

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

Diseño e implementación del sistema de calentamiento de un reactor Batch para su aplicación en la saponificación de aceite vegetal residual.

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Químico

Presentado por:

Eduardo Josué Vargas Ulloa

José Daniel Lozano Beltrán

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

Dedicatoria

Con profundo agradecimiento y devoción, dedico este proyecto a Dios por concederme este nuevo logro en mi vida.

A mi madre, cuyo respaldo incansable ha sido mi faro, guiándome siempre hacia la rectitud y la bondad.

A mi padre, a quien debo todo lo aprendido para la realización de este proyecto, le expreso mi sincero agradecimiento por su invaluable enseñanza y colaboración.

A mi hermana, quien ha aliviado significativamente las exigencias y desafíos que enfrenté este semestre. Su apoyo ha sido como un oasis, ofreciéndome alivio y renovación en medio del viaje.

Quiero que sepan que este logro no solo es mío, sino que le pertenece a cada uno de ustedes.

- Eduardo Vargas

Dedicatoria

Para Cristina, por su apoyo incondicional y certeza de que puedo ser una persona de bien, por brindarme el techo y la comida para recorrer este camino.

Para Gina, Haidee y Martha, por siempre guiarme y motivarme a proponerme metas tratando de que ponga los pies sobre la tierra.

- José Lozano

Agradecimientos

Mis agradecimientos para mis familiares, amigos y profesores que brindaron un apoyo inquebrantable durante la culminación de nuestro trabajo de titulación. Reconozco con especial aprecio a la Dra. Maribel, al Msc. Tyron Alcivar y a la Ing. Myriam Santos, quienes no solo me recibieron en su laboratorio, sino que también me proporcionaron los equipos y reactivos esenciales para la realización exitosa de este proyecto. Su generosidad y orientación fueron fundamentales en el camino hacia el logro de este objetivo académico. Les entrego este esfuerzo con la firme convicción de que contribuirá al avance continuo de la ingeniería química y fomentará la exploración en el vasto terreno de la investigación científica.

Agradecimientos

Agradezco a mi familia por darme la oportunidad de culminar los estudios, brindándome el espacio y recursos necesarios, valoro mucho su empatía y el apoyo que me demostraron con muchas pequeñas pero significativas acciones a lo largo de estos años.

Agradezco también a todos los profesores con los que he tenido contacto porque cada uno a su manera siempre ha tenido una respuesta paciente para tantas preguntas.

- José Lozano

Declaración Expresa

Nosotros Eduardo Josue Vargas Ulloa y José Daniel Lozano Beltrán acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.



Eduardo Vargas



José Lozano

Evaluadores

Suanny Mosquera

Profesor de Materia

Carlos Bucaram

Tutor de proyecto

Resumen

Este proyecto aborda la necesidad imperante de un sistema de calentamiento y control en el reactor del Laboratorio de Operaciones Unitarias, originalmente utilizado para cristalización y limitado en su capacidad para realizar reacciones endotérmicas. La iniciativa se enfoca en diseñar un sistema que habilite reacciones endotérmicas específicamente para la saponificación de aceite residual. La elección de esta reacción, además de ser educativamente relevante, contribuye a la sostenibilidad ambiental mediante la conversión de aceites usados en jabón.

Se elaboró un diagrama de flujo de proceso e instrumentación, incorporando resistencia eléctrica y un juego de válvulas para conservar la versatilidad del reactor como cristizador. Las mejoras en el sistema de calentamiento y control demostraron su eficacia al mantener la eficiencia del reactor y reducir las pérdidas de calor en un 96%.

El análisis de los resultados de microensayos, simulación y escala piloto respalda la eficacia del sistema de calentamiento. Asimismo, se evalúa la viabilidad económica del proyecto con indicadores financieros sólidos y la capacidad de lograr la autosustentabilidad a largo plazo. Este proyecto no solo enriquece la formación estudiantil, sino que también fomenta la investigación y desarrollo en ingeniería química, destacando su impacto educativo y ambiental.

Palabras Clave: Control de temperatura, Reactor por Lotes, Saponificación en caliente, Sostenibilidad Ambiental, Jabón Veterinario

Abstract

This project addresses the urgent need for a heating and control system in the reactor of Unit Operations Laboratory, originally designed for crystallization and limited in its capacity to perform endothermic reactions. The initiative focuses on designing a system that enables endothermic reactions, particularly for the saponification of residual oil. The choice of this reaction, aside from its educational relevance, contributes to environmental sustainability by converting used oils into soap.

A Piping and Instrumentation Diagram was developed, incorporating electric resistance and a set of valves to maintain the reactor's versatility as both a saponification system and a crystallizer. The improvements in the heating and control system proved effective in maintaining reactor efficiency and reducing heat losses by 96%.

The analysis of results from micro essays, simulation, and pilot scale experiments supports the effectiveness of the heating system. Additionally, the economic viability of the project is evaluated with solid financial indicators, demonstrating its potential for long-term sustainability. This project not only improves the education of students but also promotes research and development in chemical engineering, emphasizing its educational and environmental impact.

Keywords: Temperature Control, Batch Reactor, Hot Saponification, Environmental Sustainability, Veterinary Soap.

Índice General

Resumen.....	8
Abstract.....	9
Abreviaturas	13
Simbología	14
Índice de figuras	15
Índice de tablas.....	16
1. Capítulo 1	18
1.1 Introducción.....	19
1.2 Descripción del problema	19
1.3 Justificación del problema	21
1.4 Objetivos	22
1.4.1 Objetivo general.....	22
1.4.2 Objetivos específicos	22
1.5 Marco teórico	22
1.5.1 Reactor químico.....	22
1.5.2 Tipos de reactores	23
1.5.3 Sistema de calentamiento.....	27
1.5.4 Controladores	28
1.5.5 Impulsión de líquidos	30
1.5.6 Procedimiento de cálculo de potencia y selección de bomba.....	31
1.5.7 Reacción de Saponificación.....	31
1.5.8 Tipos de Saponificación	32
1.5.9 Catalizador básico	33
1.5.10 Calidad del agua.....	33
1.5.11 Aditivos	34
1.5.12 Propiedades del aceite de palma comestible	34
1.5.13 Propiedades del aceite residual de origen vegetal	35

1.5.14	Cambios durante la fritura.....	36
1.5.15	Influencia del almacenamiento.....	37
1.5.16	Aceite usado: Pretratamiento.....	37
1.5.17	Análisis de calidad de aceites	38
1.5.18	Propiedades físicas y químicas del aceite usado de cocina	39
1.5.19	Materiales e insumos	40
1.5.20	Definición de las variables que afectan la velocidad y al grado de saponificación	40
1.5.21	Variables Óptimas para Saponificación en Caliente.....	45
1.5.22	Insumos a Utilizar para la reacción de Saponificación en Caliente.....	45
1.5.23	Determinación de número de réplicas.....	46
1.5.24	Normativa INEN y Métodos de caracterización de agentes tensoactivos	47
1.5.25	Ecuaciones involucradas en el diseño del sistema de Calentamiento...	48
1.5.26	Simulación	52
Capítulo 2.....		53
2.	Metodología.....	54
2.1	Metodología.....	54
2.1.1	Caracterización de materia prima y determinación del índice de saponificación	54
2.1.2	Agitación.....	54
2.1.3	Variables Óptimas para Saponificación en Caliente.....	55
2.1.4	Diseño de experimentos	55
2.1.5	Componentes del Reactor Batch del Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOPU)	56
2.1.6	Sistema de calentamiento y lazos de control	59
2.1.7	Diseño de Diagrama de flujo de proceso	60
2.1.8	Cálculos de diseño	60
2.1.9	Propiedades de la bomba a Utilizar	61
2.1.10	Selección del servicio de calentamiento.....	61

2.1.11	Diseño del lazo de control.....	62
2.1.12	Diseño de Diagrama de instrumentación	63
2.1.13	Implementación del sistema de calentamiento.....	63
2.1.14	Ensayos piloto	64
2.1.15	Comparación del rendimiento de pruebas a escala piloto, micro ensayos y una simulación para comprobación de las variables de operación.....	65
2.1.16	Formulación.....	65
Capítulo 3.....		66
3.1 Resultados y análisis.....		67
3.1.1	Caracterización de la materia prima.....	67
3.1.2	Evaluación del pretratamiento a la materia prima	67
3.1.3	Diagrama de flujo de procesos e instrumentación.....	68
3.1.4	Aislamiento de la Olla de Calentamiento.....	70
3.1.5	Resultados de cálculos de la bomba.....	72
3.1.6	Resultados del diseño de experimentos	72
3.1.7	Resultados de la Simulación.....	73
3.1.8	Resultados escala piloto	75
3.1.9	Comparación entre micro ensayos, simulación y escala piloto.....	75
3.1.10	Análisis de costos por Batch	75
3.1.11	Análisis económico	76
Capítulo 4.....		78
4.1 Conclusiones y recomendaciones		79
4.1.1 Conclusiones.....		79
4.1.2 Recomendaciones.....		80
Bibliografía		83
Apéndice A.....		86

Abreviaturas

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
LOPU	Laboratorio de Operaciones Unitarias de ESPOL
INEN	Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización
VAN	Valor Actual Neto
TIR	Tasa Interna de Retorno
TMAR	Tasa Mínima Aceptable de Retorno

Simbología

mg	Miligramo
pH	Potencial de Hidrógeno
m	Metro
bhp	Potencia Bruta (Brake Horsepower)
psia	Presión Absoluta en Libras por Pulgada Cuadrada
psig	Presión Relativa en Libras por Pulgada Cuadrada
°C	Grados Celsius (temperatura)
hp	Caballos de Fuerza
lt	Litros
pulg	Pulgadas
lbs	Libras
VAC	Voltios de Corriente Alterna
HZ	Hercios (frecuencia)
W	Vatios (potencia)
Kg	Kilogramos
g	Gramos
bar	Bar (unidad de presión)
Torr	Unidad de Presión, también conocida como Milímetro de Mercurio (mmHg)
SCH	Schedule (especificación de espesor de tubería)
PVC	Cloruro de Polivinilo (tipo de tubería)
m_c	Masa fría dentro del reactor
V	Voltios (tensión)
A	Amperios (corriente eléctrica)
e_f	Eficiencia
C_p	Calor Específico a Presión Constante
m_h	Flujo Másico del Fluido de Calentamiento
Q	Caudal o Flujo Volumétrico
PID	Control Proporcional, Integral y Derivativo
pH	Potencial de Hidrógeno (acidez o alcalinidad)
mm	Milímetros
cm	Centímetros
mol	Moles (cantidad de sustancia)

Índice de figuras

Figura 1. <i>Modelo de reactor continuo o CSTR</i>	23
Figura 2. <i>Modelo de reactor tubular o PFR</i>	24
Figura 3. <i>Diagrama de reactor de lecho empacado</i>	25
Figura 4. <i>Modelo de reactor discontinuo o Batch</i>	26
Figura 5. <i>Reactor Encamisado por lotes simple</i>	27
Figura 6. <i>Diagrama de Bloques sistema PID</i>	29
Figura 7. <i>Esquema simple de Bomba</i>	31
Figura 8. <i>Reacción de Saponificación Directa</i>	32
Figura 9. <i>Efecto del tiempo de reacción en el grado de saponificación</i>	41
Figura 10. <i>Efecto de la Temperatura en el grado de saponificación</i>	42
Figura 11. <i>Efecto de la relación NaOH: Aceite Usado en el grado de saponificación</i>	43
Figura 12. <i>Efecto de la concentración de NaOH en el grado de saponificación</i>	44
Figura 13. <i>Simulación de Reacción de Saponificación en Super Pro Designer</i>	52
Figura 14. <i>Reactor Batch LOPU</i>	57
Figura 15. <i>Diagrama de flujo de procesos e instrumentación</i>	69
Figura 16. <i>Gráfica de comparación de costos por horas entre la Caldera y la Resistencia eléctrica implementada</i>	70
Figura 17. <i>Gráfica de las pérdidas de calor vs el espesor del aislante</i>	71
Figura 18. <i>Gráfica de evaluación del impacto del aumento de espesor del aislante</i>	72
Figura 19. <i>Instalación de Resistencia Eléctrica</i>	86
Figura 20. <i>Instalación de aislante de fibra de vidrio</i>	87
Figura 21. <i>Instalación de la nueva bomba PKm60 para trabajo a alta temperatura</i>	87
Figura 22. <i>Controlador PID C100</i>	88
Figura 23. <i>Controlador Instalado con set point de 80°C</i>	88
Figura 24. <i>Reactor Batch 20 L con Sistema de calentamiento</i>	89
Figura 25. <i>Adaptación de termocupla compatible con el controlador</i>	89
Figura 26. <i>Reacción de Saponificación</i>	90
Figura 27. <i>Lavado del jabón base con solución salina</i>	90
Figura 28. <i>Eliminación de glicerina e impurezas producidas</i>	91
Figura 29. <i>Filtración del jabón base</i>	91
Figura 30. <i>Jabón Base producido</i>	92
Figura 31. <i>Jabón veterinario post formulación</i>	92

Figura 32. <i>Producto final: Jabón de perro con aceite esencial del árbol del té, avena, miel, bicarbonato, vinagre y aceite reciclado y purificado.</i>	93
Figura 33. <i>Modelos de jabón de 50 y 100g respectivamente</i>	93
Figura 34. <i>Prueba del producto (Jabón de Perro)</i>	94

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Características de los distintos tipos de control</i>	30
<i>Tabla 2. Especificación del aceite comestible de palma NTE INEN 2421</i>	34
<i>Tabla 3. Propiedades físicas y químicas del aceite usado de cocina</i>	39
<i>Tabla 4. Materiales e insumos para elaborar 1kg de jabón a base de aceite de cocina usado</i> ...	40
<i>Tabla 5. Variables Óptimas para reacción de Saponificación en Caliente</i>	45
<i>Tabla 6. Insumos a Utilizar para la reacción de Saponificación en Caliente del aceite Virgen</i> .	46
<i>Tabla 7. Insumos a Utilizar para la reacción de Saponificación en Caliente del aceite Usado</i> ..	46
<i>Tabla 8. Valores mínimos y máximos para la caracterización del producto final</i>	47
<i>Tabla 9. Dimensiones comerciales de Tuberías</i>	49
<i>Tabla 10. Revoluciones por niveles del Agitador Eléctrico modelo 1750</i>	55
<i>Tabla 11. Variables Óptimas para reacción de Saponificación en Caliente</i>	55
<i>Tabla 12. Variables de operación establecidas para el experimento con 3 repeticiones</i>	56
<i>Tabla 13. Componentes del sistema de reactor encamisado</i>	57
<i>Tabla 14. Especificaciones generales del frasco de vidrio (reactor)</i>	58
<i>Tabla 15. Agitador Eléctrico – Modelo 1750</i>	58
<i>Tabla 16. Propiedades bomba marca Pentax</i>	61
<i>Tabla 17. Propiedades de la resistencia Eléctrica implementada</i>	62
<i>Tabla 18. Propiedades del lazo de control implementado</i>	62
<i>Tabla 19. Características organolépticas del aceite de palma refinado residual</i>	67
<i>Tabla 20. Variables de operación para los ensayos de evaluación de la necesidad de un pretratamiento más complejo</i>	67
<i>Tabla 21. Características organolépticas de jabón producido a partir de aceite virgen y aceite residual.</i>	68
<i>Tabla 22. Resultados sistema de bombeo</i>	72
<i>Tabla 23. Resultados diseño de experimentos</i>	72
<i>Tabla 24. Resultados para jabón base sin purificar</i>	73
<i>Tabla 25. Resultados para jabón base purificado</i>	74
<i>Tabla 26. Resultados para impurezas desechadas</i>	74

Tabla 27. <i>Resultados escala piloto</i>	75
Tabla 28. <i>Resultados de la comparación entre micro ensayos, simulación y escala piloto</i>	75
Tabla 29. <i>Análisis de Costos por Batch</i>	75
Tabla 30. <i>Resultados de TIR y VAN</i>	76
Tabla 31. <i>Punto de equilibrio</i>	76

1. CAPÍTULO 1

1.1 Introducción

En el presente trabajo pone de manifiesto que, a pesar de su capacidad y versatilidad, el reactor del laboratorio de operaciones unitarias (LOPU) carece de un sistema de calentamiento que permita llevar a cabo reacciones endotérmicas, por lo cual se utiliza como cristizador. Esta carencia ha suscitado la necesidad imperante de desarrollar una solución que no solo permita realizar reacciones endotérmicas de manera segura, sino que también abra nuevas oportunidades didácticas para los estudiantes de ingeniería química en ESPOL. El proyecto que se presenta está enfocado en el diseño del sistema de calentamiento que permita su aplicación en reacciones endotérmicas comprendidas en el rango de 40 a 80 °C.

Este sistema no solo será un avance técnico significativo para el Laboratorio de Operaciones Unitarias, sino que también se enmarca en una iniciativa más amplia con múltiples objetivos y beneficios. En primer lugar, se busca contribuir con un equipo que permitirá a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Química de ESPOL adquirir habilidades y conocimientos prácticos en un campo crucial para la industria. La posibilidad de realizar reacciones endotérmicas en un entorno de laboratorio es esencial para la formación de ingenieros químicos y su preparación para el mundo real.

Además, el proyecto alienta a estudiantes y profesores a involucrarse en la investigación y el desarrollo de soluciones en el campo de la ingeniería química, con un enfoque específico en reacciones endotérmicas. Esto puede resultar en la generación de conocimiento nuevo y la publicación de resultados, lo que contribuye a la reputación de la universidad en la comunidad académica a nivel nacional e internacional.

1.2 Descripción del problema

Se tiene un reactor discontinuo de vidrio con chaqueta, tiene una capacidad de 20 lt y no dispone de sistema de calentamiento que permita realizar reacciones endotérmicas. Se estima que la implementación de este sistema de calentamiento tendrá una aplicación didáctica para ser utilizado en el estudio de reacciones endotérmicas. Por ello, es necesario diseñar un sistema de calentamiento que tenga en cuenta aspectos de seguridad, como la temperatura de reacción dentro de rangos moderados y la capacidad del material para soportar dichas temperaturas.

Un aspecto técnico por considerar es que el laboratorio cuenta con una caldera Piro-tubular de 15 bhp que suministra vapor a 54.7 psia. Esta caldera permite calentar fluidos hasta un máximo de 141.7 °C. Además, el bajo costo de los instrumentos de control hace que sea viable adecuar un lazo para controlar la temperatura del sistema sin incurrir en costos excesivos.

Una de las reacciones que podría ser de interés debido al bajo coste de los reactivos, es la reacción de saponificación de aceite residual proveniente de la industria alimentaria utilizando una base como catalizador. En un estudio anterior se reportó la utilización del reactor discontinuo para la transesterificación del acetato de etilo (Nuñez & Udeos, 2015). Sin embargo, el coste de los reactivos y la inexistencia de un sistema de calentamiento adaptado al reactor ha dificultado su adopción como práctica de laboratorio. Abordar este problema es vital para garantizar a los estudiantes de Ingeniería Química el acceso práctico a los conceptos de cinética de reacción a través de experimentos de laboratorio. La elección de la reacción de saponificación fomenta los sistemas autosustentables y puede formar parte de proyectos de capacitación comunitaria para el aprovechamiento de un residuo común, ya que de acuerdo con datos de la compañía quiteña Arc y Pieper, que se dedica a esta labor, se desechan 54 millones de litros de aceites usados al año en el Ecuador. El 70% (9,45 millones de galones) corresponde a uso doméstico y el resto (4,05 millones) al sector automotor e industrial (Vásconez, 2018).

1.3 Justificación del problema

El objetivo principal de este proyecto es contribuir con un equipo para que los estudiantes de la carrera de ingeniería química de la Espol adquieran habilidades y conocimientos prácticos en un campo crucial para la industria. El proyecto alienta a estudiantes y profesores a involucrarse en la investigación y el desarrollo de soluciones en ingeniería química, con un enfoque en reacciones endotérmicas. Esto puede resultar en la generación de conocimiento nuevo y la publicación de resultados, lo que contribuye a la reputación de la universidad en la comunidad académica. La disponibilidad de equipos avanzados y la promoción de prácticas educativas de alta calidad pueden favorecer la acreditación de programas de ingeniería química por organismos acreditadores internacionales. Esto puede ser un factor motivador para futuros estudiantes, profesores y empleadores a considerar la universidad como su lugar de estudio, trabajo o de fuente de recursos humanos para sus respectivas industrias. Además, la saponificación de aceite residual es un proceso relevante desde una perspectiva ambiental y social. La conversión de aceites usados en jabón no solo favorece la sostenibilidad, la gestión adecuada de residuos y la reducción de emisiones contaminantes, sino que también puede generar un impacto significativo en sectores rurales. Este proceso es especialmente crucial en estas áreas, ya que el incorrecto manejo de este residuo puede tener consecuencias perjudiciales. Por ejemplo, si el aceite usado llega a los ríos, puede formar una película superficial que afecta al intercambio de oxígeno, perjudicando así a los seres vivos del ecosistema.

Es fundamental destacar que un solo litro de aceite de cocina usado puede contaminar más de 1000 litros de agua, una realidad de la cual muchas personas aún no son conscientes. La implementación de prácticas como la conversión de estos aceites en jabón no solo aborda este problema ambiental directo, sino que también fomenta la responsabilidad social en el ámbito de la

ingeniería. Esto implica un enfoque consciente en la gestión de recursos, la protección del entorno y la promoción de prácticas sostenibles.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Implementar un sistema de calentamiento con lazo de control de temperatura en un reactor Batch de LOPU para su aplicación en la reacción de saponificación de aceite residual provenientes de un restaurant de comidas rápidas del cantón “El Triunfo”

1.4.2 Objetivos específicos

- ∞ Determinar las variables de operación de la reacción de saponificación adecuadas a la calidad de la materia prima que será utilizada a lo largo del proyecto mediante micro ensayos de laboratorio.
- ∞ Diseñar un diagrama de flujo de proceso y diagrama de instrumentación mediante el cálculo y análisis de las variables de diseño para la implementación del sistema de calentamiento.
- ∞ Comparar el rendimiento de pruebas a escala piloto, micro ensayos y una simulación para comprobación de las variables de operación.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Reactor químico

De manera general se entiende por reactor a cualquier dispositivo capaz de llevar a cabo una reacción química, es decir, donde unos compuestos moleculares iniciales son transformados en otros compuestos moleculares finales. Un reactor químico se restringe específicamente a los casos en los que se busca premeditadamente producir un compuesto deseado o eliminar uno o más

compuestos de una mezcla, excluyendo de esta definición aquellos reactores en los que se busca la producción de energía (Trambouze, 2004).

1.5.2 Tipos de reactores

Fogler (2003) simplifica la clasificación de reactores químicos de acuerdo con los más utilizados en la industria, los cuales son: intermitente (por lotes, batch), continuo de mezcla perfecta (CSTR), tubular (PFR) y de lecho empacado (PBR)

1.5.2.1 Reactor Continuo CSTR. Es aquel en el que, una vez iniciada la reacción química en su interior, se alimenta de manera constante con los diferentes reactivos necesarios y se retiran de forma continua los productos generados por la reacción. Este tipo de reactor, también llamado tanque de agitación continua o reactor de retromezcla, proporciona un rendimiento óptimo en la conversión de la reacción. Operando en estado estacionario y asegurando un buen mezclado, el CSTR se modela sin variaciones espaciales en concentración, temperatura o velocidad de reacción en todo el recipiente. La temperatura y concentración son uniformes tanto en el interior como en el punto de salida. En sistemas con mezclado no ideal, se deben emplear técnicas alternativas de modelado, como distribuciones de tiempo de residencia, para obtener resultados precisos (Fogler, 2003, p. 10).

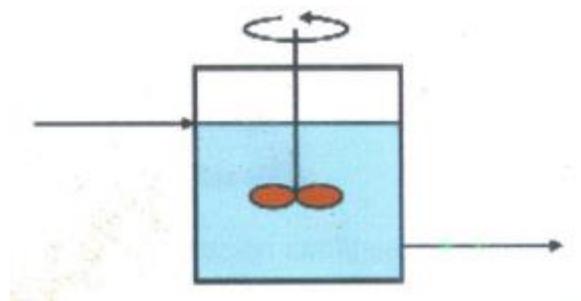


Figura 1. Modelo de reactor continuo o CSTR

Fuente: (Calderón, 2016)

1.5.2.2 Reactor tubular PFR. Además de los reactores CSTR, se encuentra otro tipo de reactor ampliamente empleado en la industria, conocido como reactor tubular. Este dispositivo consiste en un tubo cilíndrico y generalmente opera en estado estacionario, al igual que el CSTR, caracterizados por un flujo altamente turbulento, donde el campo de flujo se asemeja al de un flujo tapón. Esto implica que no hay variación radial en la concentración, definiendo así al reactor como un flujo taponado PFR. En el reactor tubular, los reactivos se consumen de manera continua mientras fluyen a lo largo del dispositivo. Al modelar este reactor, se asume que la concentración experimenta cambios continuos en la dirección axial a lo largo de toda la extensión del tubo. En consecuencia, la velocidad de reacción, siendo función de la concentración para todas las reacciones, a excepción de las de orden cero, también presenta variaciones en sentido axial (Fogler, 2003, p. 11).

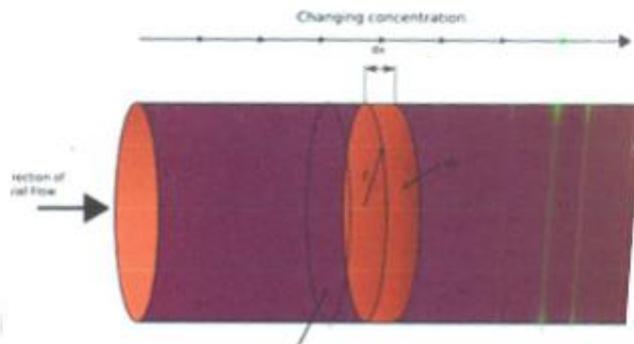


Figura 2. Modelo de reactor tubular o PFR

Fuente: (Calderón, 2016)

1.5.2.3 Reactor PBR. La distinción principal en los cálculos de diseño de reactores entre reacciones homogéneas y heterogéneas fluido-sólido radica en que, en el segundo caso, la velocidad de reacción se fundamenta en la masa de catalizador sólido (W) en lugar del volumen del reactor (V). La elección de utilizar la masa de sólido se basa en el principio de que lo que realmente importa para la velocidad de reacción es la cantidad de catalizador presente. El volumen del reactor que contiene el catalizador se considera de importancia secundaria. Similar al enfoque utilizado en los reactores de flujo pistonado (PFR), se asume que el reactor PBR no presenta gradientes radiales de concentración, temperatura ni velocidad de reacción. El reactor PBR, conocido como lecho de catalizador de flujo pistón, se distingue por permitir la reacción química en un lecho de catalizador estacionario, optimizando así la interacción entre reactantes y catalizador. Esta configuración favorece una eficiencia mejorada en la conversión de reactantes a productos, posibilitando un control más preciso de las condiciones de reacción. El diseño del PBR también facilita la remoción continua de productos y la adición de reactantes, lo cual resulta especialmente beneficioso para procesos de producción a gran escala. Su aplicación abarca diversos sectores, incluyendo la síntesis de productos químicos y la generación de energía, donde su capacidad para operar con sistemas heterogéneos y su eficacia en la gestión térmica lo destacan como una opción sobresaliente en la ingeniería de reactores. Esta información es fundamental para contextualizar y comprender la importancia del diseño de reactores heterogéneos en aplicaciones industriales (Fogler, 2003, p. 14).

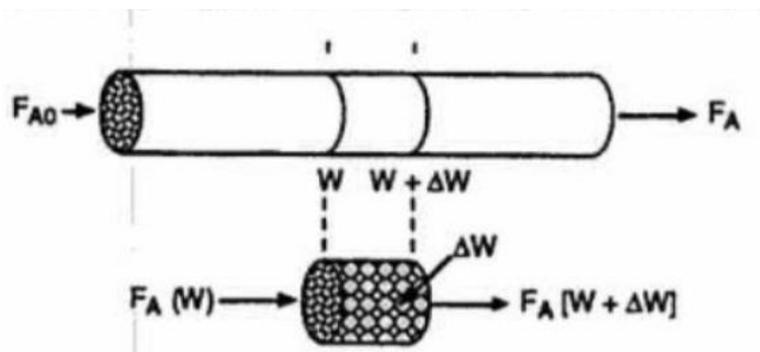


Figura 3. Diagrama de reactor de lecho empacado

Fuente: (Fogler, 2003, p. 14)

1.5.2.4 Reactor Batch. Es un tipo de equipo utilizado en la industria química y de procesos para llevar a cabo una variedad de reacciones químicas y procesos en etapas discontinuas. A diferencia de los reactores continuos, en los que los reactivos se introducen y los productos se retiran de manera constante, en un reactor batch, los reactivos se cargan al inicio y la reacción se lleva a cabo en un solo lote antes de que los productos se retiren y se limpie el equipo para la próxima operación. Los reactores batch se utilizan en una amplia variedad de industrias, incluyendo la farmacéutica, química, alimentaria y de procesos. Son ideales cuando se necesitan lotes más pequeños, cuando se requieren múltiples productos en pequeñas cantidades o cuando los procesos son complejos y requieren un alto grado de control (Calderón, 2016).

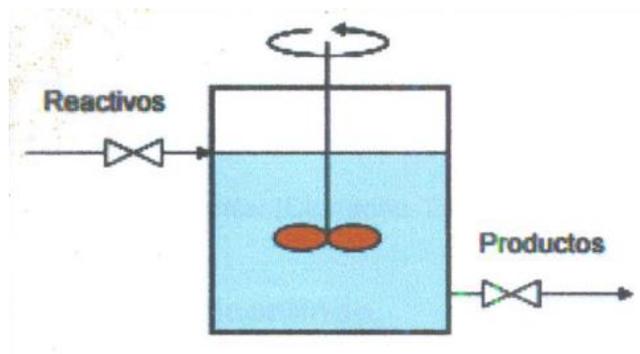


Figura 4. Modelo de reactor discontinuo o Batch

Fuente: (Calderón, 2016)

1.5.2.5 Reactor Batch con chaqueta térmica

Los reactores por lotes con chaqueta térmica se utilizan en operaciones de pequeña escala, en la fase de prueba de procesos aún no perfeccionados, en la fabricación de productos de alto costo y en procesos que resultan complicados de implementar como operaciones continuas. La chaqueta es una cavidad que recubre la superficie del reactor, por la cual fluye un fluido de enfriamiento o de calentamiento con la función de mantener el interior del reactor lo más cercano posible a una temperatura óptima de operación, lo que constituye un aspecto particularmente beneficioso en su aplicación. La carga de reactivos en este reactor se realiza a través de las boquillas dispuestas en su tapa. A pesar de presentar desventajas notables, como los costos elevados de mano de obra por lote y la dificultad para llevar a cabo la producción a gran escala,

destaca por su capacidad para lograr conversiones elevadas al dejar el reactivo en el reactor durante períodos prolongados (Fogler, 2003, p. 16).

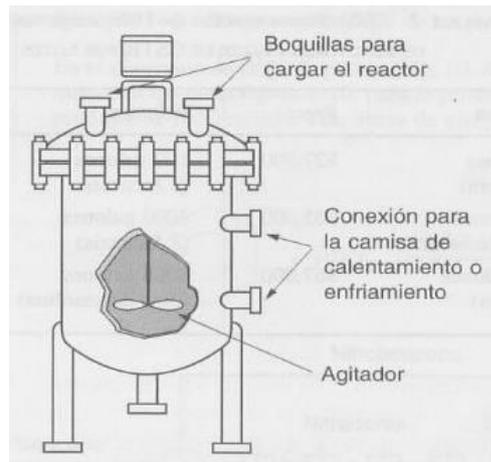


Figura 5. *Reactor Encamisado por lotes simple*

Fuente: (Fogler, 2003, p. 17).

1.5.3 Sistema de calentamiento

En la industria, la necesidad de llevar a cabo procesos endotérmicos demanda sistemas de calentamiento eficientes. La elección del método adecuado es crucial para garantizar tanto la eficiencia operativa como la optimización de costos. Aquí, se analizan con mayor profundidad algunos aspectos clave de los componentes mencionados:

1.5.3.1 Bomba. La importancia de la bomba radica en su papel fundamental para el transporte eficiente del fluido de calentamiento en un reactor encamisado. Además de evitar la pérdida de temperatura mediante la recirculación, la selección adecuada de bombas contribuye a la estabilidad y continuidad del proceso (Guerrero, 2014).

1.5.3.2 Tuberías. Las tuberías, elemento aparentemente simple pero crítico, deben ser de alta calidad y poseer el diámetro adecuado. Esto asegura un transporte eficiente de los fluidos de calentamiento. La correcta instalación y mantenimiento de las tuberías son esenciales para prevenir posibles inconvenientes durante la operación (Guerrero, 2014).

1.5.3.3 Caldera. Una caldera se define como un recipiente metálico cerrado diseñado para generar vapor o calentar agua mediante el calor, alcanzando una temperatura superior a la del ambiente y una presión mayor que la atmosférica. Este dispositivo impulsa un rápido incremento de temperatura a través del uso de vapor. A pesar de su eficacia, es crucial tener en cuenta el considerable costo energético, especialmente al emplear combustibles como el diésel. Además, se deben evaluar detenidamente los requerimientos de mantenimiento periódico, aspecto esencial en la implementación de calderas en procesos industriales (Abarca,2006).

1.5.3.4 Válvulas de vapor on/off. Aunque son preferidas para el control del flujo de vapor en sistemas con calderas, el desafío económico que representan sus elevados costos puede impulsar la búsqueda de alternativas más rentables. Explorar soluciones de control más económicas y eficientes se vuelve esencial para la viabilidad a largo plazo del proyecto (Abarca,2006).

1.5.3.5 Resistencia eléctrica. La utilización de resistencias eléctricas proporciona una alternativa más accesible en términos de costos operativos, al depender de la electricidad. A pesar de su eficacia, el tiempo requerido para alcanzar temperaturas operativas puede ser mayor en comparación con las calderas. Sin embargo, la simplicidad en la implementación de un controlador on/off facilita la gestión del sistema, permitiendo un ajuste más preciso de la temperatura.

1.5.4 Controladores

El control riguroso de procesos endotérmicos es esencial en la industria para garantizar eficiencia operativa, calidad del producto y seguridad. La capacidad de ajustar y mantener condiciones térmicas específicas no solo optimiza la producción y la calidad de los productos, sino que también contribuye al ahorro de recursos y al cumplimiento normativo. Además, el control preciso juega un papel crucial en la seguridad operativa al prevenir riesgos potenciales asociados con fluctuaciones incontroladas de temperatura, minimizando así la posibilidad de accidentes y asegurando el cumplimiento de estándares de seguridad. Este enfoque no solo mejora la rentabilidad, sino que también respalda la sostenibilidad y la integridad de los procesos

industriales. Se prevé la instalación de un controlador tipo PID que son diseñados para aplicaciones industriales debido a su robustez y sencillez. Las propiedades de los controladores PID dentro de un sistema de control de retroalimentación se manifiestan a través de la gestión de la disparidad entre la consigna y la variable a controlar, conocida como error o desviación de regulación. El regulador busca neutralizar esta diferencia mediante la implementación de algoritmos diversos, cada uno de los cuales aporta atributos particulares a la regulación global del proceso (Guerrero, 2014). Estas particularidades se representan visualmente en la siguiente figura:

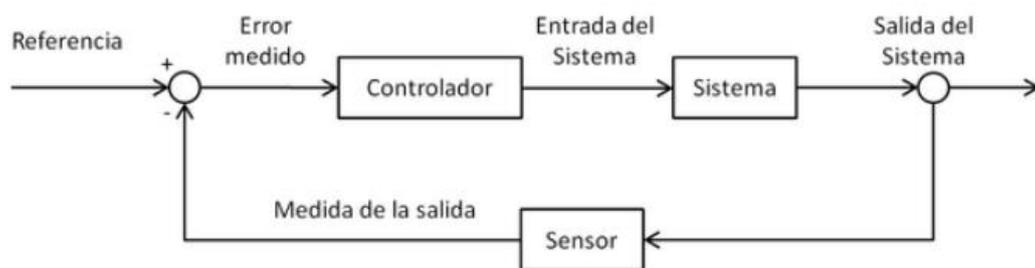


Figura 6. *Diagrama de Bloques sistema PID*

Fuente: (Guerrero, 2014)

Algunas características de las acciones asociadas a distintos tipos de controladores son las que se muestran a continuación:

Tabla 1. Características de los distintos tipos de control

Tipo de controlador	Características
Proporcional, P	No modifica la dinámica del proceso (igual orden de la función de transferencia, FT) La respuesta es más rápida Produce un error de estado estacionario (offset)
Integral, I	Incrementa el orden de FT Elimina el error de régimen permanente Produce problemas de saturación de la acción integral (reset windup)
Derivativo, D	Respuesta rápida a los cambios Necesitan filtrado de la señal para eliminar el ruido Usado en combinación
PI	Elimina el error de régimen permanente Inestable debido a su respuesta excesivamente oscilatoria
PID	Proporciona control robusto por ser una combinación de los tres modos de control Aumenta la complejidad del sintonizado

Fuente: (Guerrero, 2014)

1.5.5 Impulsión de líquidos

Cuando un fluido no posee la energía suficiente para vencer las diferencias de altura, velocidad o presión que se requieran, es necesario comunicársela con ayuda de aparatos mecánicos adecuados. Los métodos habituales de suministrar la energía requerida son los de desplazamiento positivo y los centrífugos (Guerrero, 2014).

1.5.6 Procedimiento de cálculo de potencia y selección de bomba

Para determinar la energía requerida para trasladar la masa del fluido de un lugar a otro (del punto 1 al punto 2 en la figura), es necesario emplear la ecuación de Bernoulli, la cual se aplica entre los extremos de dicho sistema (Guerrero, 2014).

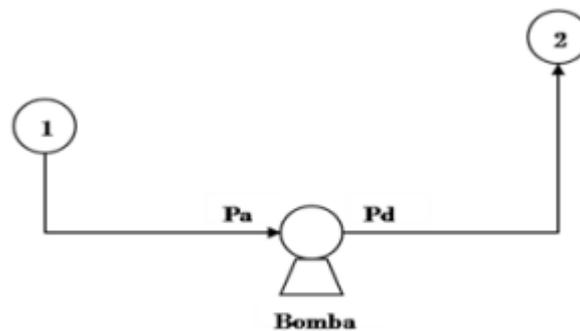


Figura 7. Esquema simple de Bomba

Fuente: (Guerrero, 2014)

1.5.7 Reacción de Saponificación

Los jabones se producen a partir de aceite vegetal mediante la saponificación tradicional y la neutralización de ácidos grasos con hidróxido de sodio. El aceite de palma se puede usar en la fabricación de jabones debido a sus ácidos grasos, que se combinan en proporciones específicas para lograr propiedades como estabilidad, solubilidad y capacidad de producir espuma. Sin embargo, los jabones hechos con aceite crudo de palma pueden perder color con el tiempo debido a la presencia de antioxidantes naturales, lo que los hace menos puros y más adecuados para limpieza o uso en cocina. (Garcés & Sánchez, 1997)

La técnica habitual para crear jabón es la saponificación directa, que consiste en la interacción química entre los triglicéridos presentes en el aceite y/o las grasas, y una

sustancia alcalina fuerte, como la sosa cáustica, con el fin de generar tanto jabón como glicerina (Guerrero, 2014).

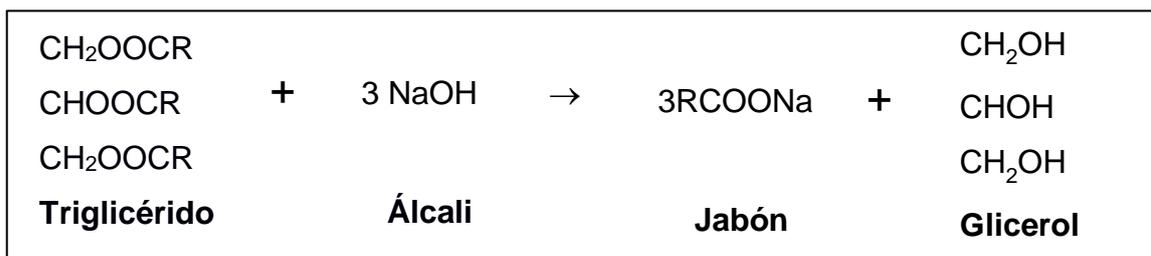


Figura 8. *Reacción de Saponificación Directa*

Fuente: (Guerrero, 2014)

1.5.8 Tipos de Saponificación

Existen dos métodos principales para llevar a cabo este procedimiento: la saponificación en frío y la saponificación en caliente:

1.5.8.1 Saponificación en frío. Este método se basa en el calor generado por la reacción química entre el aceite usado de cocina y la soda cáustica para producir jabón. No requiere una fuente de calor externo, lo que permite que los aceites mantengan sus propiedades. Sin embargo, el alto pH del jabón al principio puede afectar la eficacia de los aditivos. Además, el producto necesita un período de curado de aproximadamente 4 semanas y media antes de estar listo (Guerrero,2014).

1.5.8.2 Saponificación en caliente. En este proceso, las grasas o aceites se mezclan con una base alcalina a temperaturas entre 70°C y 110°C durante 3 o 4 horas. El jabón permanece en estado líquido y viscoso durante este período. A diferencia de la saponificación en frío, no requiere un período de curado prolongado, lo que permite su uso en un plazo más corto. Los aditivos retienen sus propiedades y componentes. Este método se emplea comúnmente para la producción de jabones líquidos y de glicerina (Fernández, Bayona, Campos, Cruz, & Pérez, 2020).

En este proyecto, se utilizará el método de saponificación en caliente debido a su menor tiempo de producción y mejor conservación de las propiedades de los aditivos. Se necesita una serie de materiales e insumos para producir 1 kg de jabón a base de aceite de cocina usado, que incluyen aceite vegetal usado, agua, soda cáustica y aditivos como aceites esenciales.

1.5.9 Catalizador básico

El catalizador esencial para llevar a cabo la saponificación de los ácidos grasos presentes en aceites y grasas es un álcali, siendo el hidróxido de sodio (NaOH) y el hidróxido de potasio (KOH) los más comúnmente utilizados. La elección entre estos dos álcalis desempeña un papel crucial en la naturaleza del jabón resultante: el NaOH tiende a producir jabones más rígidos y sólidos, mientras que el KOH conduce a jabones de textura más suave y líquida. Ambos hidróxidos exhiben propiedades físicas y químicas similares, ya que son compuestos inorgánicos y actúan como bases fuertes (Guerrero, 2014).

1.5.10 Calidad del agua

En la producción de jabones, es fundamental el tipo de agua utilizada. El agua puede ser blanda o dura según su contenido de sales disueltas. El agua blanda es preferible para la fabricación de jabones, ya que evita la formación de jabones insolubles. Si solo se dispone de agua dura, se puede añadir sal a la mezcla después de la saponificación para ayudar a que los jabones se separen del agua. (Guerrero, 2014)

El agua también actúa como catalizador en el proceso de saponificación, ya que facilita la unión de los cuerpos grasos y los álcalis. La calidad del agua utilizada puede afectar las características del jabón. Además, se mencionan varios tipos de agua que se pueden emplear, como agua de la red, agua desmineralizada, agua destilada y agua osmotizada. Cada tipo de agua tiene sus ventajas y desventajas, y la elección depende de la disponibilidad y las necesidades del proceso de fabricación. (Guerrero, 2014)

1.5.11 Aditivos

Los aditivos, como la sal, fragancias, pigmentos y colorantes, se utilizan para mejorar las propiedades del jabón, como su textura, aroma y color. La cantidad y el tipo de aditivos varían según la fórmula y los objetivos de producción. Por ejemplo, la sal se usa en un porcentaje del 5% al 10% de la cantidad de aceite utilizada al principio del proceso, mientras que las fragancias y aromas se utilizan en un rango del 0.2% al 2.5% del total de jabón terminado. Los colorantes suelen usarse en cantidades muy pequeñas, generalmente del 0.01% al 1% del total de jabón terminado, y se prefieren los pigmentos naturales. (Guerrero, 2014)

La efectividad de los aceites esenciales frente a las garrapatas ha sido evidenciada mediante la inmersión y el contacto físico con superficies tratadas, así como después de la exposición al vapor de los aceites; este último indica la presencia de una vía neurotóxica en su mecanismo de acción, en lugar de simplemente un proceso mecánico. Por ejemplo, el terpinen-4-ol, un monoterpenoide presente en concentraciones elevadas en el aceite de árbol de té, inhibe la acetilcolinesterasa de los artrópodos, una enzima esencial para la transmisión de los potenciales de acción (Mills et al., 2004; López y Pascual-Villalobos, 2010). Además, la naturaleza hidrofóbica de los aceites puede simultáneamente causar efectos mecánicos en el parásito, como la perturbación de las ceras cuticulares y la obstrucción de los espiráculos, conduciendo a la muerte por estrés hídrico o asfixia (Burgess, 2009).

1.5.12 Propiedades del aceite de palma comestible

La normativa NTE INEN (Tabla 2) indica los parámetros que debe cumplir un aceite vegetal para ser utilizado en procesos de cocción de alimentos de consumo humano

Tabla 2. Especificación del aceite comestible de palma NTE INEN 2421

Propiedades	Unidad	MIN	MAX	Método de ensayo
Densidad relativa (25/25°C)	gr/mL	0,8957	0,91	NTE INEN 35

Humedad y materia volátil	%	No Aplica	0,05	NTE INEN 39
Acidez (como ácido oleico)	%	No Aplica	0,1	NTE INEN 38
Índice de refracción a 25°C	Adimensional	1,454	1,456	NTE INEN 42

La exposición continua al calor y otros factores durante el uso repetido puede resultar en alteraciones significativas en las propiedades físicas y químicas del aceite, tales como el aumento de la acidez, la oxidación y la pérdida de otras características esenciales. En consecuencia, es plausible que el aceite, tras haber sido utilizado extensamente, no cumpla con los estándares alimentarios establecidos. No obstante, es posible aprovechar este residuo de manera beneficiosa, como en el caso de la reacción de saponificación, donde el aceite desgastado encuentra un propósito útil, evitando así su desperdicio y contribuyendo a prácticas más sostenibles (Garcés & Sánchez, 1997).

1.5.13 Propiedades del aceite residual de origen vegetal

Según los datos proporcionados por RAFRINOR, S.L., un litro de aceite usado presenta la siguiente composición media: un 85% de aceite, un 10% de agua con residuos de aceite y materia orgánica, y un 5% de lodos, compuestos en un 60% por aceite, un 30% por materia orgánica y un 10% por agua, con una densidad relativa de 0.91. Desde una perspectiva fisicoquímica, el tratamiento de un litro de este residuo implica el uso de 27,200 litros de agua para alcanzar un DQO de 125 mgO₂/L, 1,300 litros de agua para lograr una concentración de 35 mg/L de SST, y 40,000 litros de agua para que la concentración de aceites y grasas sea de 20 mg/L. En consecuencia, en la peor situación posible, se puede afirmar que un litro de aceite usado contamina 40,000 litros de agua, equivalente al consumo anual de agua de una persona en su hogar. Además, el costo para tratar el aceite vertido por el alcantarillado se sitúa alrededor de \$0.50 por litro, equivalente a \$500 por metro cúbico. Es por ello que es crucial implementar un tratamiento

adecuado para el aceite usado, dado su impacto significativo en el medio ambiente y los recursos hídricos (González & González, 2015).

1.5.13.1 Reacciones químicas durante la fritura. La utilización de aceite de cocina en procesos de fritura provoca una serie de cambios en su composición y propiedades. Estos cambios son fundamentales para entender cómo el aceite se modifica después de haber sido usado en la fritura de alimentos (Esquivel, Castañeda, & Ramírez, 2014).

1.5.14 Cambios durante la fritura.

Cuando los alimentos se fríen en aceite, ocurren una serie de transformaciones tanto en el aceite como en los alimentos. La temperatura elevada durante la fritura, que a menudo supera los 180°C, induce cambios en la composición química del aceite y, por ende, en el alimento. Uno de los resultados de la fritura es la formación de productos de oxidación en el aceite. Estos productos pueden volverse potencialmente tóxicos si el aceite se consume en grandes cantidades y de manera aguda, lo que también puede ser perjudicial para la salud (Esquivel, Castañeda, & Ramírez, 2014). En el proceso de freír, el aceite experimenta una secuencia de transformaciones químicas que influyen tanto en la excelencia de los alimentos como en la del aceite como:

1.5.14.1 Hidrólisis. Esta reacción ocurre entre el agua presente en el alimento (o la humedad del aceite) y el aceite, lo que genera un aumento de los ácidos grasos libres, favoreciendo así los procesos de oxidación y contribuyendo a un sabor y olor desagradable en el aceite (Garcés & Sánchez, 1997).

1.5.14.2 Oxidación. El oxígeno atmosférico reacciona con el aceite en la superficie de contacto y afecta a los dobles enlaces, lo que puede producir olores desagradables en el aceite. Además, esta reacción forma compuestos inestables como hidroperóxidos y radicales libres, que al entrar en contacto con otros compuestos disminuyen la calidad del aceite (Garcés & Sánchez, 1997).

1.5.14.3 Polimerización. Durante esta reacción, los radicales libres formados debido al alto grado de insaturación del aceite usado pueden combinar para formar compuestos anillados, lo que resulta en un aumento de la viscosidad del aceite y la formación de espuma, que es difícil de eliminar del aceite (Díaz, 2005).

1.5.15 Influencia del almacenamiento

El aceite de cocina atraviesa diversas etapas durante su tiempo de utilidad, cada una con distintos niveles de exposición tanto al aire como a la temperatura (Fernández, Bayona, Campos, Cruz, & Pérez, 2020). A continuación, se detallan algunas de estas etapas:

1.5.15.1 Período de almacenamiento. En esta fase, el aceite se encuentra a temperatura ambiente sin estar en contacto con alimentos. En este momento, está relativamente poco expuesto al aire.

1.5.15.2 Período de espera. Es la etapa en la que el aceite se calienta en la freidora antes de usarlo o se enfría después de retirar los alimentos de él.

1.5.15.3 Período de fritura. Este es el momento de la fritura, cuando el aceite se expone a altas temperaturas debido al proceso de cocinado de los alimentos.

1.5.16 Aceite usado: Pretratamiento

El tratamiento del aceite de cocina usado implica tres fases: filtración, para la eliminación de materia particulada; lavado, para la extracción de partículas no visibles en suspensión; y desodorización, para la eliminación de moléculas que confieren al aceite cierto olor (Félix et al., 2017).

La primera operación es la purificación del aceite de cocina usado. Luego del proceso de fritura, el aceite puede venir con restos sólidos de comida, tanto gruesos (filtrables) como finos (separables más fácilmente por decantación), con agua de los alimentos y con un grado de degradación variable (según la temperatura y el tiempo que se ha usado para freír). Para cada lote de aceite, lo ideal es primero filtrarlo y luego verificar si contiene agua y determinar su índice de

acidez, que indicará cuán degradado está y su índice de saponificación cuánto Hidróxido de Sodio se deberá utilizar en la saponificación (Márquez, 2013).

Se implementa una fase de lavado destinada a mejorar la calidad del aceite de cocina usado la cual se basa en la aplicación de una solución salina caliente al 10% (NaCl). Durante el proceso, se lava 100 mL de aceite previamente filtrado en dos instancias, utilizando 100 mL de la solución salina en cada ciclo. La ejecución de este procedimiento se lleva a cabo mediante un embudo de separación de 250 mL, y la temperatura de la solución salina se mantiene constante a 50 °C. Posterior a cada ciclo de lavado, se procede a la eliminación de la fase acuosa después de una separación de 1 hora. Este enfoque teórico de lavado se orienta a la extracción significativa de partículas no visibles en suspensión, contribuyendo de manera sustancial a mejorar la calidad del aceite al eliminar impurezas. El aceite lavado resultante se transfiere a un recipiente y se somete a un proceso de desodorización mediante el uso de un filtro de carbón activado (Félix et al., 2017).

Otras fuentes sugieren la factibilidad de hacer un lavado del jabón producido con una solución salina al 25% al final de la reacción que cumple con la misma función y con el beneficio adicional de separar la sal de jabón de la glicerina producidos (Vázquez & Uriel, 2023).

1.5.17 Análisis de calidad de aceites

Un experimento realizado por (Barbosa, Ramírez, & Morales, 2014) analiza las propiedades físicas y químicas del aceite usado de cocina, se puede observar en la figura:

Tabla 3. *Propiedades físicas y químicas del aceite usado de cocina*

Propiedad	Unidad	Resultado
Acidez total	mg/g	0.951
Densidad a 18°C	g/mL	0.926
Grados Brix	°Brix	73
Humedad	%	0.4
Indice de peroxidos	mEq/kg	5.4
Indice de saponificación	mg/g	195.3
Indice de yodo	%	102.1

Fuente: *(Barbosa, Ramírez, & Morales, 2014)*

1.5.18 Propiedades físicas y químicas del aceite usado de cocina

A continuación, se describirán las propiedades cuantificables del aceite de cocina usado:

1.5.18.1 Índice de acidez. Esta medida indica la cantidad de ácidos libres presentes en grasas y ácidos grasos, como el aceite. Además, se expresa en miligramos de hidróxido de potasio necesarios para neutralizar los ácidos libres contenidos en un gramo de muestra (Díaz, 2005).

1.5.18.2 Densidad. La densidad es una propiedad constante que no varía significativamente en un aceite fresco y puro. Sin embargo, puede cambiar cuando aumenta el peso molecular de los ácidos combinados en el aceite (Ayala, 2011).

1.5.18.3 Humedad. El contenido de humedad en el aceite se expresa como un porcentaje de la muestra total. La presencia de agua en el aceite puede provocar hidrólisis y la formación de jabón (Díaz, 2005).

1.5.18.4 Índice de peróxidos. Este índice indica el grado de oxidación en la muestra de aceite y mide la cantidad de oxígeno unido a las grasas en forma de peróxidos. Su presencia se relaciona con la oxidación de los ácidos grasos libres en el aceite (Díaz, 2005).

1.5.18.5 Índice de Saponificación. Se refiere al número de miligramos de hidróxido de potasio (KOH) necesarios para saponificar un gramo de aceite o grasa. La saponificación es el proceso de convertir una sustancia grasa en jabón mediante la reacción de la grasa con una base y agua (Ayala, 2011).

1.5.18.6 Índice de yodo. Este índice mide el grado de insaturación de los componentes de una grasa y es más alto cuando hay un mayor número de enlaces dobles por unidad de grasa. Se utiliza para verificar la pureza e identidad de las grasas (Díaz, 2005).

1.5.19 Materiales e insumos

Se pueden emplear los siguientes elementos para fabricar 1 kg de jabón a partir de aceite usado:

Tabla 4. *Materiales e insumos para elaborar 1kg de jabón a base de aceite de cocina usado*

Insumo	Cantidad [g]
Aceite Usado	673
Agua	234
Soda cáustica	92
Sal	33,65
Masa total	1032,65

Fuente: (Fernández, Bayona, Campos, Cruz, & Pérez, 2020)

1.5.20 Definición de las variables que afectan la velocidad y al grado de saponificación

Dado que el aceite comestible usado no es soluble en una solución alcalina y que la saponificación es una reacción de interfase, cualquier factor que influya en la interacción bifásica y en la dispersión del agua oleosa afectará a la velocidad y al grado de saponificación. Estos factores son: el tiempo, la temperatura, la cantidad y la concentración de álcali. (Deng et al., 2009).

1.5.20.1 Efecto del Tiempo de residencia en el grado de saponificación. La relación entre el grado de saponificación y el tiempo de reacción se describe detalladamente en la Figura 11, evidenciando una correlación directa durante las primeras 4 horas, donde el grado de saponificación aumenta con el tiempo de reacción. Tras este período, la curva muestra una transición suave, indicando la proximidad al equilibrio y la finalización de la saponificación. Experimentos con tiempos de reacción más extensos revelaron una disminución en la curva, atribuible a la evaporación del agua y el consiguiente aumento en la concentración de glicerol, disminuyendo el grado de saponificación. Se observó que períodos excesivamente prolongados propiciaban la coloración amarillenta del producto. En resumen, se concluye que el tiempo de saponificación óptimo es de 4 horas, ya que períodos más largos no solo afectan negativamente el grado de saponificación, sino que también pueden resultar en la aparición de coloraciones indeseadas en el producto final. (Deng et al., 2009)

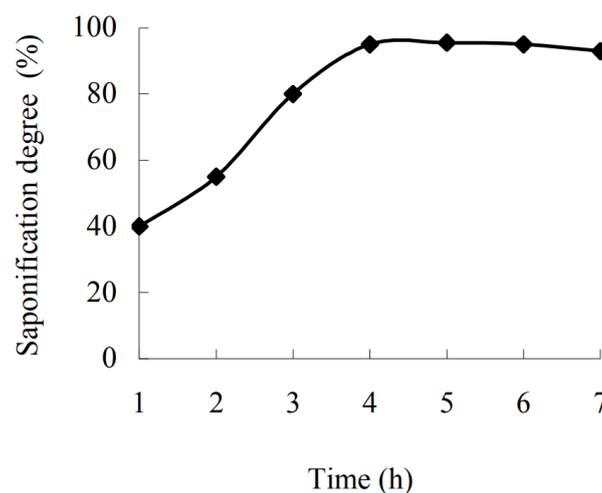


Figura 9. Efecto del tiempo de reacción en el grado de saponificación

Fuente: (Deng et al., 2009)

1.5.20.2 Efecto de la temperatura en el grado de saponificación. La relación entre el grado de saponificación y la temperatura se muestra en la Figura 12. Como se puede observar, el grado de saponificación aumentó con el aumento de la temperatura de reacción. Por lo tanto, el resultado fue que, a mayor temperatura, la saponificación fue más rápida y completa. La mejor temperatura de reacción fue de 100 °C, ya que la reacción era heterogénea y no había efecto de volatilización del solvente en la reacción. (Deng et al., 2009)

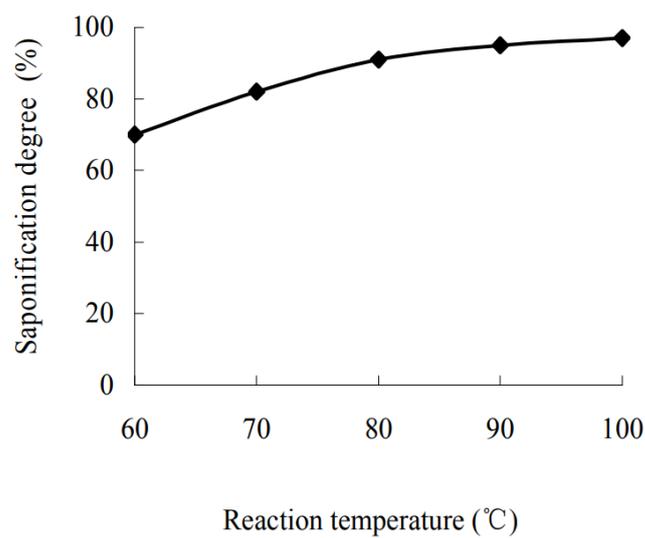


Figura 10. Efecto de la Temperatura en el grado de saponificación

Fuente: (Deng et al., 2009)

1.5.20.3 Efecto de la cantidad de hidróxido de sodio (relación de masa de hidróxido de sodio y aceite usado) en el grado de saponificación. Como se muestra en la Figura 13, cuando la relación de masa de hidróxido de sodio con respecto al aceite usado era inferior a 1:2, a mayor cantidad de hidróxido de sodio, mayor era el grado de saponificación. El hidróxido de sodio desempeña dos funciones en la saponificación: primero, como fuente de iones hidroxilo, los cuales actúan como catalizadores en la saponificación; segundo, para reaccionar con los ácidos libres generados por la reacción de saponificación con el fin de ayudar a completarla. Por lo tanto, el resultado fue que cuanto mayor fuera la cantidad de catalizador de hidróxido de sodio, más rápida sería la reacción de saponificación y más completa sería. Sin embargo, la cantidad de hidróxido de sodio no podía ser excesiva, de lo contrario, el producto sería propenso a cambiar de color amarillo. Por lo tanto, la relación de masa óptima de hidróxido de sodio a aceite usado fue de 1:2. (Deng et al., 2009)

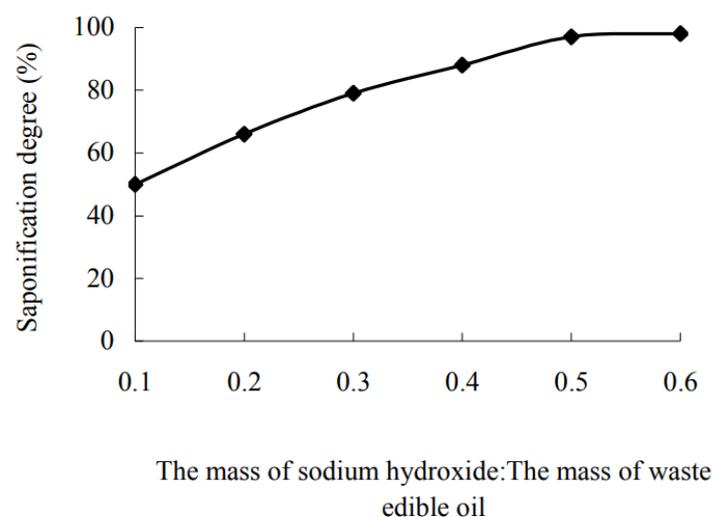


Figura 11. Efecto de la relación NaOH: Aceite Usado en el grado de saponificación

Fuente: (Deng et al., 2009)

1.5.20.4 Efecto de la concentración de hidróxido de sodio en el grado de saponificación.

La relación entre la concentración de hidróxido de sodio y el grado de saponificación, se ilustra en la Figura 14. Se establece que existe un límite para la concentración de hidróxido de sodio en la reacción de saponificación, ya que más allá de este punto, la formación de floculación en la solución alcalina afecta la velocidad de reacción. Asimismo, se señala un límite para la concentración de hidróxido de sodio en la saponificación de aceite comestible usado, donde por debajo se forma una solución homogénea de ácido graso de sodio y más allá se genera un jabón pegajoso, indicando una saponificación incompleta. La Figura 14 revela que concentraciones de hidróxido de sodio superiores al 30% resultan en una disminución del grado de saponificación, posiblemente debido a la reducción de la concentración en el sistema de aceite, ralentizando la reacción. Se destaca que, a partir del 30%, se observa floculación, sugiriendo un límite de concentración del hidróxido de sodio a 100 °C. Concentraciones entre el 30% y 50% generan ácido graso de sodio pastoso y conglomerado, mientras que superiores al 50% desaceleran la reacción y empeoran la conglomeración. En consecuencia, se concluye que la concentración óptima de hidróxido de sodio es del 30%. (Deng et al., 2009)

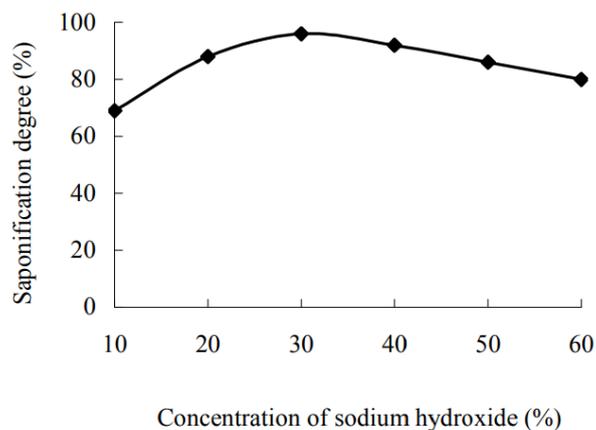


Figura 12. Efecto de la concentración de NaOH en el grado de saponificación

Fuente: (Deng et al., 2009)

1.5.20.5 Exceso de Álcali. Se refiere al exceso estequiométrico del Álcali presente en la reacción respecto a una masa de aceite a saponificar. Permite definir las cantidades de Álcali, H₂O y aceite a usar en cada ensayo. En una investigación para la elaboración de la pasta de jabón base, mediante un diseño de experimentos donde se evaluó la variabilidad del exceso de KOH al 5, 7,10 %, se determinó que un exceso de KOH del 5 % de la pasta de jabón base con aceite purificado es el adecuado para obtener pasta de jabón base con pH 8. (Huanaco et al, 2022)

1.5.21 Variables Óptimas para Saponificación en Caliente

En base a la bibliografía se han definido rangos óptimos de las variables de interés que más afectan en el grado de saponificación del aceite usado.

Tabla 5. *Variables Óptimas para reacción de Saponificación en Caliente*

Variables	Rango Óptimo
Exceso de Álcali	5 - 8% (Huanaco et al, 2022)
Temperatura de Reacción	70 - 80 °C (Guerrero, 2014)
Tiempo de Agitación	15-20 min (Hasta Alcanzar una mezcla Viscosa)
Tiempo de Residencia	3 - 4 h (Deng et al., 2009)
Concentración Solución Alcalina	25-30% (Guerrero, 2014)
Agitación	600 RPM en una dirección (Evitar Salpicaduras)

1.5.22 Insumos a Utilizar para la reacción de Saponificación en Caliente

En base al índice de saponificación obtenido del aceite virgen y usado de 0,193 y 0,195 g KOH/g aceite respectivamente, y las variables óptimas para la reacción de saponificación en

caliente, se han definido las cantidades que se utilizarán en los micro-ensayos para cada tipo de aceite:

Tabla 6. *Insumos a Utilizar para la reacción de Saponificación en Caliente del aceite Virgen*

Insumos Aceite Virgen	Unidades [g]
Aceite	100
Sosa	13
Agua	29
Masa Total	142

Tabla 7. *Insumos a Utilizar para la reacción de Saponificación en Caliente del aceite Usado*

Insumos Aceite Usado	Unidades [g]
Aceite Usado	100
Sosa	14
Agua	32
Masa Total	146

1.5.23 Determinación de número de réplicas

Existen dos métodos posibles para determinar el número de réplicas en un experimento factorial que resultará en una potencia entre 0.80 y 0.90 (para detectar diferencias con significado práctico). El primer método consiste en considerar la detección de diferencias entre las medias de las celdas. El segundo método consiste en considerar la detección de una diferencia de tamaño práctico en las medias marginales de los factores en el experimento. (Lawson, 2015)

Cuando se busca diferencias entre las medias de las celdas, las celdas en el factorial se consideran como un grupo no estructurado, similar a un diseño de un solo factor. Utilizando el modelo de medias de las celdas $y_{ijk} = \mu_{ij} + \epsilon_{ijk}$, el procedimiento es el mismo que se describió para el modelo de un solo factor $y_{ij} = \mu_i + \epsilon_{ij}$ en la Sección 2.6 de (Lawson, 2015).

El parámetro de no centralidad para la prueba F es:

$$\lambda = \frac{r}{\sigma^2} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\mu_{ij} - \mu_{..})^2 \quad (1.1)$$

Fuente: (Lawson, 2015)

Si Δ se considera como el tamaño de una diferencia práctica en las medias de las celdas, entonces el valor más pequeño de λ podría ser con dos celdas que difieren al menos por Δ es $\frac{r \Delta^2}{2\sigma^2}$. (Lawson, 2015)

1.5.24 Normativa INEN y Métodos de caracterización de agentes tensoactivos

En Ecuador existen normativas empleadas para la regulación de los productos de manufactura, el ente encargado de definir los parámetros técnicos que deben de cumplir los productos, así como la materia prima empleada para su procesamiento es el Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN). A continuación, se presenta las normativas que acogen las definiciones de los términos empleados en el proceso de elaboración de jabón y los procedimientos para la caracterización de la materia prima, el producto obtenido de la saponificación del aceite vegetal residual y producto final obtenido a partir de una formulación con aditivos.

NTE INEN 40 “Grasas y aceites comestibles. Determinación del índice de saponificación”

NTE 0839 “Agentes tensoactivos. Jabón en barra. Requisitos” (INEN, 1980).

INEN. (1980). NTE 815 Agentes tensoactivos.

INEN. (1980). NTE 816 Agentes tensoactivos. Determinación de la materia insoluble en agua.

INEN. (1980). NTE 817 Agentes tensoactivos. Determinación de humedad y materia insoluble en alcohol.

INEN. (1980). NTE 818 Agentes tensoactivos. Determinación de humedad y materia volátil.

INEN. (1980). NTE 819 Agentes tensoactivos. Determinación de cloruros.

INEN. (1980). NTE 821 Agentes tensoactivos. Determinación de la alcalinidad libre.

INEN. (1980). NTE 822 Agentes tensoactivos. Determinación de la acidez libre.

INEN. (1980). NTE 823 Agentes tensoactivos. Determinación de la materia grasa total.

INEN. (1980). NTE 824 Agentes tensoactivos. Determinación de la materia insaponificada y de la materia insaponificable.

INEN. (1980). NTE 825 Agentes tensoactivos. Determinación de ácidos resínicos

A manera de resumen se tiene la siguiente tabla con los valores mínimos y máximos de cada norma para la caracterización del producto final que es el jabón:

Tabla 8. Valores mínimos y máximos para la caracterización del producto final

Requisitos	Unidad	Genuino	Sólido	Compuesto
------------	--------	---------	--------	-----------

		Min.	Máx.	Mín.	Máx	Mín.	Máx	Método de ensayo
Humedad y materia volátil	%(m/m)		30%		35%		38%	INEN 818
Grasa total	%(m/m)	62%		55%		40%		INEN 823
Cloruros	%(m/m)		1%		1%		3%	INEN 819
Alcalinidad libre	%(m/m)		0,2		0,2		0,3	INEN 821
Acidez libre (como ác. oleico)	%(m/m)		0,5		-		-	INEN 822
Materia insoluble en agua	%(m/m)		2%		2%		15	INEN 816
Materia insoluble en alcohol	%(m/m)		2%		15%		20%	INEN 817
Materia insaponificada e insaponificable	%(m/m)		2%		2%		2%	INEN 824
Ácidos resínicos	%(m/m)		15%		20%		20%	INEN 825

Fuente: NTE INEN 0839

1.5.25 Ecuaciones involucradas en el diseño del sistema de Calentamiento

Aquí se definen algunos cálculos que se deben tomar en cuenta al momento de diseñar el sistema de calentamiento.

1.5.25.1 Diámetro Óptimo. Se debe validar que el diámetro de estas tuberías es el adecuado para el flujo en el sistema de calentamiento utilizando la ecuación 1.1 de Peters y coautores (2002), para flujo turbulento, y la Tabla 17.

$$D_{i,opt} = 0.363 m_v^{0.45} \rho^{0.13} \quad (1.2)$$

Fuente: Peters y coautores (2002)

Tabla 9. Dimensiones comerciales de Tuberías

Medida nominal (pulg)	Diámetro exterior (pulg)	Número de cédula	espesor de pared (pulg)	Diámetro interior (pulg)	Area de sección transversal interna (x10 ² pie ²)
1/2	0.840	40	0.109	0.622	0.211

Fuente: (Turton y coautores, 2018)

Al momento de la ejecución de la tesis el reactor cuenta con un sistema de tuberías de pvc de cédula 40, por lo cual se debe validar que el diámetro requerido no sea superior a este valor.

1.5.25.2 Cálculos de Transferencia de Calor y Aislamiento en cilindros y esferas. En

condiciones de estado estacionario y en ausencia de cualesquiera interacciones de trabajo, la relación de conservación de la energía para un volumen de control con una admisión y una salida, y con cambios despreciables en las energías cinética y potencial, se puede expresar como:

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p\Delta T \quad (1.3)$$

Fuente: (Cengel y Ghajar, 2011)

Donde \dot{m} es el gasto de masa, C_p es el poder calorífico y \dot{Q} es la razón de transferencia neta de calor hacia afuera o hacia adentro del volumen de control

El calor se puede transferir en tres modos diferentes: Conducción, convección y radiación. La conducción es la transferencia de calor de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las menos energéticas adyacentes, como resultado de la interacción entre ellas, y es expresada por la ley de Fourier de la conducción del calor como:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{T}{dx} \quad (1.4)$$

Fuente: (Cengel y Ghajar, 2011)

Donde k es la conductividad térmica del material, A es el área perpendicular a la dirección de la transferencia de calor y dT/dx es el gradiente de temperatura.

La convección es el modo de transferencia de calor entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que se encuentra en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y del fluido en movimiento. La razón de la transferencia de calor por convección se expresa por la ley de Newton del enfriamiento como:

$$\dot{Q}_{convección} = h A_s (T_s - T_\infty) \quad (1.5)$$

Fuente: (Cengel y Ghajar, 2011)

Donde h es el coeficiente de transferencia de calor por convección, en $W/m^2 K$ o $Btu/h ft^2$ $^\circ F$ A_s es el área superficial a través de la cual tiene lugar esa transferencia, T_s es la temperatura de la superficie y T_∞ es la temperatura del fluido suficientemente lejos de dicha superficie.

En la conducción estacionaria de calor a través de un tubo de agua caliente, la transferencia de calor se produce principalmente en la dirección radial debido a la pérdida continua de calor hacia el exterior a través de la pared del tubo. Cuando el espesor de la pared es pequeño y las temperaturas de los fluidos dentro y fuera del tubo son constantes, la transferencia de calor se vuelve estacionaria y unidimensional. Esto significa que la temperatura del tubo solo depende de la dirección radial. En estas condiciones, la ley de Fourier para la conducción de calor se expresa como en la ecuación 3-38 de Cengel y Ghajar (2011):

$$\dot{Q}_{cond,cil} = \frac{T_1 - T_2}{R_{cil}} \quad (1.6)$$

Fuente: (Cengel y Ghajar, 2011)

Donde se define la resistencia por conducción en cilindros como:

$$R_{cil} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi Lk} \quad (1.7)$$

Fuente: (Cengel y Ghajar, 2011)

En el caso del flujo unidimensional de calor en estado estacionario a través de una capa cilíndrica o esférica expuesta a la convección en ambos lados, con fluidos a temperaturas T_1 y T_2 y coeficientes de transferencia de calor h_1 y h_2 , respectivamente, la red de resistencias térmicas consta de una resistencia a la conducción y dos a la convección, en serie. Esto es similar a la situación de una pared plana. La razón de la transferencia de calor en condiciones estacionarias se puede expresar como:

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{total}} \quad (1.8)$$

Fuente: (Cengel y Ghajar, 2011)

Donde la resistencia por conducción y convección en cilindros está definida por:

$$R_{total} = R_{conv,1} + R_{cil} + R_{conv,2} = \frac{1}{2\pi r_1 L} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi Lk} + \frac{1}{2\pi r_2 L h_2} \quad (1.9)$$

Fuente: (Cengel y Ghajar, 2011)

Por lo tanto, la razón de la transferencia de calor del cilindro aislado hacia el aire circundante se puede expresar como:

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_\infty}{R_{ais} + R_{conv}} = \frac{T_1 - T_\infty}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi Lk} + \frac{1}{2\pi r_2 Lh}} \quad (1.10)$$

Fuente: (Cengel y Ghajar, 2011)

1.5.26 Simulación

El software seleccionado para la simulación por su versatilidad de equipos y reactivos necesarios para realizar la reacción de saponificación es Super Pro Designer.

Las condiciones de la simulación toman como referencia datos bibliográficos como un peso molecular de 863.08 g/mol para el aceite de palma usado y una temperatura óptima de operación de 80°C utilizando agua caliente como fluido de calentamiento en la chaqueta del reactor y con un tiempo de residencia de 3 horas, se plantea el siguiente esquema inicial de simulación:

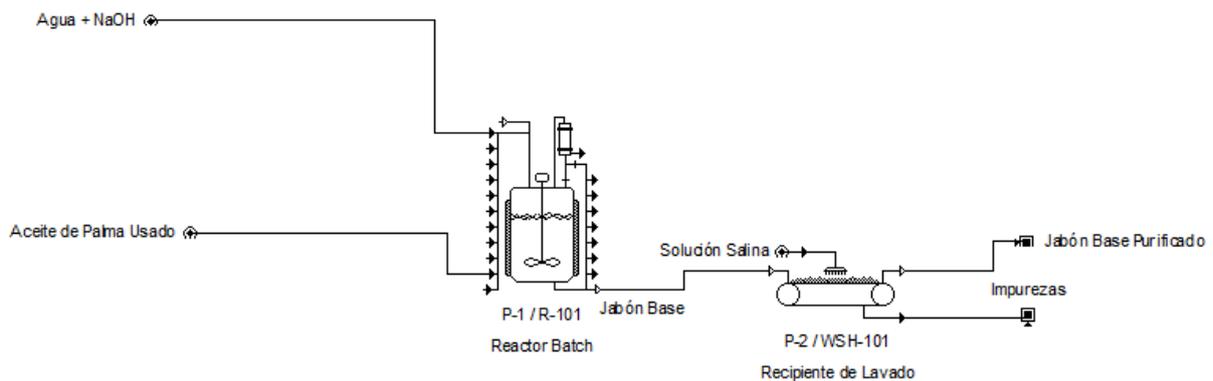


Figura 13. Simulación de Reacción de Saponificación en Super Pro Designer

También se debe usar un recipiente de lavado para realizar la separación del jabón base de las impurezas mediante lavado con una solución salina al 20%.

Capítulo 2

2. METODOLOGÍA

2.1 *Metodología*

La metodología abarca desde la caracterización de la materia prima con la recepción y filtrado del aceite de palma hasta la definición de las variables óptimas para la saponificación en caliente. El diseño de experimentos se concentra en la evaluación estadística de las variables de temperatura y tiempo de reacción en un reactor de 20 litros. Se detallan los componentes tanto del reactor como del sistema de calentamiento, que incluye un lazo de control PID. La implementación comprendió ensayos piloto y comparaciones de rendimiento entre diversas escalas, confirmando de manera concluyente la efectividad del sistema instaurado.

2.1.1 *Caracterización de materia prima y determinación del índice de saponificación*

Se receptaron 20 L de aceite de palma refinado el cual fue utilizado durante una semana en las operaciones de un restaurant de comidas rápidas en el cantón “El Triunfo”. Esta materia prima fue sometida a un filtrado con un tamiz de 0,5 mm, para luego ser sometida a la determinación de su índice de saponificación. Simultáneamente, se determinó el índice de saponificación del aceite de palma refinado virgen de la misma marca. Se aplicó el método establecido en NTE INEN 40 “Grasas y aceites comestibles. Determinación del índice de saponificación”. Esto permitió establecer las proporciones de reactivos a ser utilizados durante los micro-ensayos.

2.1.2 *Agitación*

La formación de la traza se convierte en un factor crítico en el proceso de saponificación, ya que la agitación insuficiente puede comprometer su formación, llevando a la separación del jabón o incluso generando salpicaduras. La determinación precisa de las revoluciones por minuto (RPM) se vuelve esencial para optimizar este fenómeno. En este contexto, se realizaron pruebas exhaustivas con distintos niveles de agitación, con el objetivo de rastrear la configuración más efectiva que garantice la mejor traza y prevenga salpicaduras. Tras analizar detenidamente los

resultados obtenidos, se concluyó que trabajar a 600 RPM ofrece la traza más adecuada, correspondiendo a la configuración de nivel 5 en el agitador eléctrico.

Tabla 10. *Revoluciones por niveles del Agitador Eléctrico modelo 1750*

Nivel	RPM
0	0
1	120
2	300
3	450
4	525
5	600

Fuente: (ARROW ENGINEERING, 1945)

2.1.3 Variables Óptimas para Saponificación en Caliente

En base a la bibliografía se han definido rangos óptimos de las variables de interés que más afectan en el grado de saponificación del aceite usado.

Tabla 11. *Variables Óptimas para reacción de Saponificación en Caliente*

Variables	Rango Óptimo
Exceso de Alkali	5 - 8% (Huanaco et al, 2022)
Temperatura de Reacción	70 - 80 °C (Guerrero, 2014)
Tiempo de Agitación	15-20 min (Hasta Alcanzar una mezcla Viscosa)
Tiempo de Residencia	3 - 4 h (Deng et al., 2009)
Concentración Solución Alcalina	25-30% (Guerrero, 2014)
Agitación	600 RPM en una dirección (Evitar Salpicaduras)

2.1.4 Diseño de experimentos

Como complemento a esta tesis, se decidió realizar un escalamiento de la reacción de saponificación a un reactor batch de 20 lt donde se ha implementado un sistema de calentamiento y dado que la finalidad no es la optimización de la reacción en sí mismo, se optó por el diseño de

un experimento básico 2 x 2 en el que se evalúe estadísticamente el comportamiento de las dos variables de operación más influyentes en el coste de producción: temperatura y tiempo de reacción. Para determinar el número de repeticiones se consideró una diferencia de al mínimo una unidad de pH a los resultados reportados en un artículo donde se realizó un experimento similar (Palomino, 2015), comparando los promedios de cada combinación de a = 2 niveles de temperatura y b = 2 niveles de tiempo. Bajo este supuesto, el estadístico de prueba sigue una distribución de probabilidad F con grado de no centralidad, y con una varianza de 0,056 en los resultados reportados por Palomino, se concluyó que con 3 repeticiones se alcanza una potencia de prueba igual a 0,933 para la diferencia especificada. (Lawson, 2015).

Tabla 12. Variables de operación establecidas para el experimento con 3 repeticiones

1,2: Temperatura (T)	A	B
A, B: tiempo (t)		
1	T = 60°C, t = 1h	T = 60°C, t = 3h
2	T = 80°C, t = 1h	T = 80°C, t = 3h

Al producto obtenido en estos ensayos se le realizó caracterizaciones de: pH (NTE INEN 820) y contenido de humedad (NTE INEN 818)

2.1.5 Componentes del Reactor Batch del Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOPU)

A continuación, se presentan los componentes del sistema de reactor encamisado:

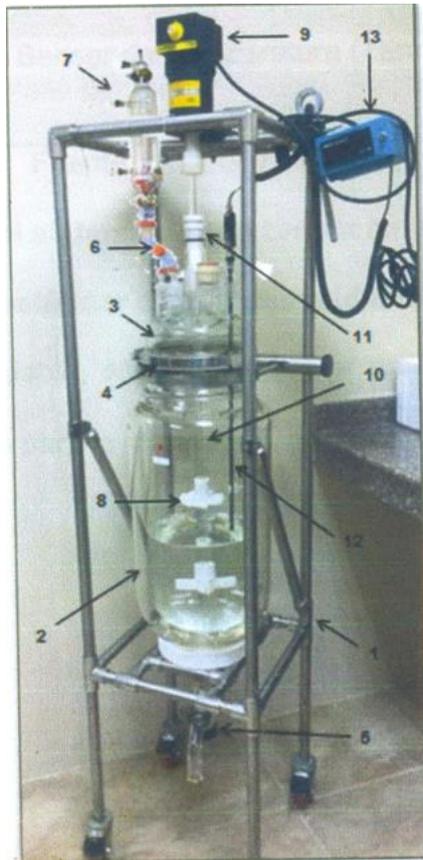


Figura 14. Reactor Batch LOPU

Fuente: (Calderón, 2016)

Tabla 13. Componentes del sistema de reactor encamisado

Componente	Descripción
1	Soporte estándar de acero inoxidable para reactor de 20 lt
2	Frasco de vidrio encamisado de 20 lt
3	Brida head Schott-Duran flange, boquilla 6 necks, puerto lateral 60 mm
4	Abrazadera de liberación rápida 200 mm (8 in.)
5	Conjunto de drenaje sellado tipo flush
6	Adaptador en ángulo de desplazamiento 24/40
7	Condensador Allihn 24/40
8	Agitador PTFE turbina y multi-aspas

9	Agitador eléctrico- modelo 1750
10	Eje rotatorio pass-through assembly
11	Ace-thread adapter
12	Sensor de temperatura (Termopar) tipo J-Kem
13	Pantalla termómetro digital, electrónica, con grabadora de salida

Fuente: (Calderón, 2016)

Tabla 14. Especificaciones generales del frasco de vidrio (reactor)

Parámetro	Rango de magnitud
Rango de temperatura admitido	-60°C to 200°C
Diferencial de temperatura máximo admisible	80°C
Presión máxima de la chaqueta	8 psig (0.34 bar)
Rango máximo de presión de trabajo	5 psig to 0 Torr

Fuente: (Ace Glass, 2015)

Tabla 15. Agitador Eléctrico – Modelo 1750

Caballos de Potencia	1.5 hp
Tamaño de lote de mezcla	20 lt
Relación de transmisión	Directo
Max. rpm	2000
Torque	2.43 pulg-lbs
Potencia	120 VAC 60 Hz
Consumo de amplificador	1.1 (110 vatios)
Diámetro del eje del motor	3/8 pulg.
Peso	8 lb (3.6 kg)

Fuente: (*Arrow Engineering, 1945*)

2.1.6 Sistema de calentamiento y lazos de control

Para el transporte de los fluidos entre procesos son necesarios una serie de componentes principales y una serie de instrumentos que muestren el transcurso del proceso. Estos componentes incluyen:

- Tuberías
- Válvulas
- Bomba: Centrífuga
- Elementos de control: sensor tipo K, transmisores o transductores, controlador de temperatura tipo K, actuadores o elemento final de control.

Entre los lazos de control considerados para controlar el proceso se encuentran:

- Resistencia con sistema de control on/off en E-101 para controlar temperatura del reactor manteniendo fijo el caudal de la bomba.
- Bomba con sistema de control que varía el caudal en P-101 para controlar la temperatura del reactor.
- Poner válvula automática en V-107 para controlar la temperatura del reactor mediante variaciones del flujo de vapor que ingresa a E-101.

De los 3 posibles lazos se decidió por implementar la resistencia con sistema de control on/off en E-101 para controlar temperatura del reactor manteniendo fijo el caudal de la bomba, ya que el reservorio E-101 cuenta ya con un agujero para adaptar la resistencia. Al evaluar las opciones restantes, se determinó un posible inconveniente con el control de la bomba ya que podría provocar un calentamiento excesivo, así como el de un excesivo costo de implementación al adquirir e instalar una válvula automática como se consideró al inicio.

La consigna fue de 80°C, la variable controlada fue la temperatura del reactor y el actuador fue la resistencia eléctrica que encendía o apagaba según fuera necesario.

2.1.7 *Diseño de Diagrama de flujo de proceso*

Al momento de la ejecución de la tesis el reactor estaba siendo usado como unidad de cristalización con un sistema de tuberías de PVC de cédula 40 que conectan la chaqueta y la alimentación del reactor con dos ollas de acero inoxidable de 20 lt cada una. Se validó que el diámetro de estas tuberías era el adecuado para el flujo en el sistema de calentamiento utilizando la ecuación 1.1, para flujo turbulento, y la Tabla 9 de Turton y coautores (2018) se determinó el diámetro comercial en cédula 40, ó SCH 40, inmediatamente superior al diámetro óptimo para este diseño. Para concretar el sistema de tuberías que permitan el uso del reactor tanto en los procesos de cristalización como en la reacción endotérmica de saponificación se identificó que era necesario la implementación de una tubería y juego de válvulas que conecte la recirculación de la chaqueta con las dos ollas, respectivamente. En este punto fue posible elaborar el Diagrama de Flujo de Proceso.

2.1.8 *Cálculos de diseño*

Para iniciar con los cálculos de diseño, se estableció el valor de \dot{m}_c (masa fría dentro del reactor) como la masa de los reactivos: 70% aceite residual, 30% sol. NaOH 30% m/m, dividiendo por el tiempo estimado de reacción. Para la determinación de la razón de transferencia total de calor total Q que debe suministrar el sistema de calentamiento, fue necesario determinar el C_p del aceite residual. Esto permitió estimar el valor de \dot{m}_h (flujo másico del fluido de calentamiento). Luego, se determinó la potencia de la bomba considerando una eficiencia $\eta_p = 0.55$, mediante la ecuación 2.1 de Turton y coautores (2018). Para esto fue necesario calcular el término de fricción e_f en la succión y en la descarga con la ecuación 2.2. Para el caso de flujo turbulento se calculó el factor de Fanning con la ecuación 2.4 donde $e = 4.6 \times 10^{-5}$ m. Se asumió que el diámetro de las tuberías de succión y descarga son iguales.

$$\int_1^2 \frac{dP}{\rho} + \frac{1}{2}u^2 + g\Delta Z + e_f - W_s = 0 \quad (2.1) \quad \text{Ec, Bernoulli}$$

$$e_f = \frac{2fLu^2}{D} = \frac{32fLv^2}{\pi^2 D^5} \quad (2.2) \quad \text{Término de fricción}$$

$$f = \frac{16}{Re} = \frac{16\mu}{Du\rho} \quad (2.3) \quad \text{Factor de Fanning flujo laminar}$$

$$\frac{1}{f^{0.5}} = -4 \log_{10} \left[\frac{e}{3.7D} + \left(\frac{6.81}{Re} \right)^{0.9} \right] \quad (2.4) \quad \text{Factor de Fanning flujo turbulento}$$

Fuente: (Turton y coautores, 2018)

2.1.9 Propiedades de la bomba a Utilizar

Dado que la bomba actual marca Pedrollo, modelo PKm 60, tiene un límite de temperatura de hasta 60°C se optó por adaptar una bomba con características de operación más favorables a la finalidad del proyecto. La bomba adaptada es Marca Pentax, modelo PKm 60. Los parámetros de la bomba más importantes son los siguientes:

Tabla 16. Propiedades bomba marca Pentax

Parámetros	Valores
Caudal	5-40 lt/min
Max Head	40 m
Potencia Teórica	0.5 hp
Voltaje	110 V
Temperatura máxima de trabajo	90°C

2.1.10 Selección del servicio de calentamiento

Como método de calentamiento al proceso de cristalización, una de las ollas cuenta con un serpentín de cobre por el que circula vapor de baja presión proveniente de una caldera, sin embargo, esto conlleva el empleo de un mayor tiempo de preparación de los equipos para efectuar el proceso de cristalización. Por lo que se evaluó la posibilidad de instalar una resistencia eléctrica disponible en el stock de LOPU, que permita reducir estos tiempos. Se seleccionó una resistencia

eléctrica de cobre de 2 kW con selector de amperaje para este fin. Además, se previó la instalación de una capa de espuma aislante alrededor de la olla para disminuir las pérdidas de calor al ambiente de este repositorio.

Tabla 17. *Propiedades de la resistencia Eléctrica implementada*

Variables	Valores
Potencia	2000 W
Temperatura máxima	100 °C
Aumento promedio de Temperatura por minuto	1°C
Voltaje	250V
Amperaje	15 A

2.1.11 *Diseño del lazo de control*

Se estableció como variable de control la temperatura al interior del reactor y como variable manipulada el estado encendido o apagado de la resistencia eléctrica. Se eligió aplicar un lazo de control cerrado PID, con un sensor/transmisor sumergible tipo k que envía la señal eléctrica al controlador. A continuación, se presentan las características del lazo de control implementado:

Tabla 18. *Propiedades del lazo de control implementado*

Características	Valor
Código	C100
Tamaño del panel	48mmx48mm
Dimensión Perforada	45mmx45mm
Profundidad	90mm
Error de Compensación del Extremo Frío	$\leq \pm 2.0$ grados
Ciclo de Control	Una vez/seg

Tensión de trabajo	85~265 V CA, 50/60 Hz
Ambiente de trabajo	Tem.0~50 grados
Humedad	≤ 85%

2.1.12 Diseño de Diagrama de instrumentación

Una vez determinados todos los elementos necesarios para el funcionamiento del sistema de calentamiento, fue posible la elaboración del diagrama de instrumentación que permitió la implementación del mismo.

2.1.13 Implementación del sistema de calentamiento

Para llevar a cabo la implementación del sistema de calentamiento, fue necesario analizar la situación actual y realizar ciertas adaptaciones en el reactor. Esto implica la instalación de tuberías apropiadas, la incorporación de una bomba capaz de soportar una temperatura de operación de 80°C y la elección de un método de calentamiento que fuera económico y fácilmente controlable mediante un controlador PID. Se siguieron los siguientes pasos para la implementación del sistema de calentamiento:

2.1.13.1 Instalación de tuberías. Se usaron tuberías de PVC y válvulas de globo disponibles en el stock de LOPU

2.1.13.2 Instalación de bomba. Se retiró una bomba que había sido utilizada durante 2 periodos académicos para los procesos de cristalización de sacarosa y sulfato de cobre debido a que presentaban cristales y sobrecalentamiento. En su lugar se instaló una bomba disponible que cumple con los requerimientos de cálculos de diseño.

2.1.13.3 Instalación de resistencia eléctrica y aislante. Se adaptó a una de las ollas una resistencia eléctrica de modo que quede sumergida al llenar el repositorio, fue necesario adaptarle una conexión 220 V. Previo a la instalación de la capa aislante se realizó una prueba en la que se colocó una masa de agua conocida al interior del reactor y se hizo recircular el fluido de calentamiento a través de la chaqueta durante 3 horas, se registraron los valores de temperatura al interior del reactor y en el repositorio para calcular las pérdidas por falta de aislamiento. Luego se realizó la misma prueba con la capa de aislante ya instalada. Se compararon los valores de pérdidas.

2.1.13.4 Instalación de lazo de control. Se contó con la asesoría de una empresa especializada en sistemas de control para el afinamiento del lazo, esta empresa fueron los proveedores del sensor tipo k y el controlador.

2.1.14 Ensayos piloto

Se efectuó un ensayo piloto con 2 réplicas aplicando las variables de operación utilizadas en los cálculos de diseño. Al finalizar, el producto obtenido fue sometido a las caracterizaciones descritas con anterioridad para su evaluación del cumplimiento de pH (NTE INEN 820) y contenido de humedad (NTE INEN 818).

2.1.15 Comparación del rendimiento de pruebas a escala piloto, micro ensayos y una simulación para comprobación de las variables de operación.

Se calculó el rendimiento estequiométrico de los micro-ensayos y de las pruebas a escala piloto, adicionalmente, una simulación del proceso fue realizada en el software Super Pro Designer. Los resultados fueron comparados lo que permitió la validación del sistema de calentamiento implementado.

La comparación de la caracterización del producto obtenido de los micro ensayos y las pruebas piloto permitieron a su vez validar la calidad del jabón puro obtenido y analizar el desarrollo de una formulación que permita la presentación de un producto competitivo y en cumplimiento de la normativa de regulación vigente.

2.1.16 Formulación

Se propuso la creación de jabones para usos caninos, completamente orgánicos y respetuosos con el medio ambiente, utilizando como base un jabón natural. Estos jabones fueron elaborados exclusivamente con ingredientes naturales como avena, miel, bicarbonato, vinagre, glicerina y aceite del árbol del té. A diferencia de muchos productos en el mercado, se evitó el uso de componentes sintéticos como la permetrina, comúnmente presente en jabones para perros, que puede ocasionar enrojecimiento, irritación y comezón en perros con piel sensible.

En la actualidad, escasean los productos que aborden de manera efectiva los problemas de ácaros, pulgas y hongos en los animales, al mismo tiempo que preservan la salud cutánea de las mascotas de forma natural. Estos jabones no solo combaten estos problemas, sino que también mantienen la piel de su mascota suave y saludable con un uso frecuente.

Capítulo 3

3.1 RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1.1 Caracterización de la materia prima

Se recibió el aceite de palma proveniente del restaurante Papas El Rey con las siguientes características organolépticas:

Tabla 19. Características organolépticas del aceite de palma refinado residual

Muestra	20 lt aceite usado “Papas El Rey”
Aroma	Fuerte olor a fritura
Color	Café
Tiempo de uso	1 semana

3.1.2 Evaluación del pretratamiento a la materia prima

Se procedió a realizar la saponificación con el aceite virgen y otro ensayo con el aceite residual para evaluar la necesidad de aplicar un mayor pretratamiento, como lavado y desodorizado, ya que algunas fuentes recomiendan aplicarlos para mejorar las propiedades organolépticas del producto (Díaz, 2005). Sin embargo, otras fuentes sugieren la factibilidad de hacer un lavado con una solución salina al final de la reacción que cumple con la misma función y con el beneficio adicional de separar la sal de jabón de la glicerina producidos (Vázquez, 2023).

Tabla 20. Variables de operación para los ensayos de evaluación de la necesidad de un pretratamiento más complejo

Materia prima	Aceite De Palma Virgen	Aceite de Palma Usado
Pretratamiento	ninguno	Filtrado con tamiz 0,5 mm
Temperatura	60 - 80 °C	60 - 80 °C
Tiempo de Residencia	3h	3h
Concentración de álcali	30%	30%

Rendimiento	95%	90-95 %
Índice de Saponificación	0,193 KOH/g aceite	0,195 KOH/g aceite

Al comparar los jabones obtenidos a partir del aceite virgen y el aceite residual, se concluyó que no era necesario un mayor pretratamiento más que el filtrado de partículas mayores a 0,5 mm que pudieran estar presentes en el aceite residual ya que las propiedades organolépticas en ambos casos son muy similares.

Tabla 21. *Características organolépticas de jabón producido a partir de aceite virgen y aceite residual.*

Materia prima	Aceite De Palma Virgen	Aceite de Palma Usado
Aroma	aceitoso	aceitoso
Color	Blanco	Blanco
Apariencia	Rústico	Rústico
Textura	Rugosa	Rugosa
pH	8	8

3.1.3 Diagrama de flujo de procesos e instrumentación

A continuación, se presenta el diagrama de flujo PIDs que se creó a partir de la implementación del sistema de calentamiento y control en el reactor:

P-101	E-101	T-101	R-101	V-101	V-102	V-103	V-104	V-105	V-106	V-107	V-108	V-109	V-110
Bomba	Tanque de Calentamiento	Tanque de Enfriamiento	Reactor Batch	Válvula Purga E-101	Válvula T-101 a P-101	Válvula T-101 a P-101	Válvula Purga T-101	Válvula P-101 a R-101	Válvula P-101 a R-101	Válvula de R-101 a T-101	Válvula de R-101 a E-101	Válvula de Purga	Válvula de Condensado

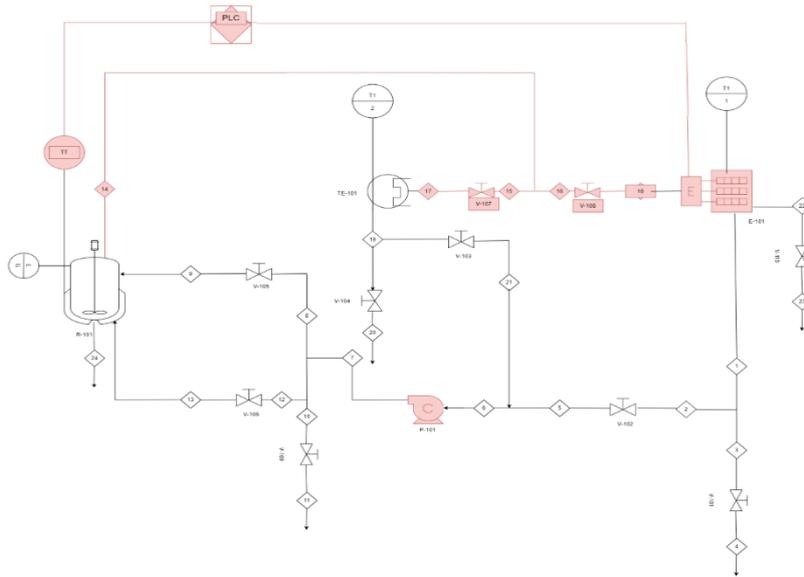


Figura 15. Diagrama de flujo de procesos e instrumentación

Se incorporó una nueva bomba P-101 capaz de operar a temperaturas de hasta 90°C. Se decidió incluir una resistencia eléctrica en E-101 para controlar la temperatura en el reactor de forma indirecta mediante un controlador PID. Además, se instaló un termopar más largo y compatible con el controlador, lo que permitió trabajar con volúmenes inferiores a 10 L, algo que anteriormente solo era posible con volúmenes superiores a 10 L. También se añadieron nuevas válvulas V-107 y V-108 para mantener el funcionamiento del reactor como un cristalizador, estableciendo un juego de válvulas entre el tanque de enfriamiento y el tanque de calentamiento.

Se evaluó la diferencia de costos entre operar la caldera y operar la resistencia eléctrica en el reactor obteniendo lo siguiente:

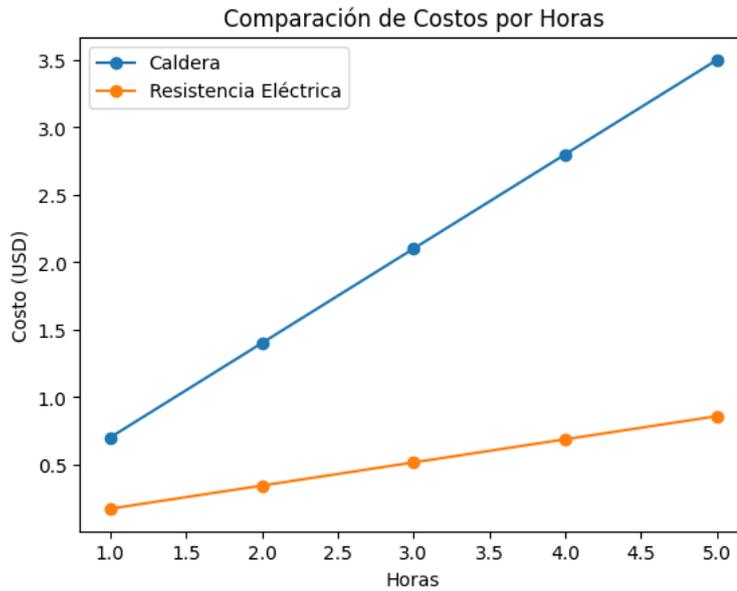


Figura 16. *Gráfica de comparación de costos por horas entre la Caldera y la Resistencia eléctrica implementada*

3.1.4 Aislamiento de la Olla de Calentamiento

Se implementó una capa de aislante de fibra de vidrio con un espesor de aproximadamente 1 cm para mitigar las pérdidas de calor que se generaban a través de las paredes del recipiente. Se determinó previamente el radio crítico, evidenciando que, con este grosor específico de aislante, las pérdidas de calor se reducían en más del 96%. En consecuencia, se optó por instalar esta cantidad precisa de aislante, logrando un equilibrio efectivo entre eficiencia térmica y practicidad en la aplicación.

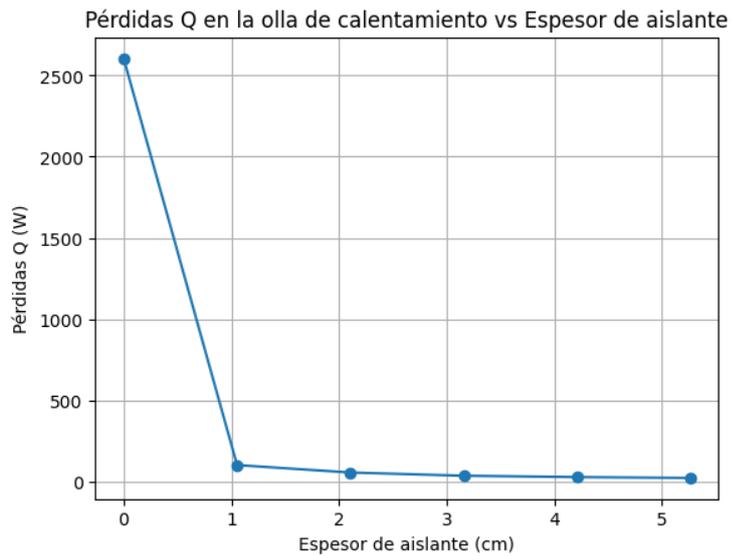


Figura 17. Gráfica de las pérdidas de calor vs el espesor del aislante

Posteriormente, se llevó a cabo una evaluación al incrementar el espesor del aislante hasta 10 cm, obteniendo una reducción aún mayor del 99.4% en las pérdidas de calor. Sin embargo, se reconoció que este aumento de espesor implicaría el uso de una cantidad considerable de aislante, lo cual podría resultar poco práctico y difícil de aplicar. En vista de esta consideración, se tomó la decisión de mantener el espesor en 1 cm, garantizando una mejora sustancial en la eficiencia térmica sin incurrir en complicaciones logísticas.

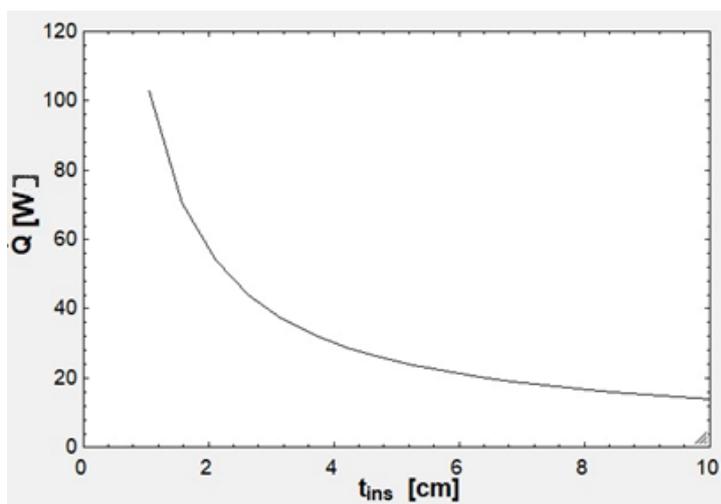


Figura 18. Gráfica de evaluación del impacto del aumento de espesor del aislante

3.1.5 Resultados de cálculos de la bomba

Se calculó las pérdidas por fricción e instrumentos de la bomba, luego se calculó la potencia real requerida asumiendo una eficiencia teórica del 55%.

Tabla 22. Resultados sistema de bombeo

Reynolds	Factor Fanning corregido	hB	Potencia ideal Requerida	Potencia real Requerida
3.32×10^5	0,02770	132,40 m	420,66 W	764,84 W

Según el fabricante la bomba necesita 373 W para funcionar, pero debido a la configuración y a la eficiencia asumida se necesita más del doble de esa potencia, lo cual puede aumentar los costes para operar el reactor y debe considerarse en los costes de operación.

3.1.6 Resultados del diseño de experimentos

Se designó que 1 y 2 corresponden a temperaturas de 60 y 80 °C, respectivamente, mientras que A y B representan tiempos de residencia de 1 a 3 horas, respectivamente. Se obtuvo los siguientes resultados para jabón base:

Tabla 23. Resultados diseño de experimentos

1A	1B	2A	2B
----	----	----	----

Variable/Experimento				
Rendimiento	92.190% ± 0.005	94% ± 0.005	97.210% ± 0.005	100.000% ± 0.005
σ Rendimiento	1.75	0.6063	1.5	1.372
pH	8.5 ± 0.5	8.5 ± 0.5	8.5 ± 0.5	8.5 ± 0.5
σ pH	0.2361	0	0.2361	0
Humedad	23.745 ± 0.005	19.200 ± 0.005	20.595 ± 0.005	17.140 ± 0.005
σ Humedad	8	2.32	2.06	0.88

Como resultado de estas designaciones, se decidió llevar a cabo el Experimento 2A, trabajando a 80 °C con un tiempo de residencia de 1 hora. Esta elección se basa en la eficiencia demostrada, ya que esta configuración ofrece ahorros energéticos notables y prácticamente produce la misma cantidad de jabón en comparación con otras condiciones experimentales.

3.1.7 Resultados de la Simulación

La Simulación se llevó a cabo mediante un proceso por lotes de un reactor bajo las mismas condiciones empleadas en los ensayos piloto. El proceso inicia con la carga del aceite de palma y la solución alcalina al 30%, luego de eso ocurre la reacción de saponificación en la que un mol de Aceite reacciona con 3 moles de álcali para obtener 3 moles de jabón y un mol de glicerina. Se asumió un peso molecular de 863.08 g/mol basado en su índice de saponificación para el aceite de palma usado y una temperatura óptima de operación de 80°C utilizando agua caliente como fluido de calentamiento y con un tiempo de residencia de 1 horas.

Tabla 24. Resultados para jabón base sin purificar

Componente	Tasa de Flujo	Composición Másica
Aceite de Palma sobrante	0,092 kg/batch	0,63%
Glicerina	1,074 kg/batch	7,36%
Jabón	10,22 kg/batch	70,1%
NaOH sobrante	0 kg/batch	0%
Agua	3,2 kg/batch	21,93%
Total	14,59 kg/batch	100%

Los resultados obtenidos reflejan que reacciona todo el álcali ingresado y se forma jabón con glicerina, sobrando muy poco aceite. Las condiciones de temperatura y presión a la salida fueron de 81,3°C y 1,21 bar respectivamente. Luego de esto se realizó el lavado con sal, para ello se utilizó 10 kg de una solución salina al 20%, se obtuvieron los siguientes resultados para el jabón base purificado:

Tabla 25. *Resultados para jabón base purificado*

Componente	Tasa de Flujo	Composición Másica
Jabón	10,22 kg/batch	76,16%
Agua (Humedad)	3,2 kg/batch	23,84%
Total	13,42 kg/batch	100%

Las condiciones de temperatura y presión a la salida fueron de 63,5 °C y 1,013 bar respectivamente. Adicionalmente se obtuvieron los siguientes resultados para las impurezas desechadas:

Tabla 26. *Resultados para impurezas desechadas*

Componente	Tasa de Flujo	Composición Másica
Aceite de Palma sobrante	0,92 kg/batch	0,82%
Glicerina	1,074 kg/batch	9,62%
NaCl	2,0 kg/batch	17,91%
NaOH	0,0 kg/batch	0,0%
Agua	8,0 kg/batch	71,64%
Total	11,16 kg/batch	100%

Las condiciones de salida de temperatura y presión fueron de 37,1 °C y 1,013 bar respectivamente, lo cual es apropiado para agregar el resto de ingredientes y el aceite esencial natural del árbol del té, ya que estos aceites esenciales suelen ser muy volátiles. Se espera que el jabón base purificado obtenido tenga un pH de 8,5 ya que se utilizó un tiempo de residencia de 1 hora como el ensayo 2A del diseño de experimentos.

3.1.8 Resultados escala piloto

Luego de la simulación, se procedió a realizar los ensayos piloto, obteniendo los siguientes resultados

Tabla 27. Resultados escala piloto

	Pruebas Piloto
Variable/Experimento	
Rendimiento	94.70 ± 0.005
pH	8.5 ± 0.5
Humedad	23.82 ± 0.005

3.1.9 Comparación entre micro ensayos, simulación y escala piloto

Se obtuvieron los siguientes resultados para cada uno:

Tabla 28. Resultados de la comparación entre micro ensayos, simulación y escala piloto

	Micro ensayos	Simulación	Escala piloto
Variable/Experimento			
Rendimiento	97.210% ± 0.005	92.004 ± 0.005	94.698 ± 0.005
pH	8.5 ± 0.5	8.5 ± 0.5	8.5 ± 0.5
Humedad	23.745 ± 0.005	23.889 ± 0.005	23.817 ± 0.005

3.1.10 Análisis de costos por Batch

Después de obtener la base de jabón, se procedió a producir un lote de jabones para perros 100% orgánicos y eco amigables mediante la incorporación de ingredientes naturales. A continuación, se realizó un análisis detallado de los costos asociados con el funcionamiento del reactor por lotes para trabajar con 10 Kg de aceite:

Tabla 29. Análisis de Costos por Batch

Kg de Jabón obtenidos por Batch	Costo materia prima por batch	Costo operación	Costo total	Jabones Producidos (100 g)	Costo/jabón	Precio de Venta	Venta de jabones	Ganancia	Tasa de retorno
19,8	\$156,2	\$26	\$182	198	\$0,92	\$2,50	\$496	\$314	172%

Se invirtió \$120 dólares en el sistema de control, entonces con la ganancia producida por la venta de 1 lote es suficiente para recuperar la inversión realizada.

3.1.11 Análisis económico

Se decidió llevar a cabo una evaluación de factibilidad de llevar a cabo un proyecto en LOPU para producir al menos 95040 jabones anuales durante un periodo de 10 años. Se estima que solo en Guayaquil hay un total de 400.000 perros de compañía, según un censo realizado en 2022 por municipio de Guayaquil (Merchán, 2022). Basándonos en encuestas anteriores realizadas por Ortiz y Verdesoto (2013), se determinó la demanda total mensual de jabón en barra de Guayaquil como 404.821 jabones anuales en barra, lo cual demuestra que es factible producir 95.040 jabones anuales y competir con las marcas actuales tanto nacionales como internacionales, ya que a diferencia de ellos nuestro jabón es hecho a partir de ingredientes naturales y sin componentes como la permetrina que pueden causarle alergia o irritación a algunos animales de piel sensible. A continuación, se presenta los valores obtenidos de VAN y TIR con un TMAR de 16,97% y una inversión inicial de \$47,367.76:

Tabla 30. Resultados de TIR y VAN

TMAR	16,97%
TIR	118%
VAN	\$ 306.738,5
Payback	1 año
Inversión total	\$59.918,86

Con la inversión inicial y el flujo neto efectivo anual se determinó que en un año se recupera la inversión inicial y se empieza a obtener ganancias. A continuación, se halló el punto de equilibrio:

Tabla 31. Punto de equilibrio

Costo Fijo Total	\$ 3.523,31
Precio	\$ 2,50

Costo Variable	\$	1,15
Unitario		
Q Equilibrio		2604

Se calculó que hacer cada jabón cuesta \$1,15 y que al venderlo en un precio de introducción de \$2,50 entonces se debe vender al menos 2604 jabones mensuales para alcanzar el umbral de rentabilidad.

Capítulo 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

4.1.1 Conclusiones

- La implementación exitosa de un sistema de calentamiento con lazo de control de temperatura en un reactor por lotes del LOPU, destinado a la saponificación de aceite residual de un restaurante en el cantón "El Triunfo", representa un logro trascendental en ingeniería química. Este proyecto, culminado con éxito, no solo ha enriquecido el ámbito educativo al proporcionar a los estudiantes oportunidades prácticas en reacciones endotérmicas, como la saponificación, sino que también ha contribuido a soluciones ambientales y sociales, ya que ha impulsado la conciencia sobre la gestión responsable de residuos, destacándose en la reutilización del aceite residual en la producción de jabón.
- Al comparar los jabones obtenidos a partir del aceite virgen y el aceite residual, se concluyó que no era necesario un mayor pretratamiento más que el filtrado de partículas mayores a 0,5 mm que pudieran estar presentes en el aceite residual ya que las propiedades organolépticas en ambos casos son muy similares, permitiendo simplificar etapas iniciales y optimizando recursos, además se determinaron las variables de operación más convenientes de 80°C y 1 hora basadas en el experimento 2A de los micro ensayos de laboratorio.
- Se diseñó un diagrama de flujo de proceso e instrumentación incluyendo la resistencia eléctrica y un juego de válvulas para que el reactor siga siendo posible usarlo como cristizador, las mejoras implementadas en el sistema de calentamiento y control demostraron ser efectivas para mantener la eficiencia del reactor y reducir las pérdidas de calor y energía. Un ejemplo de ello fue que los resultados del cálculo de las pérdidas de calor en el tanque de calentamiento evidencian que un grosor de 1 cm de aislante ha logrado reducir las pérdidas de calor en más del 96%. Además, el cálculo de pérdidas por fricción

e instrumentos de la bomba reveló que, para el correcto funcionamiento del sistema, se requeriría una potencia real de más del doble de la potencia indicada por el fabricante, lo cual podría resultar en costos operativos sustancialmente superiores

- La consistencia observada entre los resultados de los micro ensayos, la simulación y la escala piloto respalda la adecuada elección de las variables de operación del reactor. Esta concordancia fortalece la validez y eficacia de las decisiones tomadas durante el diseño y operación del sistema. Los resultados de la simulación han desempeñado un papel crucial al proporcionar una visión detallada del proceso de producción, ofreciendo información valiosa sobre la composición del jabón en distintas etapas. Este respaldo de la simulación refuerza la confianza en las decisiones operativas tomadas, contribuyendo así a la optimización y eficiencia del proceso de producción de jabón
- El análisis de costos por lote ha revelado que la inversión inicial y los costos operativos son adecuados, asegurando la rentabilidad del proceso y la capacidad para recuperar la inversión inicial. La evaluación de la factibilidad económica, que incluye el flujo de caja a largo plazo y la gestión financiera, confirma la viabilidad a largo plazo del proyecto, demostrando su capacidad para alcanzar auto sustentabilidad en un período razonable. Los indicadores financieros, como una TIR del 118%, un VAN de \$306,738.5 y un periodo de payback de 1 año, respaldan la solidez financiera del proyecto. Además, el análisis de equilibrio indica que se deben vender al menos 2604 jabones mensuales al precio de introducción de \$2.50 para alcanzar el umbral de rentabilidad, consolidando la posición financiera positiva del proyecto.

4.1.2 Recomendaciones

- Se sugiere explorar la versatilidad del reactor mediante la realización de otras reacciones endotérmicas que se encuentren dentro de un rango de temperatura de 40 a 80°C. Esta recomendación se basa en la capacidad del reactor para operar eficientemente en este intervalo térmico y busca ampliar el alcance de experimentación del sistema. Al incorporar nuevas reacciones endotérmicas, se podría aprovechar al máximo la funcionalidad del reactor por lotes del LOPU, permitiendo a los estudiantes explorar una variedad de procesos químicos y obtener una comprensión más integral de las aplicaciones prácticas de la ingeniería química. Además, esta iniciativa proporcionaría una valiosa oportunidad para la investigación y el descubrimiento de nuevos conocimientos en el ámbito de las reacciones endotérmicas a temperaturas moderadas.
- Se propone considerar la diversificación del producto final, que actualmente es un jabón base, mediante la exploración de la fabricación de distintos tipos de jabones derivados de este compuesto. Un ejemplo concreto sería la producción de jabón para lavar la ropa. Aunque se evaluaron previamente alternativas como la creación de jabón líquido y de uso tópico, se tomó la decisión de enfocarse en el desarrollo de un jabón específicamente diseñado para uso canino. Esta recomendación busca ampliar el espectro de productos derivados del jabón base, aprovechando la versatilidad del proceso de producción. La introducción de nuevas variantes de jabones podría brindar oportunidades adicionales de mercado y atender necesidades específicas, agregando valor al proyecto y expandiendo su potencial impacto en diversos sectores.
- Se sugiere como futuros pasos de investigación la realización de estudios de mercado más detallados y específicos, centrándose especialmente en el segmento

de dueños de mascotas. Estos estudios podrían proporcionar información valiosa sobre las preferencias, necesidades y comportamientos del consumidor en este nicho de mercado. Además, se recomienda llevar a cabo análisis de competencia más exhaustivos para entender mejor el posicionamiento del producto en relación con otros productos similares disponibles en el mercado.

- Los resultados de la simulación subrayan la necesidad imperante de implementar un método eficaz para recuperar la glicerina perdida durante el lavado con sal. Esta acción no solo sería un acto de responsabilidad ambiental al reducir el desperdicio de un subproducto valioso, sino que también podría representar una fuente adicional de ingresos para el proceso. La glicerina recuperada podría ser dirigida a diversas aplicaciones, como la venta a industrias cosméticas, farmacéuticas o alimenticias. Esta perspectiva refuerza la importancia y la urgencia de adoptar medidas que mitiguen los impactos ambientales y económicos asociados con el proceso de producción de jabones. Se recomienda llevar a cabo un análisis detallado de la viabilidad económica y técnica de este método de recuperación de glicerina, teniendo en cuenta tanto los beneficios económicos como los ambientales.

Bibliografía

- Abarca, P. (2006). Descripción de Calderas. ACHS. Obtenido de https://www.achs.cl/docs/librariesprovider2/empresa/centro-de-fichas/trabajadores/calderas_01.pdf?sfvrsn=8c8a1d83_0
- Ace Glass. (2015). Process Scale-UP Systems- Featuring Reactors from Micro to Batch Scale. Obtenido de https://www.aceglass.com/Html/3dissues/Protean_Fusion/Offline/Download.Pdf
- Arrow Engineering. (1945). Electric Stirrers & Mixers. Obtenido de <https://www.arrowmixingproducts.com/product/model-1750/>
- Ayala, M. (2011). Evaluación de la calidad del aceite de mezclas vegetales utilizado en doce frituras sucesivas empleado para freír plátano hartón verde [Tesis de grado, Pontificia universidad Javeriana]. Repositorio institucional. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10554/8796>
- Barbosa, C., Ramírez, L. N., & Morales, N. (2014). Obtención de biodiesel (etil-éster) mediante catálisis básica a nivel planta piloto derivado de aceites usados de la industria alimenticia. Publicaciones E Investigación, 99-116. doi: <https://doi.org/10.22490/25394088.1293>
- Calderón, B. (2016). Puesta en marcha con fines didácticos del reactor batch del laboratorio de operaciones unitarias [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. Repositorio institucional. Obtenido de <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/46115>
- Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). Transferencia de Calor y Masa Fundamentos y Aplicaciones (4ta ed.). USA: Pearson Education. ISBN-10: 0073398195, ISBN-13: 9780073398198.
- Díaz, J. (2005). Exploración del proceso de tratamiento y limpieza de aceite usado de cocina para la producción de biodiesel [Tesis de grado, Universidad De Los Andes]. Repositorio Institucional. Obtenido de <http://hdl.handle.net/1992/22181>
- Fernández, A., Bayona, W., Campos, J., Cruz, A., & Pérez, J. (2020). Diseño de proceso para la elaboración de jabón a base de aceite de cocina usado en la Urb. Santa María del Pinar, distrito Piura [Trabajo de Investigación para el curso de Proyectos del Programa de Ingeniería, Universidad de Piura]. Repositorio Institucional. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11042/4618>
- Fogler, H. S. (2003). Elementos de ingeniería de las reacciones químicas (3ra ed.). España: PEARSON. ISBN: 978-970-26-1198-1.

- González, C., & González, U. (2015). ACEITES USADOS DE COCINA. PROBLEMÁTICA AMBIENTAL, INCIDENCIAS EN REDES DE SANEAMIENTO Y COSTE DEL TRATAMIENTO EN DEPURADORAS. Obtenido de <https://www.residusmunicipals.cat/uploads/activitats/docs/20170427092548.pdf>
- Guerrero, C. (2014). DISEÑO DE UNA PLANTA DE FABRICACIÓN DE JABÓN A PARTIR DE ACEITES VEGETALES USADOS [Tesis de grado, Universidad de Almería]. Repositorio institucional. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10835/3371>
- Hayes, R., & Mmbaga, J. (2012). Introduction to Chemical Reactor Analysis (2da ed.). London: CRC Press. ISBN 13: 9780429071515. doi: <https://doi.org/10.1201/b13141>
- Lawson, J. (2015). Design and Analysis of Experiments with R (Primera ed.). 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300: CRC Press. ISBN-13: 978-1-4987-2848-5.
- López, M., & Pascual, M. (2010). Mode of inhibition of acetylcholinesterase by monoterpenoids and implications for pest control. doi: 10.1016/j.indcrop.2009.11.005
- Márquez, L. (2013). Diseño de un sistema para la gestión de aceites vegetales usados en cañete para producir biodiesel [Tesis de Pregrado, Universidad de Piura]. Repositorio Institucional. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11042/2015>
- Núñez Estrella, J. L., & Udeos Zabala, T. D. (2015). Diseño, Construcción y Operación de un Reactor Batch para Saponificar Acetato de Etilo. Obtenido de Repositorio Dspace: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/38218>
- Núñez, J., & Udeos, T. (2015). Diseño, Construcción y Operación de un Reactor Batch para Saponificar Acetato de Etilo [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica Del Litoral]. Repositorio Institucional. Obtenido de <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/38218>
- Ortiz, M., & Verdesoto, R. (2013). Producción y comercialización de jabón para caninos en la provincia de pichincha para la empresa química Riandi cá. LTDA [Tesis de maestría, Universidad de las fuerzas armadas]. Repositorio institucional. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/9868>
- Peters, M., Timmerhaus, K., & West, R. (2002). Plant design and economics for chemical engineers (5ta ed.). McGraw-Hill Professional. ISBN-10: 12590021X, ISBN-13:9781259002113.
- Trambouze, P., & Euzen, J. (2004). Chemical reactors. Editions OPHRYS. ISBN 13: 9782710811244.

- Turton, R., & Shaeiwitz, J. (2018). *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes* (5ta ed.). USA: Pearson Education. ISBN-10: 0134177401, ISBN-13: 9780134177403.
- Vázquez, U. (2023). Diseño de jabón con base en aceite de cocina usado de San Andrés Cholula para limpieza de motores automotrices. Universidad Iberoamericana Puebla, 1-5. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.11777/5707>
- Deng, Q., Wang, Q., Wang, Q., Huang, Q., & Yin, P. (2009). Study on Saponification Technology of Waste Edible Oil. <https://doi.org/10.1109/icbbe.2009.5163501>
- Esquivel Ramírez, A., Castañeda Ovando, A., & Ramírez Godínez, J. (2014). Cambios químicos de los aceites comestibles durante el proceso de fritura. Riesgos en la salud. *Pädi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*, 2(3). <https://doi.org/10.29057/icbi.v2i3.526>
- Félix, S., Araujo, J. F. M., Pires, A. M., & Sousa, A. C. M. (2017). Soap production: a green prospective. *Waste Management*, 66, 190 - 195. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.04.036>
- Huanaco, C. N., Ayme, M. R., & Chambi, R. R. (2022). Elaboración de jabón para uso industrial a partir del aceite reciclado en el pueblo tradicional de Carmen Alto del distrito de Cayma, Arequipa 2020. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(2), 4436-4466.
- Vásconez, L. (2018). Convenios en cinco ciudades del Ecuador para reciclar aceites usados. *El Comercio*. <https://www.elcomercio.com/actualidad/ecuador/convenios-ciudades-ecuador-reciclar-aceites.html>
- Mills C, Cleary BJ, Gilmer JF, Walsh JJ. Inhibition of acetylcholinesterase by Tea Tree oil. *J Pharm Pharmacol*. 2004 Mar;56(3):375-9. doi: 10.1211/0022357022773. PMID: 15025863.
- Merchán, J. P. (2022). Censo revela que habitan 770.000 mascotas en Guayaquil. *Expreso*. <https://www.expreso.ec/guayaquil/censo-revela-habitan-770-000-mascotas-132515.html>
- INEN. (1980). NTE 0839 Agentes tensoactivos. Jabón en barra. Requisitos
- INEN. (1980). NTE 815 Agentes tensoactivos.
- INEN. (1980). NTE 816 Agentes tensoactivos. Determinación de la materia insoluble en agua.
- INEN. (1980). NTE 817 Agentes tensoactivos. Determinación de humedad y materia insoluble en alcohol.
- INEN. (1980). NTE 818 Agentes tensoactivos. Determinación de humedad y materia volátil.

INEN. (1980). NTE 819 Agentes tensoactivos. Determinación de cloruros.

INEN. (1980). NTE 821 Agentes tensoactivos. Determinación de la alcalinidad libre.

INEN. (1980). NTE 822 Agentes tensoactivos. Determinación de la acidez libre.

INEN. (1980). NTE 823 Agentes tensoactivos. Determinación de la materia grasa total.

INEN. (1980). NTE 824 Agentes tensoactivos. Determinación de la materia insaponificada y de la materia insaponificable.

INEN. (1980). NTE 825 Agentes tensoactivos. Determinación de ácidos resínicos

Apéndice A



Figura 19. *Instalación de Resistencia Eléctrica*



Figura 20. *Instalación de aislante de fibra de vidrio*



Figura 21. *Instalación de la nueva bomba PKm60 para trabajo a alta temperatura*



Figura 22. Controlador PID C100



Figura 23. Controlador Instalado con set point de 80°C



Figura 24. *Reactor Batch 20 L con Sistema de calentamiento*

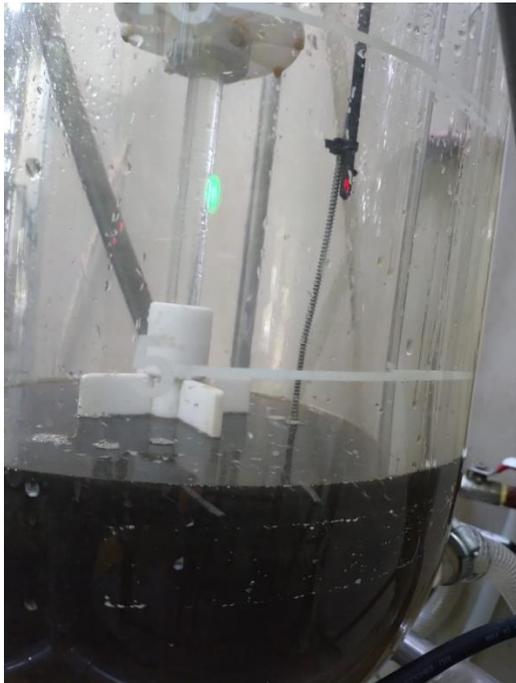


Figura 25. *Adaptación de termocupla compatible con el controlador*



Figura 26. *Reacción de Saponificación*



Figura 27. *Lavado del jabón base con solución salina*



Figura 28. *Eliminación de glicerina e impurezas producidas*



Figura 29. *Filtración del jabón base*



Figura 30. *Jabón Base producido*



Figura 31. *Jabón veterinario post formulación*



Figura 32. *Producto final: Jabón de perro con aceite esencial del árbol del té, avena, miel, bicarbonato, vinagre y aceite reciclado y purificado.*



Figura 33. *Modelos de jabón de 50 y 100g respectivamente*



Figura 34. *Elaboración de empaque y logo del producto final*



Figura 35. *Prueba del producto (Jabón de Perro)*