(\frac{Alc(\text{ppm}) \cdot 10^{-3}}{100} \right)$$

Ecuación No.12

Ref.3

8. Determine el pH de saturación del agua (pH_s):

$$pH_s = pK'_2 + pCa^{+2} - pK'_s - \log(2(Alc)) - \log \gamma_m$$

Ecuación No.13

Ref.3

Nota: en esta ecuación los valores de dureza de calcio y alcalinidad utilizan dimensionales de moles por litro.

9. Calcule la magnitud del índice de Langelier:

$$IL = pH - pH_s$$

Ecuación No.14

Ref.3

Continuación del apéndice 13.

La magnitud del índice de Langelier se interpreta de la siguiente manera:

Tabla II. Interpretación de la magnitud del Índice de Langelier

Índice de Langelier	Significado
$-2.0 < IL < -0.5$	Corrosión severa
$-0.5 < IL < 0$	Corrosión leve. No hay incrustación. Agua no saturada de carbonato de calcio.
$IL = 0$	Agua en equilibrio. Posibilidad de corrosión leve.
$0.0 < IL < 0.5$	Incrustación leve y corrosión. Agua saturada de carbonato de calcio.
$0.5 < IL < 2$	Incrustación sin corrosión.

Fuente: Ref. No.4

Acondicionamiento de agua uso industrial:

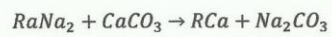
Como se mencionó anteriormente el tipo de tratamiento que se aplique al agua que se usará en una caldera debe de escogerse en función del proceso al que será sometido el líquido. El acondicionamiento del agua puede ser realizada a través de tratamientos físicos, como la filtración, o tratamientos químicos, como el intercambio iónico, la coagulación y la adsorción.

En el Laboratorio de operaciones unitarias se cuenta con un equipo de acondicionamiento, del agua que se alimenta a la caldera, consistente en un intercambiador iónico de zeolitas de sodio.

Intercambio iónico: Es un proceso de transferencia de masa que se produce cuando los iones de un fluido se intercambian con los iones de un sólido que tienen la misma carga. En el caso de los procesos de tratamiento de agua los sólidos empleados son zeolitas de sodio, de hidrógeno, de cloruro o hidróxido.

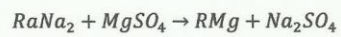
Continuación del apéndice 13.

Cuando se emplea una zeolita de sodio, se lleva a cabo el intercambio de iones de sodio por iones de calcio o de magnesio, reduciendo la dureza del agua. Las siguientes reacciones describen los intercambios iónicos que se dan en las zeolitas:



Ecuación No.14

Ref.2



Ecuación No.14

Ref.2

Continuación del apéndice 13.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL:

Toma de muestras:

1. Tome una muestra de agua de alimentación al ablandador. Lave con la muestra el recipiente que la contiene y deséchela. Repita el procedimiento tres veces, finalmente tome una muestra definitiva.
2. Tome una muestra de agua de alimentación a la caldera. Asegúrese de que la llave de paso múltiple se encuentre en la posición de "Operación normal". Repita el mismo procedimiento de lavado que se realizó con el agua de alimentación al ablandador.

Análisis:

Estos procedimientos debe de realizarlos con el agua de alimentación al ablandador y el agua blanda con el objetivo de determinar el valor del índice de Langelier.

pH:

1. Utilice el potenciómetro de bolsillo para determinar el pH el agua, recuerde medir la temperatura de las muestras.

TDS:

1. Utilice el medidor de TDS para determinar este parámetro.

Dureza cálcica:

1. Tome 20 ml de la muestra de agua. Agregue a la muestra 2 ml de la solución de NaOH 1N. Agite la muestra.
2. Agregue 5 gotas de Murexida.
3. Titule la muestra con la solución 0.01M de EDTA.

Alcalinidad

1. Tome 20 ml de la muestra de agua. Agregue fenolftaleína.

Continuación del apéndice 13.

2. Si la muestra viró a color rosado siga el procedimiento en el paso 3. Si por el contrario, la muestra permaneció incolora, proceda al paso 4.
3. Titule la muestra con la solución de ácido sulfúrico.
4. Agregue naranja de metilo a la muestra.
5. Titule la muestra con la solución de ácido sulfúrico.

Continuación del apéndice 13.

**EQUIPO DE GENERACIÓN DE VAPOR Y ACONDICIONAMIENTO DE AGUA
INSTALADO EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS**

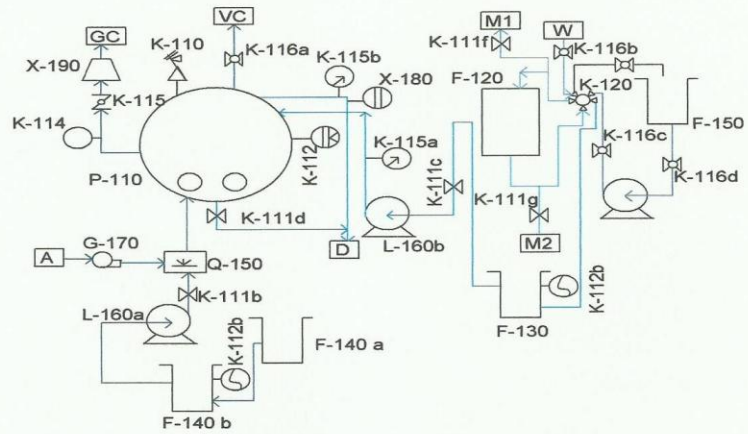


Tabla III. Descripción

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN
K-111	Válvula de paso
F-120	Suavizador
K-112	Medidor de nivel
L-160	Bomba centrífuga
K-115	Manómetro
K-120	Llave de múltiple paso
Q-150	Quemador
G-170	Ventilador
F-130	Tanque de agua
F-140	Tanque de combustible
F-150	Tanque de salmuera
K-110	Válvula de alivio

Continuación del apéndice 13.

K-115	Damper
X-190	Chimenea
K-114	Termómetro
X-180	Medidor McDonell
VC	Vapor vivo de caldera
GC	Gases de combustión
A	Aire
D	Desagüe
W	Agua
→	Agua tratada
→	Vapor
→	Aire
→	Combustible
→	Salmuera
→	Agua Cruda

Fuente: Elaboración Propia

Continuación del apéndice 13.

CALENDARIO DE ACTIVIDADES

SEMANA	FECHA		Actividad		
	Martes	Jueves	R	EI	EC
2	30-07	01-08	M(1A-2A)/J1A		
3	06-08	08-08		M(1A-2A)/J1A	
4	13-08	15-08	M(1E-2E)/J1E		M(1A-2A)/J1A
5	20-08	22-08		M(1E-2E)/J1E	
6	27-08	29-08	M(1D-2D)/J1D		M(1E-2E)/J1E
7	03-09	05-09		M(1D-2D)/J1D	
8	10-09	12-09	M(1C-2C)/J1C		M(1D-2D)/J1D
9	17-09	19-09	M(1B-2B)/J1B	M(1C-2C)/J1C	M(1C-2C)/J1C
10	24-09	26-09		M(1B-2B)/J1B	M(1B-2B)/J1B

Referencias:

- R Realización de la práctica de monitoreo de la calidad del agua
- EI Entrega del informe correspondiente al monitoreo.
- EC Examen corto sobre el monitoreo de la calidad del agua.
- M1A Grupo A del martes 12:30
- M2B Grupo B del martes 16:30
- J1C Grupo C del jueves 12:30

NOTA: Para la realización de ésta práctica los estudiantes deben de traer guantes de latex, mascarilla y lentes.

Continuación del apéndice 13.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. 17ma Edición. Madrid: Editorial Diaz de Santos, 1992. p. 34-67.
2. POWELL, Sheppard. "Aguas naturales y sus impurezas". *Acondicionamiento de aguas para la industria*. Primera Edición. México: Editorial Limusa, 1966. p. 7-13.

Referencias electrónicas

3. *Calculation of the Langelier Index* [en línea]. [Consultado el 30 de junio de 2013]. Disponible en http://www.env.gov.nl.ca/env/waterres/quality/drinkingwater/pdf/calculation_langelier_index.pdf
4. *Calculadora del índice de saturación de Langelier* [en línea]. [Consultado el 10 de febrero de 2013]. Disponible en: <http://www.lenntech.es/calculadoras/langelier/langelier.htm>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. **Examen corto de conocimientos teóricos anterior a la práctica**

NOMBRE:

CARNE:

Examen corto de conocimientos teóricos previo a la realización de la práctica de monitoreo de la calidad del agua

INSTRUCCIONES: Responda las siguientes preguntas de forma concreta y precisa.

1. ¿Por qué el agua que se alimenta a una caldera puede perjudicar la estructura de este equipo?
2. ¿Qué problemas puede provocar la presencia de carbonato de calcio en el agua que se alimenta a una caldera?
3. ¿Qué significado tiene la magnitud del índice de Langelier del agua?
4. ¿Cada cuanto debe de llevarse a cabo el monitoreo de la calidad del agua que se alimenta a una caldera?
5. Si tuviera que determinar la dureza de Calcio de una muestra de agua, por medio de un método volumétrico, ¿qué titulante utilizaría?
6. Para determinar solamente la dureza de calcio, mediante una titulación, ¿qué indicador utilizaría murexida o negro de eriocromo?
7. ¿En qué consiste el intercambio iónico?
8. ¿Cómo se emplea el intercambio iónico en un ablandador de zeolitas de sodio para acondicionar el agua que se alimenta a una caldera?

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. Encuesta de percepción cualitativa anterior a la realización de la práctica

Encuesta: percepción cualitativa antes de realizar la práctica de monitoreo de la calidad del agua de alimentación a la caldera.

INSTRUCCIONES: Responda a las siguientes preguntas de forma objetiva.

1. ¿Cómo calificaría usted la importancia de monitorear la calidad del agua que se alimenta a una caldera?
Alta
Media
Baja
2. ¿Considera que monitorear la calidad del agua que se alimenta a la caldera puede tener incidencia en el tiempo de vida útil de una caldera?
Sí
No
3. ¿Cree que el monitoreo del agua que se alimenta a la caldera debe de formar parte del mantenimiento preventivo del equipo?
Sí
No
4. Durante sus estudios de Ingeniería química ¿ha adquirido los conocimientos necesarios para llevar a cabo un monitoreo de la calidad del agua que se alimenta a los equipos de generación de vapor?
Sí
No
5. Si la respuesta a la pregunta 4 fue "Sí" indique en que cursos a adquirido dichos conocimientos:
6. Durante sus estudios de Ingeniería química ¿ha adquirido los conocimientos necesarios para diseñar un sistema para acondicionar el agua que se alimenta a una caldera?
Sí
No
7. Si la respuesta a la pregunta 6 fue "Sí" indique en que cursos a adquirido dichos conocimientos:
8. ¿Cree que es importante que durante la carrera de Ingeniería Química adquiera los conocimientos necesarios para llevar a cabo el monitoreo de la calidad del agua que se alimenta a la caldera y diseñar sistemas de acondicionamiento de este líquido?
Sí
No

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16. **Examen corto de conocimientos teóricos posterior a la realización de la práctica**

Examen corto de conocimientos teóricos posterior a la realización de la práctica de monitoreo de la calidad del agua

INSTRUCCIONES: Responda las siguientes preguntas de forma concreta y precisa

1. Para cada uno de los siguientes compuestos indique si puede provocar incrustación o corrosión cuando se alimenta como soluto en el agua que ingresa a un sistema de generación de vapor:

Compuesto	Incrustación/Corrosión
Bicarbonato de magnesio	
Ácido carbónico	
Carbonato de calcio	
Oxígeno	
Cloruro de calcio	

2. Suponga que en el laboratorio de Operaciones Unitarias se han instalado dos intercambiadores iónicos de zeolitas de sodio idénticos. Se tomaron muestras de agua en la alimentación y en la descarga de cada uno de los intercambiadores iónicos y se midieron los sólidos totales disueltos de las cuatro muestras. La magnitud de los sólidos totales disueltos del agua que pasó por el intercambiador A se redujo, en tanto que la magnitud de los sólidos totales disueltos en el agua que pasó por el intercambiador B se mantuvo constante. ¿Cuál de los dos intercambiadores está funcionando adecuadamente? Explique el motivo por el cual el otro intercambiador está fallando y proponga una manera de solucionar el problema.

3. ¿Cada cuanto debe de llevarse a cabo el monitoreo de la calidad del agua que se alimenta a la caldera?

4. ¿Cuáles son los límites de magnitud del índice de Langelier para clasificar al agua como incrustante o corrosiva?

5. En la siguiente tabla se enumeran cada uno de los análisis que se realizan al agua para determinar su índice de Langelier, indique para qué se llevan a cabo cada uno de ellos:

Análisis	
Sólidos totales disueltos	

Continuación del apéndice 16.

pH	
Temperatura	
Titulación con ácido sulfúrico y Naranja de metilo	
Titulación con EDTA y Murexida	

6. El intercambiador iónico de zeolitas de sodio elimina iones de calcio y magnesio del agua. Si quisiera evaluar la eficacia del intercambiador para eliminar iones de magnesio ¿qué método de titulación utilizaría para evaluar la concentración de magnesio en el agua?

7. Describa el proceso de transferencia de masa que se lleva a cabo en un ablandador.

8. Escriba las ecuaciones de intercambio iónico que se deben de llevar a cabo en un ablandador para reducir su concentración de iones de magnesio y calcio.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 17. **Encuesta de percepción cualitativa posterior a la realización de la práctica**

ENCUESTA: Percepción cualitativa posterior a la realización de la práctica de monitoreo de la calidad del agua de alimentación a la caldera.

1. Al diseñar un plan de mantenimiento preventivo de las instalaciones de generación de vapor ¿debe de tomarse en cuenta el monitoreo de la calidad del agua alimentada al equipo?
SI
NO
2. ¿Considera que la implementación del plan de monitoreo de la calidad del agua de alimentación a la caldera ayudará a incrementar la vida útil de la caldera?
SI
NO
3. Monitorear la calidad del agua que se alimenta a la caldera tiene una importancia:
ALTA
MEDIA
BAJA
4. ¿Es importante que durante la carrera de Ingeniería química aprenda a monitorear la calidad del agua que se alimenta a los equipos de generación de vapor, así como ha diseñar sistemas de acondicionamiento para el agua de uso industrial?
SI
NO
5. ¿En que cursos de la carrera de Ingeniería Química ha adquirido los conocimientos necesarios para monitorear y evaluar la calidad del agua que se alimenta a un equipo de generación de vapor?
6. ¿En que cursos de la carrera de Ingeniería Química ha adquirido los conocimientos necesarios para diseñar un sistema de acondicionamiento del agua que se alimenta a la caldera?

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 18. **Calificación de la evaluación de conocimientos teóricos de los alumnos (examen corto) previa a la realización de la práctica**

CLAVE	NOTA (PUNTOS)	
	LOPU 1	LOPU 2
1	50,00	6,25
2	43,75	6,25
3	31,25	6,25
4	31,25	6,25
5	31,25	6,25
6	31,25	6,25
7	25,00	6,25
8	18,75	6,25
9	18,75	6,25
10	18,75	6,25
11	18,75	12,50
12	18,75	12,50
13	18,75	12,50
14	18,75	12,50
15	18,75	18,75
16	18,75	18,75
17	18,75	18,75
18	12,50	18,75
19	12,50	18,75
20	12,50	18,75
21	12,50	18,75
22	12,50	0,00
23	12,50	0,00
24	12,50	0,00
25	12,50	0,00
26	12,50	0,00
27	12,50	0,00
28	6,25	31,25
29	6,25	31,25

Continuación del apéndice 18.

30	6,25	31,25
31	6,25	31,25
32	6,25	37,50
33	6,25	-
34	0,00	-
35	0,00	-
36	0,00	-
37	0,00	-
38	0,00	-
TOTAL EVALUADOS	38,00	32,00
PROMEDIO	15,63	12,70
DESVIACIÓN ESTANDAR	11,45	10,65
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	73,27	83,91

Fuente: elaboración propia, análisis estadístico: ecuación 7,9 y 11.

Apéndice 19. **Calificación de la evaluación de conocimientos teóricos de los alumnos (examen corto) posterior a la realización de la práctica.**

CLAVE	NOTA (Puntos)	
	LOPU 1	LOPU 2
1	25,00	21,25
2	50,00	21,25
3	50,00	18,75
4	33,75	23,75
5	55,00	38,75
6	40,00	36,25
7	43,75	18,75
8	37,50	18,75
9	33,75	18,75

Continuación del apéndice 19

10	18,75	35,00
11	16,25	38,75
12	21,25	33,75
13	26,25	40,00
14	22,50	48,75
15	15,00	63,75
16	17,50	56,25
17	30,00	-
18	17,50	-
19	33,75	-
20	21,25	-
21	22,50	-
22	18,75	-
23	16,25	-
24	51,25	-
25	42,50	-
26	67,50	-
27	82,50	-
28	82,50	-
29	88,75	-
30	67,50	-
TOTAL EVALUADOS	30,00	16,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 20. **Claves seleccionadas según la tabla de números al azar**

LOPU 1		LOPU 2	
CLAVE	NOTA (Puntos)	CLAVE	NOTA (Puntos)
29	88,75	11	38,75
15	15,00	12	33,75
17	30,00	10	35,00
28	82,50	16	56,25
2	50,00	9	18,75

Fuente: elaboración propia, anexo 1.

Apéndice 21. **Determinación del comparador Z**

ASPECTO A EVALUAR	LOPU 1	LOPU 2
PROMEDIO	53,25	36,50
DESVIACIÓN ESTANDAR	32,13	12,00
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	60,34	32,88
TAMAÑO DE LA MUESTRA	5,00	5,00
GRADOS DE LIBERTAD	4,00	4,00
NIVEL DE CONFIANZA	0,95	0,95
NIVEL DE SIGNIFICANCIA	0,05	0,05
$\alpha/2$	0,025	0,025
$1-\alpha/2$	0,975	0,975
T	2,78	2,78
INTERVALO DE CONFIANZA	93,20	51,42
INTERVALO DE CONFIANZA	13,30	21,58
Z CALCULADA	7,35	5,00
$1-\alpha$	0,95	0,95
Z CRÍTICO	1,64	1,64

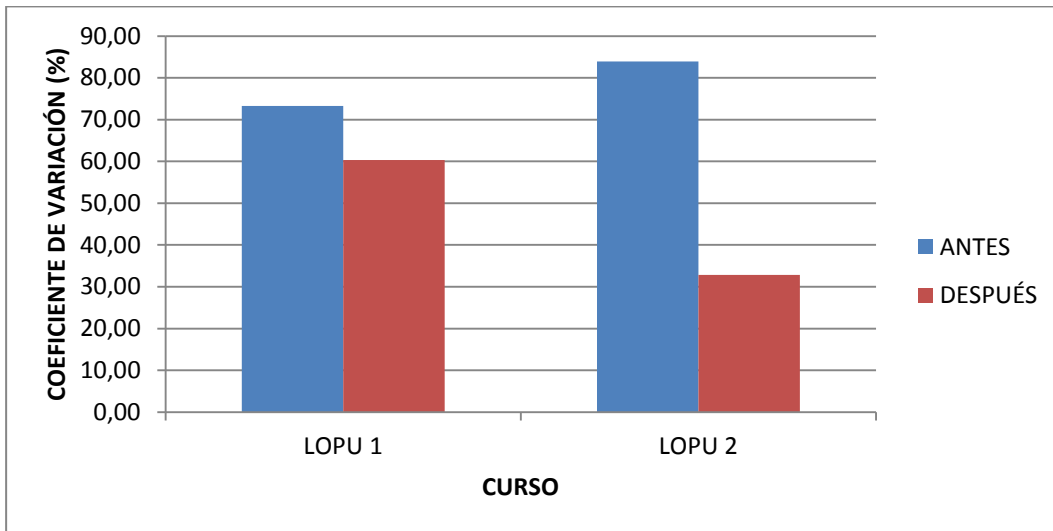
Fuente: elaboración propia, análisis estadístico: ecuación 8,10, 12, 13, 16 y 17.

Apéndice 22. **Comparación del valor de Z e interpretación**

CURSO	Z CALCULADO	Z CRÍTICO	INTERPRETACIÓN	
LOPU 1	7,35	1,64	Se acepta la hipótesis alternativa	La práctica mejora los conocimientos de los estudiantes
LOPU 2	5,00	1,64	Se acepta la hipótesis alternativa	La práctica mejora los conocimientos de los estudiantes

Fuente: elaboración propia, análisis estadístico.

Apéndice 23. **Comparación de coeficientes de variación para los puntajes obtenidos en el examen de conocimientos teóricos realizados antes y después de la aplicación de la práctica**



Fuente: elaboración propia, análisis estadístico: ecuación 11 y 12.

Apéndice 24. **Encuesta de percepción cualitativa previa a la realización de la práctica**

PREGUNTA	RESPUESTA	CURSO	
		LOPU 1 (%)	LOPU 2 (%)
1	ALTA	92,00	91,00
	MEDIA	8,00	6,00
	BAJA	0,00	3,00
2	SI	100,00	100,00
	NO	0,00	0,00
3	SI	97,00	100,00
	NO	3,00	0,00
4	SI	32,00	44,00
	NO	68,00	56,00
5	CURSOS	IQ1, IQ3, A. Cuantitativo, Calidad del agua, Química ambiental, Monitoreo de aguas residuales	Calidad del agua, Termodinámica 3, Diplomado de acondicionamiento de agua para la industria, A. Cuantitativo, LOPU 1, A. Cualitativo
6	SI	5,00	6,00
	NO	95,00	94,00
7	CURSOS	A. cualitativo, IQ3, IQ2	IQ3, Diplomado de acondicionamiento de agua para la industria, IQ4, IQ5
8	SI	100,00	100,00
	NO	0,00	0,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 25. **Encuesta de percepción cualitativa posterior a la realización de la práctica**

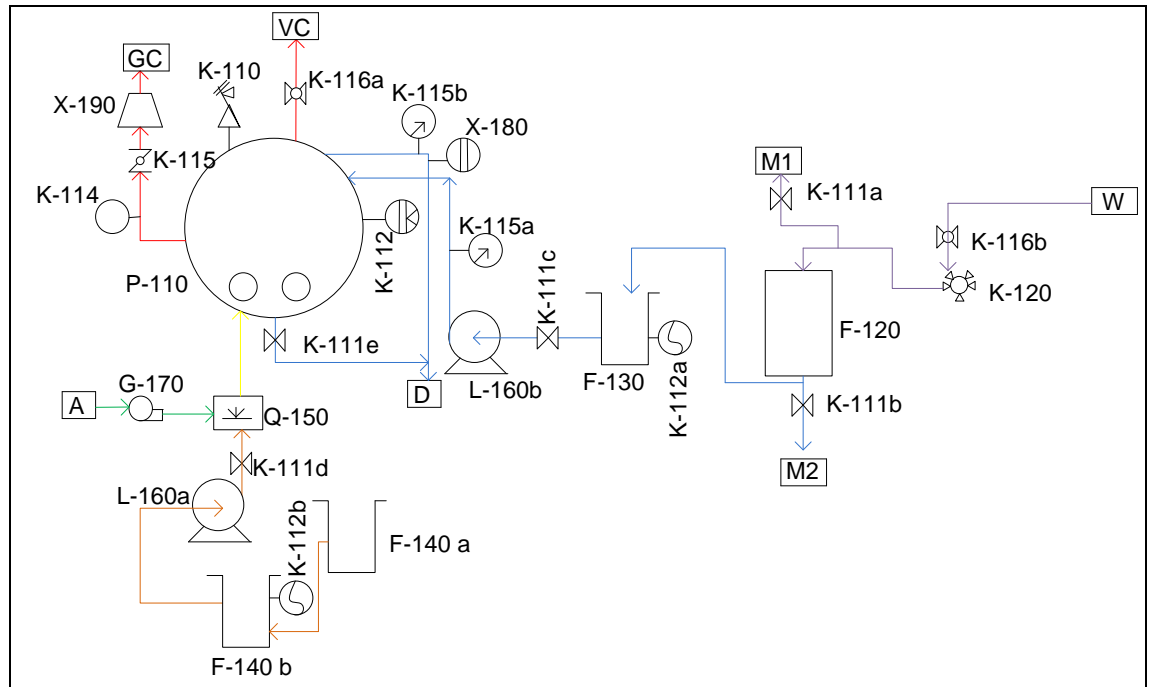
PREGUNTA	RESPUESTA	CURSO	
		LOPU 1 (%)	LOPU 2 (%)
1	SI	100,00	100,00
	NO	0,00	0,00

Continuación del apéndice 25.

2	SI	100,00	94,00
	NO	0,00	6,00
3	ALTA	97,00	94,00
	MEDIA	3,00	6,00
	BAJA	0,00	0,00
4	SI	100,00	100,00
	NO	0,00	0,00
5	CURSOS	Calidad del agua, IQ2, A. cuantitativo, Termodinámica 3, IQ3, IQ4, Diplomado de acondicionamiento de agua para la industria, Química Ambiental, LOPU1	Diplomado de acondicionamiento de agua para la industria, A. Cuantitativo, LOPU 2, A. Cualitativo
6	CURSOS	Análisis químico, Termodinámica 3, Termodinámica 4, IQ2, iq3, A. Cuantitativo, LOPU 1, Diplomado de acondicionamiento de agua para la industria, IQ1	Diplomado de acondicionamiento de agua para la industria, A. cuantitativo, Procesos químicos industriales

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 26. **Diagrama de equipo del sistema de generación de vapor**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 27. **Descripción de la simbología del diagrama de equipo**

Código	Descripción
K-111	Válvula de paso
F-120	Suavizador
K-112	Medidor de nivel
L-160	Bomba centrífuga
K-115	Manómetro
K-120	Válvula de múltiple paso
Q-150	Quemador
G-170	Ventilador
F-130	Tanque de agua
F-140	Tanque de combustible
K-110	Válvula de alivio
K-115	Damper
X-190	Chimenea
K-114	Termómetro
X-180	Medidor McDonnell
VC	Vapor vivo de caldera

Continuación del apéndice 27.

GC	Gases de combustión
A	Aire
D	Desagüe
W	Agua
	Agua tratada
	Vapor
	Aire
	Combustible
	Agua Cruda

Fuente: elaboración propia.

ANEXO

Anexo 1. Tabla de números al azar

NÚMEROS ALEATORIOS		LA TABLA DE NÚMEROS AL AZAR									
TABLA DE NÚMEROS AL AZAR											
	1-4	5-8	9-12	13-16	17-20	21-24	25-28	29-32	33-36	37-40	
01	4251	5149	4751	4847	4249	4648	5047	4847	5156	8789	
02	4849	5051	5046	4756	4738	5350	4746	4847	4846	2346	
03	5692	9870	3583	8997	1533	6466	8830	7271	3809	4256	
04	2080	3828	7880	0586	8482	7811	6807	3309	2729	2235	
05	1039	3382	7600	1077	4455	8806	1822	1669	7501	8330	
06	6477	5289	4092	4223	6454	7632	7577	2816	8002	2365	
07	4554	6146	4846	4647	5034	4646	5139	5355	5249	2224	
08	0772	2160	7236	0812	4195	5589	0830	8261	8232	0902	
09	0092	1629	0377	3590	2209	4839	6332	1490	3092	2390	
10	7315	3365	7203	1231	0546	6612	1038	1425	2709	3092	
11	5775	7517	8974	3961	2183	5295	3096	8536	9442	2392	
12	5500	2276	6307	2346	1285	7000	5306	0414	3383	2303	
13	3251	8902	8843	2112	0567	8131	8116	5270	5994	9092	
14	4675	1435	2192	0874	2897	0262	5092	5541	4014	2113	
15	3543	6130	4247	4859	2660	7852	9096	0578	0097	1324	
16	3521	8772	6612	0721	3899	2999	1263	7017	8057	3443	
17	5573	9396	3464	1702	9204	3389	5678	2589	0288	6343	
18	7478	7569	7551	3380	2152	5411	2647	7242	2800	3432	
19	3359	2854	9691	9562	3252	9848	6030	8472	2266	3255	
20	5505	8474	3167	8552	5409	1556	4247	4652	2953	9854	
21	6381	2086	5457	7703	2758	2963	8167	6712	9820	5324	
22	0935	5565	2315	8030	7651	5189	0075	9353	1921	0222	
23	2605	3973	8204	4143	2677	0034	8601	3340	8383	3243	
24	7277	9889	0390	5579	4620	5650	0210	2082	4664	5643	
25	5484	3900	3485	0741	9069	5920	4326	7704	6525	1249	
26	7227	0104	4141	1521	9104	5563	1392	8238	4882	2324	
27	8506	6348	4612	8252	1062	1757	0964	2983	2244	7654	
28	5086	0303	7423	3298	3979	2831	2257	1508	7642	1245	
29	3690	2492	7171	7720	6509	7549	2330	5733	4730	4534	
30	0813	6790	6858	1489	2669	3743	1901	4971	8280	0835	
31	6905	7127	5933	1137	7583	6450	5658	7678	3444	3754	
32	8387	5323	3753	1859	6043	0294	5110	6340	9137	6323	
33	4094	4957	0163	9717	4118	4276	9465	8820	4127	0202	
34	4951	3781	5101	1815	7068	6379	7252	1086	8919	2093	
35	9047	0199	5068	7447	1664	9278	1708	3625	2864	0204	
36	7274	9512	0074	6677	8676	0222	3335	1976	1645	3203	
37	9192	4011	0255	5458	6942	8043	6201	1587	0972	0243	
38	0554	1690	6333	1931	9433	2661	8690	2313	6999	3094	
39	9231	5627	1815	7171	8036	1832	2031	6298	6073	9044	
40	3995	9677	7765	3194	3222	4191	2734	4469	8617	3233	
41	2402	6250	9362	7373	4757	1716	1942	0417	5921	5345	
42	5295	7385	5474	2123	7035	9983	5192	1840	6176	5756	
43	5177	1191	2106	3351	5057	0967	4538	1246	3374	0304	
44	4344	4044	4549	4443	4249	4948	4151	5152	4240	4737	
45	7343	4706	4440	4646	4548	4742	4746	5253	4749	4689	

Fuente: VILLEGAS, Allan. La tabla de número al azar.

<http://www.uaca.ac.cr/bv/ebooks/estadistica/11.pdf>.

[Consulta: 15 de abril de 2014].

