



Trabajo Final
Carrera de Ingeniería Química

**DISEÑO DE UNA PLANTA DE
PRODUCCIÓN DE JABONES
SÓLIDOS.**

Alumno: Fernández de Ullivarri, Belén

Tutor: Ploper, Aldo

2025

Trabajo Final de la carrera de Ingeniería Química presentada a la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán, Argentina, como requisito final para obtener el título de **Ingeniero Químico**.

Trabajo Final evaluado por el tribunal integrado por:

- Dra. Mariela Gonzalez
- Dra. María Emilse Araoz
- Ing. María Berónica Apud

y presentado oralmente en el día de la fecha.

San Miguel de Tucumán, *8 de agosto de 2025*

Dra Mariela Gonzales

Dra. María Emilse Araoz

Ing. María Berónica Apud

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial a Diego Coronel que me pasó todos sus conocimientos de manera desinteresada y a mi tutor Aldo que no solo gestionó el contacto, sino que me ayudó y esperó con una paciencia estoica a lo largo de todo el proceso.

Un agradecimiento gigante para Nadia, Julián, Agus, Z, Nacho, Mati, Juli, Vicky, Cami, Nico, Emi, Sabri y todos esos amigos y compañeros con los que compartimos mucho más que tardes de estudio. Probablemente no estaría aquí de no ser por ustedes.

Otro agradecimiento para mis papás que siempre apostaron por mi educación y me dieron las facilidades para poder hacerlo. Nuevamente a mis papás y (aquí también incluyo a mis hermanos) por soportarme los días previos a los exámenes y por darme el tiempo y el espacio que necesitaba para rendir.

Gracias a toda la gente de mi país que contribuyó desde sus impuestos para que personas como mis compañeros y yo podamos acceder a una educación superior gratuita.

Gracias a todos esos compañeros con los que compartí materias, gracias por su generosidad, por sus apuntes y por esa red de apoyo constante que hizo el camino mucho más llevadero.

Gracias a mis profesores, especialmente a los profesores de los últimos años, con los que uno forja una relación más estrecha. Gracias por el trabajo que hacen, por el conocimiento que nos transfieren y por la pasión con la que hacen su trabajo (además de la paciencia con la que nos enseñan).

Por último, y no menos importante, gracias a esa Belén de dieciocho años que sin saber qué estudiar se metió en ingeniería química (porque era buena en física química y matemáticas). Y no, no le agradezco por la elección de carrera, le agradezco por no haber bajado los brazos. Le agradezco a esa Belén porque solo yo sé todo lo que tuvo que superar emocionalmente para que yo hoy pueda estar aquí, cerrando este ciclo y estoy muy orgullosa de ella.

RESÚMEN

El mercado de jabones ha evolucionado hacia una mayor sostenibilidad, impulsado por el creciente interés de los consumidores en productos ecológicos. La demanda de jabones sólidos elaborados con ingredientes naturales, veganos y biodegradables ha aumentado notablemente, al igual que el uso de envases reciclables. Esta tendencia responde a una conciencia ambiental cada vez más marcada y a la búsqueda de alternativas que sean tanto eficaces como respetuosas con el medio ambiente. Como resultado, surgen nuevas oportunidades para la industria de higiene personal, que debe adaptar sus procesos productivos a estas exigencias.

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar una planta de producción de jabón sólido elaborado con aceites vegetales, y componentes naturales contemplando los aspectos técnicos y operativos esenciales para una producción a mediana escala. Para ello, se diseñará un producto que cumpla estos requisitos, formulado a base de aceite de coco y oliva; Se diseñará además el proceso productivo de 1.000 toneladas de jabón neto anuales, se dimensionará los principales equipos involucrados (como lo son el reactor de saponificación, los tanques de tratamiento de materias primas y el intercambiador de calor) y se realizará un análisis económico para evaluar los costos del proyecto de inversión.

La relevancia de este proyecto radica en la posibilidad de crear un impacto positivo en la industria de la higiene personal, fomentando el uso de productos que no solo son benéficos para el usuario, sino que también sean amigables con el planeta.

A medida que el interés por alternativas sostenibles sigue en aumento, el diseño de esta planta representa una respuesta innovadora a las necesidades del mercado actual, abriendo nuevas oportunidades para un futuro más verde.

Palabras clave: Jabón, saponificación, diseño de planta.

PRÓLOGO.....	8
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO.....	9
1.1 CONCEPTOS BÁSICOS	9
1.1.1 ¿QUÉ ES EL JABÓN?	9
1.1.2 MECANISMO DE LIMPIEZA DEL JABÓN	9
1.1.3 TIPOS DE JABONES.....	9
1.1.4 PROPIEDADES DE UN JABÓN SÓLIDO	11
1.2 LA QUÍMICA DEL JABÓN	12
1.2.1 LÍPIDOS.....	12
1.2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS LÍPIDOS.....	12
1.2.3 ÁCIDOS GRASOS.....	12
1.2.4 ACILGLICEROLES, GRASAS Y ACEITES	13
1.2.5 MECANISMO DE OBTENCIÓN DE UN JABÓN CONVENCIONAL: PROCESO DE SAPONIFICACIÓN	14
1.2.6 CINETICA DE REACCIÓN.....	16
Fase autocatalítica.....	17
Fase bimolecular	17
FACTORES CRÍTICOS EN LA REACCIÓN	18
1.2.7 ÍNDICE DE SAPONIFICACIÓN.....	19
1.2.8 INDICE DE YODO	19
1.2.9 INS O INDICE DE ESTER	19
1.3 PROCESO DE OBTENCIÓN.....	20
PROCESO EN CALIENTE.....	20
PROCESO EN FRÍO	20
1.3.1 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL JABÓN A NIVEL INDUSTRIAL.....	21
HERVIDO DE JABÓN EN CALDERA.....	21
SISTEMAS CONTINUOS DE SAPONIFICACIÓN Y NEUTRALIZACIÓN.....	22
SEMI-HERVIDO O "SIN ASIENTO"	23
CAPÍTULO 2: FORMULACIÓN, DISEÑO DEL PROCESO PRODUCTIVO Y CÁLCULOS. 25	25
2.1 FORMULACIÓN	25
2.1.1 GRASAS Y ACEITES	25
2.1.2 SODA CÁUSTICA.....	26
2.1.3 CONSERVANTES	26
2.1.4 COLORANTES:	26

2.1.5 FRAGANCIAS.....	27
2.1.6 ELECTROLITOS.....	28
2.1.7 ADITIVOS	28
2.1.8 PRONÓSTICO DE PROPIEDADES.....	29
2.2 DISEÑO DEL PROCESO PRODUCTIVO.....	31
2.2.1 PROPIEDADES DE LAS PRINCIPALES ESPECIES INTERVINIENTES.....	31
ACEITE DE OLIVA.....	32
ACEITE DE COCO.....	33
NaOH.....	34
DIFICULTADES TÉCNICAS.....	34
2.2.2 POTENCIAL ECONÓMICO	35
ANÁLISIS DEL POTENCIAL ECONÓMICO CON ÍNDICES DE SAPONIFICACIÓN	36
2.2.3 RÉGIMEN DE OPERACIÓN	37
2.2.4 ESTRUCTURA DE ENTRADA-SALIDA DEL PROCESO.....	37
TRATAMIENTO DE MATERIAS PRIMAS	38
SEPARACIÓN DE PRODUCTOS Y SUBPRODUCTOS	38
2.2.5 DISEÑO DEL PROCESO PRODUCTIVO POR ETAPAS.....	39
UNIDAD DE TRATAMIENTO DEL ACEITE DE OLIVA	39
UNIDAD DE CALENTAMIENTO DEL ACEITE DE COCO	40
UNIDAD DE REACCIÓN: REACTOR.....	40
UNIDAD DE ENFRIADO	41
CONFORMADO Y EMPAQUETADO: LINEA DE ACABADO DEL JABON	41
2.3 CÁLCULOS.....	45
2.3.1 DISEÑO DEL REACTOR TIPO BATCH (TAD)	45
2.3.2 DIMENSIONADO DE TANQUES	50
DIMENSIONADO DE TANQUE DE CALENTAMIENTO DE ACEITE DE COCO.....	51
DIMENSIONADO DE TANQUE DE ABASTECIMIENTO DE NAOH.....	51
DIMENSIONADO DE TANQUES DE TRATAMIENTO DE ACEITE DE OLIVA	51
2.3.3 CÁLCULOS DE INTERCAMBIO CALÓRICO.....	52
2.3.4 LAYOUT DE LA PLANTA.....	54
2.3.5 DETERMINACIÓN DE LA INVERSIÓN INICIAL	54
COSTO DE LOS EQUIPOS	55
COSTO CIF Y ACTUALIZACIÓN DE PRECIOS	55
COSTOS ASOCIADOS	56

CAPÍTULO 3: SUSTENTABILIDAD Y CONCLUSIONES.....	58
3.1 PLANTAS SUSTENTABLES SEGÚN NORMAS ISO	58
3.2 CONCLUSIÓN.....	58
REFERENCIAS:	60

PRÓLOGO

Con el objetivo de ofrecer una visión completa de los fundamentos químicos, los métodos de fabricación y los procesos involucrados en la creación de jabones, así como el diseño de los equipos necesarios para su producción a escala industrial, es que este trabajo se ha estructurado de la siguiente forma:

Capítulo 1: Establece el marco teórico esencial para comprender los componentes básicos que participan en la elaboración del jabón. Se presentan los principios químicos que originan los procesos de saponificación. Asimismo, se profundiza respecto a los métodos de obtención del jabón saponificado, explorando tanto los procesos tradicionales como los más avanzados empleados en la industria, destacando las particularidades, ventajas y desventajas de cada uno.

Capítulo 2: Se presenta, en una primera parte, la formulación del producto; en una segunda parte, el diseño del proceso productivo con la elección de los equipos utilizados para cada etapa y los parámetros de proceso determinados. En una última instancia se realizan los cálculos y el dimensionado de los principales equipos involucrados, además del costo de capital fijo del proyecto.

Capítulo 3: Se hace una breve descripción sobre los criterios que definen la sustentabilidad de una planta industrial según la normativa ISO. Se realiza una breve conclusión sobre por qué la planta diseñada cumple con los criterios principales de sustentabilidad y los objetivos planteados para el producto formulado.

Este estudio no solo proporciona un enfoque teórico sobre la química del jabón y sus procesos de fabricación, sino que también ofrece una guía práctica para la implementación de estos conocimientos en la producción industrial a baja escala.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

1.1 CONCEPTOS BÁSICOS

1.1.1 ¿QUÉ ES EL JABÓN?

Se trata de un agente limpiador o detergente que se fabrica utilizando grasas y/o aceites.

El jabón es soluble en agua y, por sus propiedades detergentes, se usa comúnmente en productos destinados a la higiene personal y para limpieza. Normalmente se presenta en forma sólida, líquida, en polvo o en crema, dependiendo de su estado y contenido de agua. La forma sólida es el jabón "seco" sin agregado de agua, mientras que la forma líquida es el jabón "disuelto" en agua ⁽¹³⁾.

1.1.2 MECANISMO DE LIMPIEZA DEL JABÓN

El desafío al lavar está en el aceite que forma parte de la suciedad. El agua por sí sola no puede disolver estas sustancias hidrofóbicas. La adición de jabón cambia esta dinámica: los extremos no polares de las moléculas de jabón se integran en las gotas de aceite, mientras que los grupos carboxilato se orientan hacia la capa acuosa circundante (ver Figura 5) ⁽¹³⁾.

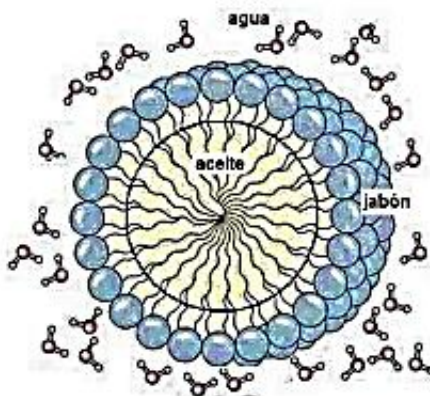


Figura 5. Micela de jabón con la gota de aceite en su interior ⁽¹³⁾.

La repulsión entre cargas de igual signo impide que las gotas de aceite se fusionen, lo que da lugar a la formación de una emulsión estable de aceite y agua que puede ser eliminada de la superficie que se está limpiando. Esta capacidad para emulsionar, y por lo tanto para limpiar, no es exclusiva de las sales de ácidos carboxílicos, sino que también es característica de otras moléculas anfipáticas ⁽¹³⁾.

1.1.3 TIPOS DE JABONES

JABONES SÓLIDOS CONVENCIONALES

Son el tipo de jabón más tradicional. Se presentan en forma de barra sólida. Se producen mediante la saponificación de aceites o grasas con sosa cáustica ⁽³⁾.

JABONES LÍQUIDOS

Son más modernos y, como el nombre lo indica, se encuentran en estado líquido. Este tipo de jabón suele elaborarse con hidróxido de potasio en vez de soda cáustica y suelen incluir en su formulación detergentes sintéticos, además de otros ingredientes que aseguran la estabilidad de la emulsión y evitan que se solidifique ⁽³⁾.

JABONES SÓLIDOS TRANSPARENTES

Se distinguen por su alta claridad óptica, lo que permite ver a través de ellos. Estos jabones se fabrican con agregado de alcohol etílico caliente o trietanolamina. Estas barras transparentes están compuestas por una mezcla de jabón y disolventes como alcohol, glicerina o resinas, y su proceso de fabricación es complejo y costoso ⁽³⁾.

JABONES SÓLIDOS TRANSLÚCIDOS

Permiten el paso de algo de luz, pero no son completamente transparentes. Se obtienen utilizando jabones molidos con altos niveles de agua (20-30%) y sin agentes blanqueadores que los opaquen. La translucidez se logra combinando solventes como la glicerina. Estos jabones translúcidos pueden fabricarse en equipos convencionales para la producción de jabón, lo que permite producirlos a un costo más bajo que los jabones completamente transparentes ⁽³⁾.

JABONES SIN JABÓN SYNDET BARS Y COMBO BARS

El jabón tradicional presenta desventajas como un pH alcalino (10–11), que puede alterar el manto ácido de la piel, y una menor eficacia en agua dura (algo que se explicará más adelante). Los detergentes sintéticos (*syndets*), en cambio, tienen un pH más bajo (5,5–7), similar al de la piel, lo que los hace más suaves y adecuados para pieles sensibles o productos cosméticos. Los *syndets* se utilizan en jabones sin jabón, también llamados barras sin álcali. Además, existen las *combo bars*, que combinan jabón tradicional con surfactantes sintéticos. Estas barras mixtas mejoran la eficacia limpiadora del jabón y reducen su pH, haciéndolas más suaves que el jabón puro, aunque no tanto como los *syndets* puros ⁽³⁾.

JABON SUPERFATADO

En algunos jabones comerciales, se incluyen ácidos grasos libres en exceso, conocidos como “jabones superfatados”. Inicialmente, esta práctica se realizaba para prevenir residuos de soda cáustica no neutralizada, pero también contribuye a mejorar la formación de una espuma densa y rica. Los ácidos grasos interactúan con el jabón, formando complejos sólidos que pueden afectar la estructura y las propiedades del jabón. Sin embargo, la estabilidad de estos complejos depende de la preparación del producto, y no siempre se alcanza un equilibrio termodinámico ⁽³⁾.

A lo largo de esta tesis se realizará la formulación y el diseño del proceso productivo para un jabón de tipo sólido tradicional (es decir obtenido por el proceso de saponificación) y del tipo superfatado.

1.1.4 PROPIEDADES DE UN JABÓN SÓLIDO

Las propiedades de un jabón sólido son: acondicionado, limpieza, burbujas, persistencia, dureza, solubilidad, secado y ph. Las mismas (en el caso de un jabón obtenido por saponificación) van a depender de los aceites o grasas utilizados en la formulación, además de las concentraciones de superfatado (en caso de existir) y de las concentraciones y del tipo de base utilizada⁽³⁾.

- **ACONDICIONADO:** Es la capacidad que tiene el jabón de suavizar y nutrir la piel. La proporcionan principalmente los ácidos linoleico, oleico, ricinoleico, gadoleico y erúxico. En menor cantidad ácidos saturados como el palmítico. Esta es una propiedad inversamente proporcional a la limpieza ⁽¹⁵⁾.
- **LIMPIEZA:** Esta propiedad es proporcionada por ácidos grasos como el caprílico, láurico y mirístico. Es importante destacar que un jabón bien formulado debe limpiar de manera eficaz, pero también segura; es decir, que debe respetar el equilibrio de la barrera cutánea ⁽¹⁵⁾.
- **BURBUJAS:** Las proporcionan los ácidos caprílicos, láurico, mirístico y el oleico en menor medida. Las mismas contribuyen a la sensación sensorial y distribución del jabón. Los ingredientes como la glicerina pueden ayudar a estabilizar las burbujas, mientras que factores como la agitación, la concentración de jabón, y el tipo de agua utilizada influyen en su cantidad y duración ⁽¹⁵⁾.
- **PERSISTENCIA:** Se refiere a la duración o estabilidad de las burbujas una vez formadas. El ácido palmítico y el ácido esteárico son ácidos grasos saturados que contribuyen a la formación y estabilidad de la espuma en los jabones ⁽¹⁵⁾.
- **DUREZA:** Hace referencia a su consistencia sólida y a qué tan fácilmente se desgasta o desintegra durante su uso. Este término es importante cuando hablamos de jabón sólido, ya que influye en la durabilidad del producto y su manejo. Ácidos como el palmítico y el esteárico y, en menor proporción, el linoleico, oleico y ricinoleico aportan al jabón una mayor dureza ⁽¹⁵⁾.
- **SOLUBILIDAD:** Se refiere a la habilidad del jabón para descomponerse y dispersarse en el agua, formando una solución o mezcla homogénea que permite su acción limpiadora. Esta propiedad depende de varios factores, como su composición química, el tipo de agua (dura o blanda), la temperatura, la concentración del jabón y los aditivos presentes en su formulación ⁽¹⁵⁾.
- **SECADO:** El secado de un jabón se refiere al proceso mediante el cual el agua contenida en el jabón se evapora, resultando en un producto más duro y concentrado. Este proceso es fundamental, ya que mejora la durabilidad y la calidad del producto final. Si el contenido de agua es demasiado bajo, el jabón tenderá a resquebrajarse (fenómeno conocido en jabonería como *cracking*). Por el contrario, si el contenido de agua es demasiado alto, el jabón puede volverse viscoso con el uso ⁽¹⁵⁾.
- **PH DEL JABÓN:** “Los jabones convencionales neutralizados con álcali cáustico (hidróxido de sodio) tienen un pH alcalino entre 10 y 11 (como Lux, Palmolive, Camay o Ivory), o entre 8,5 y 10 cuando se neutralizan parcialmente con álcali más suave, como aminos de trietanolamina (por ejemplo, Neutrogena). Las *combo bars* populares tienen un pH entre 8,5 y 10 cuando el principal agente limpiador es jabón (como Lever

2000, Zest, Nivea Milk Bar o Satina) o incluso tan bajo como pH 7,5 cuando se incorpora solo una pequeña cantidad de jabón (como Dove, Caress o Olay)”⁽³⁾.

La evaluación de las propiedades de estos productos es un proceso complejo, ya que depende de los métodos de prueba utilizados, los cuales deben estar estandarizados. Para obtener una medición objetiva, se recurre a paneles de personas, que incluyen desde expertos hasta consumidores comunes, para valorar las propiedades del producto⁽³⁾.

1.2 LA QUÍMICA DEL JABÓN

Para comprender cómo se fabrican los jabones es que debemos adentrarnos en la química del jabón, comprender los conceptos esenciales y el mecanismo de reacción.

1.2.1 LÍPIDOS

El término 'lípidos' abarca una gran variedad de compuestos orgánicos con estructuras muy diversas, de origen biológico, solubles en disolventes orgánicos (como cloroformo, benceno, entre otros) y casi insolubles o completamente insolubles en agua. Lo que tienen en común es que la porción principal de su estructura es de naturaleza hidrocarbonada. Los lípidos incluyen una amplia variedad de tipos estructurales, como ácidos grasos, triacilgliceroles (o grasas neutras), fosfolípidos, glicolípidos, terpenos, esteroides, entre otros⁽²⁾.

1.2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS LÍPIDOS

Debido a la gran diversidad estructural de los lípidos, ha resultado difícil establecer una clasificación sistemática de los mismos. Sin embargo, en la actualidad existen varias formas de clasificarlos, basadas principalmente en las propiedades físicas y químicas que los definen. Una de las formas de clasificación se basa en su capacidad para generar jabones a través de una reacción de hidrólisis, utilizando hidróxido de potasio o sodio para producir sales de ácidos grasos (saponificación), lo que da lugar a dos grupos principales⁽²⁾:

- Lípidos saponificables
- Lípidos insaponificables

1.2.3 ÁCIDOS GRASOS

Los ácidos grasos son los componentes básicos estructurales de grupos más complejos tales como grasas y aceites, Glicerofosfolípidos o fosfoglicéridos, Esfingolípidos, ceras y eicosanoides. Están formados por una cadena hidrocarbonada larga unida a un grupo funcional carboxilo al extremo de la molécula (ver figura 1).

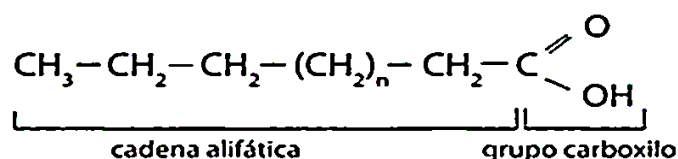


Figura 1. Estructura básica de los ácidos grasos⁽²⁾

Las diferencias estructurales entre las moléculas de ácidos grasos se deben, por una parte, al número total de carbonos y a la disposición espacial de sus cadenas hidrocarbonadas y en función de la presencia o no de dobles enlaces en la cadena hidrocarbonada clasificándose, según este último criterio, en:

1. Ácidos grasos saturados que se caracterizan por:

- Presentan solo enlaces simples C-C.
- Son muy poco reactivos.
- La libre rotación de los sustituyentes alrededor de los enlaces sencillos proporciona una gran flexibilidad a la cadena, siendo la conformación más estable aquella en la que dicha cadena se encuentra lo más extendida posible, minimizando así las interacciones repulsivas entre átomos vecinos.

Ejemplos: palmítico (palma), butírico (leche), laúrico (aceite de coco) ⁽²⁾.

2. Ácidos insaturados, que se caracterizan por:

- Presentan entre 1 y 6 dobles enlaces, C=C.
- La presencia de dobles enlaces impide la libre rotación obligando a la molécula a un giro de la cadena del hidrocarburo haciendo disminuir de esta manera la fuerza de Van der Waals y como consecuencia su punto de fusión disminuye.

Ejemplos: ácido linoleíco (en aceites de maíz, algodón, sorgo y soya), ácido araquidónico ⁽²⁾.

1.1.4 ACILGLICEROLES, GRASAS Y ACEITES

Los acilglicerolos son ésteres formados por la combinación de ácidos grasos con un compuesto llamado 1,2,3-propanotriol, que también se conoce como glicerol o glicerina. Como el glicerol tiene tres sitios donde pueden unirse los ácidos grasos, se pueden clasificar en tres tipos (ver figura 2) ⁽²⁾:

1. **Monoacilglicerolos (o monoglicéridos):** tienen un solo ácido graso unido.
2. **Diacilglicerolos (o diglicéridos):** tienen dos ácidos grasos unidos.
3. **Triacilglicerolos (o triglicéridos):** tienen tres ácidos grasos unidos.

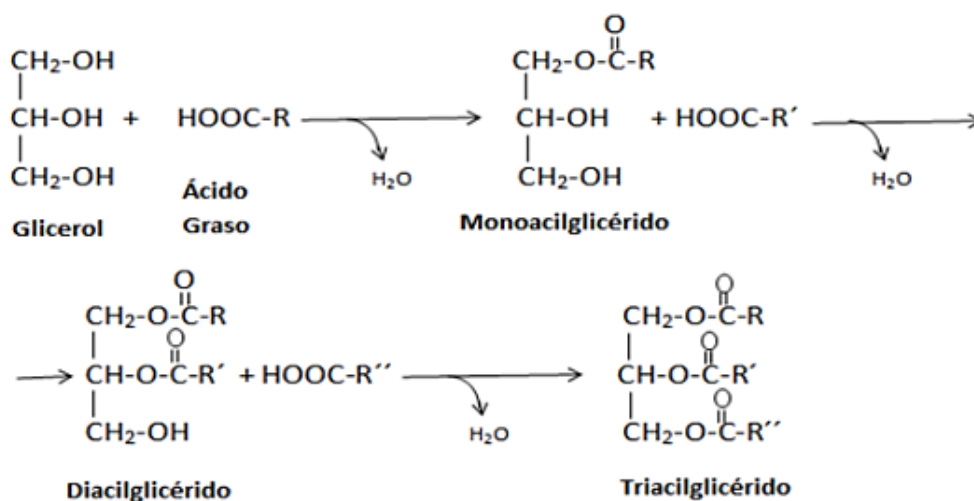


Figura 2. Estructuras de los mono-, di- y triacilgliceridos ⁽²⁾.

Desde el punto de vista químico, las grasas se encuentran dentro del grupo de triacilgliceroles o triglicéridos⁽²⁾.

A su vez, se conoce como aceites a estos tipos de lípidos que se encuentran en estado líquido a temperatura ambiente. Estos están formados por ácidos grasos en su mayoría insaturados, y tienen un punto de fusión bajo. Mientras que, los que se encuentran en estado sólido a temperatura ambiente se conocen como grasas. Estos están compuestos principalmente de ácidos grasos saturados, que tienen un punto de fusión más alto. Es por ello que la hidrogenación de un aceite, donde se satura algunos o todos los dobles enlaces presentes, produce una grasa semisólida o sólida. ⁽¹³⁾

Las cadenas alquilo R, R' y R'' en la molécula de triglicérido del aceite o grasa incluyen tanto tipos de ácidos grasos saturados como insaturados, de diferentes longitudes de cadena de átomos de carbono (números de carbono), por ejemplo, como se ve en la figura 3:

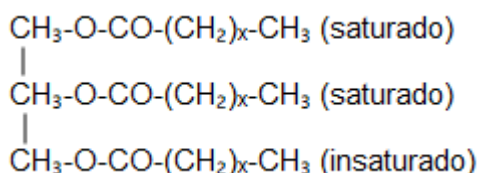


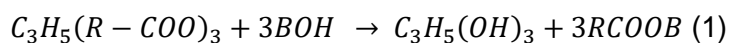
Figura 3. Triglicérido con dos cadenas de ácidos grasos saturados y una de ácido graso insaturado ⁽¹³⁾.

Varias combinaciones diferentes de saturación/insaturación y longitud de cadena son posibles en una misma columna vertebral de glicerina, dando aceites con características muy variadas. Para los jabones, los factores más importantes son las proporciones relativas de ácidos grasos saturados e insaturados (medidas por el valor de yodo, los gramos de yodo que reaccionan con el componente insaturado en 100 gramos de aceite o grasa) y las longitudes de las cadenas de ácidos grasos (número de carbono) ⁽³⁾.

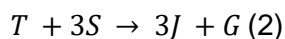
Las grasas y aceites pueden contener también otros compuestos como fosfoglicéridos, ceras y esteroides en una proporción mucho menor ⁽³⁾.

1.2.5 MECANISMO DE OBTENCIÓN DE UN JABÓN CONVENCIONAL: PROCESO DE SAPONIFICACIÓN

Químicamente, el jabón es la sal sódica o potásica de un ácido graso, que se obtiene mediante la hidrólisis alcalina de los ésteres contenidos en los materiales grasos. Si una grasa se escinde con un álcali en lugar de con agua, se obtienen glicerina y una sal o jabón del metal alcalino con el ácido graso. Tal y como se ve en la ecuación 1. Esta reacción se llama saponificación y es la base de la industria del jabón ⁽³⁾.



Lo que se puede escribir como se ve en la ecuación 2:



Donde:

T = Triglicérido contenido en el aceite o grasa.

S = Es la base utilizada (BOH) que puede ser NaOH o KOH.

J = Es la molécula de jabón obtenida de la reacción.

G = Es la molécula de glicerol obtenido de la reacción.

Aunque la reacción puede parecer simple, es una reacción escalonada, donde un mol de base (BOH) reacciona con el triglicérido de grasa/aceite para formar un diglicérido, liberando un mol de jabón. El diglicérido luego reacciona con otro mol de base para formar el monoglicérido, liberando otro mol de jabón sódico. El paso final es el monoglicérido reaccionando con el tercer mol de base para formar la glicerina y un mol final de jabón ⁽¹⁴⁾.

La reacción de saponificación es exotérmica, liberando 60 cal/mol de grasa/aceite reaccionado ⁽³⁾.

Los álcalis más usados en la saponificación son el hidróxido de sodio (sosa cáustica) y el de potasio (potasa cáustica), obteniendo así los correspondientes jabones de sodio o de potasio. Si la saponificación se efectúa con sosa, se obtendrán los jabones de sodio (jabones duros), que son sólidos y ampliamente usados en el hogar. En caso de hacerlo con potasa, se obtendrán jabones de potasio (jabones blandos), de consistencia líquida ⁽⁶⁾ (ver figura 4).

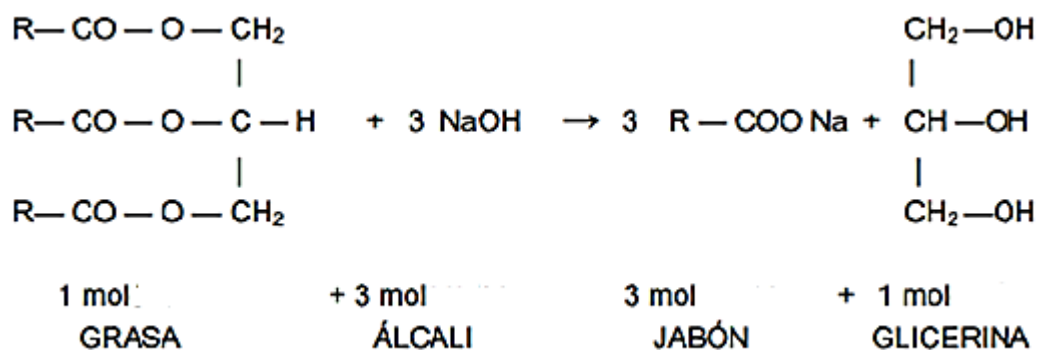


Figura 4. Reacción química, saponificación utilizando hidróxido de sodio ⁽⁶⁾.

El agua es necesaria en la reacción, ya que actúa como medio para que reaccionen el triglicérido y el álcali. El TAG puede ser de origen vegetal o animal, y puede encontrarse en estado sólido o líquido. Algunos ejemplos son el sebo, la manteca de cerdo, el aceite de coco o el aceite de oliva ⁽⁶⁾.

En cuanto a la calidad del jabón, la elección de los aceites influye directamente en su estructura y propiedades, como la capacidad de limpieza, la dureza, la estabilidad de la espuma y la sensación en la piel. Por ejemplo: el aceite de coco produce un jabón cremoso pero firme, con una espuma agradable. Su principal desventaja es que puede reseca la piel. En cambio, el aceite de oliva

da lugar a un jabón firme y de gran calidad, con una espuma suave y abundante que aporta suavidad e hidratación a la piel ⁽³⁾.

A su vez, suele adicionarse al jabón componentes emolientes, humectantes, fragancias u otros aditivos con el objetivo de mejorar su calidad y la experiencia sensorial del usuario. Es importante incorporar estos ingredientes en proporciones adecuadas, para evitar que el jabón pierda estabilidad, se vuelva demasiado blando o disminuya su capacidad de generar espuma o limpiar eficazmente ⁽³⁾.

1.2.6 CINÉTICA DE REACCIÓN

El mecanismo fisicoquímico de la reacción de aceite vegetal con sosa resulta complejo debido a varios factores:

1. El aceite vegetal es una mezcla compuesta por una amplia variedad de sustancias. Su fracción principal está formada por triacilglicéridos (T), así como también pequeñas cantidades de diglicéridos (D), monoglicéridos (M), agua (I) y trazas de otras sustancias como pigmentos y gomas ⁽¹⁴⁾.
2. Exceptuando la reacción principal —la saponificación de los triacilglicéridos—, las demás sustancias presentes en la mezcla pueden participar en diversas reacciones secundarias, distintas a la reacción de interés ⁽¹⁴⁾.

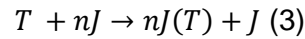
La saponificación de aceites vegetales involucra una serie de reacciones simultáneas que tienen lugar en fase líquida, lo cual añade mayor complejidad al sistema. Suponiendo que:

- Se considera exclusivamente la hidrólisis alcalina de los triacilglicéridos presentes en la mezcla de aceites vegetales como la reacción principal del sistema ⁽¹⁴⁾.
- Se asume que todos los isómeros presentes —incluidos los isómeros *cis*, *trans* y demás estereoisómeros— siguen la misma ley de velocidad y comparten un mecanismo de reacción común ⁽¹⁴⁾.
- No hay diglicéridos ni monoglicéridos en la mezcla reaccionante ⁽¹⁴⁾.
- Irreversibilidad de la reacción, lo cual se fundamenta en el impedimento estérico que dificulta la reacción inversa, así como en la estabilización por resonancia del anión carboxilato formado, el cual muestra una baja reactividad frente al glicerol (alcohol) ⁽¹⁴⁾.
- Se asume que la reacción transcurre en condiciones constantes de volumen (isocórica), temperatura (isotérmica) y presión (isobárica), siendo esta última equivalente a una presión atmosférica de aproximadamente 630 mm Hg ⁽¹⁴⁾.

Podemos decir que la saponificación de triacilglicéridos es una reacción no elemental, de alto grado de complejidad y de comportamiento dual, en la cual participan dos cinéticas; una comprendida en su inicio desde un punto de vista autocatalítico con bajas conversiones y la otra caracterizada por una tendencia bimolecular que abarca la mayor conversión de la grasa en el proceso ⁽¹⁴⁾.

Fase autocatalítica

En esta fase se desarrolla una emulsión que mejora el contacto entre las fases acuosa y oleosa. La ecuación 3 describe el comportamiento de dichas reacciones:



Donde:

T = Triglicérido

nJ = Moléculas de jabón disponibles para la formación de micelas.

$nJ(T)$ = Micelas de jabón (emulsificación).

J = Jabón libre ⁽¹⁴⁾.

La ecuación de cinética que rige este mecanismo es la siguiente (ver ecuación 4):

$$-r_t = K_A T nJ \quad (4)$$

Fase bimolecular

La fase bimolecular está descrita por el siguiente mecanismo:

$T + S \rightarrow J + \text{diglicérido}$ Etapa lenta con una constante de velocidad K_2

$T + S \rightarrow J + \text{monoglicérido}$ Etapa rápida con una constante de velocidad K_3

$T + S \rightarrow J + G$ Etapa rápida con una constante de velocidad K_4 . ⁽¹⁴⁾

Dado que la etapa determinante de la velocidad está dada por la fase lenta de reacción, de reacción está dada por la siguiente ecuación 5:

$$-r_T = K_2 S T \quad (5)$$

Para una saponificación de aceite de palma con NaOH, cuando la saponificación de grasas ocurre a temperaturas por debajo de los 100 °C, se observa el siguiente comportamiento: comienza con una etapa de baja conversión, que alcanza hasta un 7%, dominada por una reacción autocatalítica. A continuación, hay una fase de transición, entre el 7% y el 18% de conversión, donde ocurren reacciones competitivas con velocidades relativamente bajas. Después, se pasa a una etapa con velocidades elevadas y una conversión que va del 18% hasta el 95%, donde predomina un comportamiento típico de una reacción bimolecular. Como es habitual en estos procesos, la velocidad disminuye hacia el final de la reacción ⁽¹⁴⁾ (Ver figura 5).

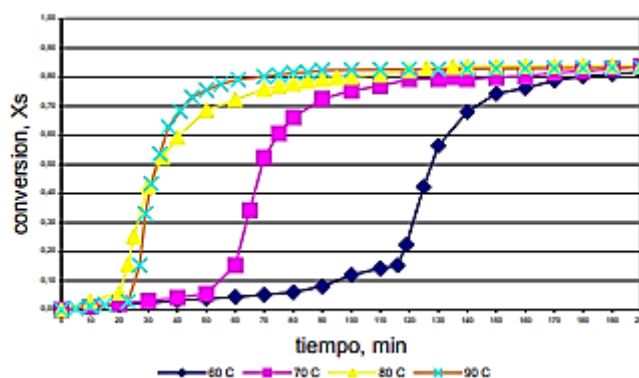


Figura 5. Conversión NaOH vs. Temperatura ⁽¹⁴⁾.

A su vez, al someter la reacción con un exceso de grasa en proporción molar de NaOH (aproximada de 1:2), no se evidencia la presencia de la fase inicial autocatalítica ni la fase intermedia de reacciones competitivas, por lo que los datos se correlacionan en un alto nivel de confiabilidad con el mecanismo bimolecular propuesto, donde la constante cinética de velocidad obtenida para 80 °C es igual a $K_2 = 0,0234 \text{ L/mol}\cdot\text{min}$ ⁽¹⁴⁾.

En este caso, el efecto autocatalítico es mucho menos representativo que los choques intermoleculares del NaOH con la grasa, es decir, la cinética bimolecular es favorecida por efectos de la teoría de colisiones sobre la cinética autocatalítica ⁽¹⁴⁾.

FACTORES CRÍTICOS EN LA REACCIÓN

Para alcanzar una saponificación completa, el diseño de los sistemas de reacción debe considerar los siguientes aspectos esenciales:

- Mezcla y agitación: Es fundamental lograr un contacto estrecho entre ambas fases para formar una emulsión homogénea, lo que acelera la etapa inicial de la reacción y favorece su progreso en la fase final. Para que la reacción química se lleve a cabo correctamente, es imprescindible que los dos componentes se mezclen de forma uniforme. Dado que el aceite tiene menor densidad, tiende a separarse y flotar sobre la disolución de hidróxido de sodio, más densa que el agua. Por eso, la forma de las palas del agitador es crucial. Se debe garantizar un movimiento axial eficiente de los fluidos para facilitar la mezcla adecuada ⁽⁵⁾.
- Temperatura: En general, la velocidad de reacción de la saponificación se duplica con cada aumento de 10 °C. En los sistemas de saponificación continua se trabaja a temperaturas entre 120 °C y 140 °C, lo que permite obtener tiempos de reacción más rápidos. En los sistemas por lote (batch), la temperatura se mantiene entre 80 °C y 100 °C, ya que un exceso podría descomponer los TAG. Dado que la reacción es irreversible, esto afectaría negativamente al producto final ⁽⁵⁾.
- Composición de electrolitos: La concentración adecuada de electrolitos es clave para obtener la fase de jabón deseada. Un exceso de electrolitos puede ralentizar la reacción al formar un grano de jabón más duro ⁽³⁾.

- Tiempo de residencia: Es necesario garantizar un tiempo de residencia adecuado para que la reacción se complete de manera eficiente. Si los factores anteriores se controlan correctamente, un tiempo de residencia de entre 10 y 15 minutos es suficiente en un sistema continuo. En un proceso batch, debido a los tiempos de calentamiento, enfriamiento y reacción más prolongados, el tiempo de residencia suele ser mayor ⁽³⁾.

1.2.7 ÍNDICE DE SAPONIFICACIÓN

Se define el índice de saponificación de una grasa como el número que indica la cantidad en miligramos de hidróxido potásico (KOH) necesaria para saponificar por completo un gramo de esa grasa en concreto. El mismo se obtiene calentando la muestra de grasa con KOH en solución alcohólica durante 30 a 60 minutos. Completada la reacción, el exceso de KOH se titula con ácido clorhídrico 0,5 N. Con el cálculo adecuado, la diferencia entre las titulaciones del blanco y la muestra se informa como el valor de saponificación ⁽⁶⁾.

Con hidróxido de potasio se elaboran jabones líquidos, y con hidróxido de sodio (NaOH) se obtienen jabones sólidos. Por lo tanto, para la fabricación de jabón sólido es necesario transformar el índice de saponificación de cada grasa en otro tipo de índice alternativo que esté expresado en peso de hidróxido de sodio (ver ecuación 6). Para ello, basta con multiplicar el índice de saponificación de cada grasa concreta por la masa molar del hidróxido sódico (utilizado para la obtención de jabón sólido) y dividir por la masa molar del hidróxido potásico (utilizado para la obtención del jabón líquido) ⁽⁶⁾.

$$\text{Índice saponificación NaOH} = \text{Índice saponificación KOH} \times \frac{\text{masa molar NaOH}}{\text{masa molar KOH}} \quad (6)$$

Siendo la masa molar de NaOH 40 g/mol y la de KOH 56,11g/mol. Por lo que la ecuación 6 quedaría como se ve en la ecuación 7:

$$\text{Índice saponificación NaOH} = \text{Índice saponificación KOH} \times \frac{40}{56,11} \quad (7)$$

1.2.8 INDICE DE YODO

El índice de yodo es definido como los gramos de yodo que reaccionan con 100 gramos del aceite o sustancia elegido. El mismo muestra la facilidad de enranciamiento del aceite o grasa siendo más probable de que se estropee cuanto mayor sea el valor obtenido ⁽⁶⁾.

1.2.9 INS O INDICE DE ESTER

El valor INS, o también denominado índice de éster, se obtiene como resultado de la diferencia entre el índice de saponificación multiplicado por 1000 y el índice de yodo. Se trata de un valor orientativo y debe situarse entre 125 y 170. Para jabones de baño, se recomiendan factores I.N.S de 160 a 170⁽⁹⁾.

1.3 PROCESO DE OBTENCIÓN

La elaboración y formulación de jabones se puede realizar mediante dos procesos principales:

PROCESO EN CALIENTE

Este proceso implica calentar la mezcla de grasas y aceites con la solución de base o álcali en un rango de temperaturas que va desde los 40 °C hasta los 100 °C durante varios minutos, hasta que se complete la reacción de saponificación (ver tabla 1).

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none">• El jabón alcanza un pH estable en un tiempo más corto.• El jabón alcanza su peso ideal rápidamente.• Dependiendo de la temperatura utilizada, un jabón fabricado mediante el proceso en caliente está listo para usarse en menos tiempo.• Los principios activos, como aceites esenciales y fragancias, no se ven alterados, ya que no queda sosa residual. ⁽⁶⁾	<ul style="list-style-type: none">• El jabón resultante tiende a tener una apariencia más rústica, ya que la masa es menos manejable.• El jabón producido es menos cremoso.• Los componentes de los aceites utilizados en la saponificación (excepto los aditivos) pueden degradarse debido a la acción del calor. ⁽⁶⁾

Tabla 1. Ventajas y desventajas del proceso en caliente.

PROCESO EN FRÍO

Este método se basa únicamente en el calor generado por la reacción química entre los ácidos grasos y el álcali para producir jabón. No se aplica calor adicional una vez que los ingredientes han sido mezclados (ver tabla 2).

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none">• El jabón es más moldeable y fácil de manejar.• Permite una mayor creatividad, ya que se pueden utilizar diferentes colores y formas.• Los componentes de los aceites utilizados en la saponificación (excepto los aditivos) no se degradan. ⁽⁶⁾	<ul style="list-style-type: none">• Requiere un mayor tiempo de curado para que el jabón esté completamente listo.• Queda una mayor cantidad de álcali residual que no reacciona durante el proceso.• Los principios activos, aceites esenciales y fragancias pueden sufrir una degradación parcial debido a la sosa residual presente. ⁽⁶⁾

Tabla 2. Ventajas y desventajas del proceso en frío.

1.3.1 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL JABÓN A NIVEL INDUSTRIAL

HERVIDO DE JABÓN EN CALDERA

En la industria del jabón el proceso más comúnmente utilizado para su obtención es el proceso en caliente. Las grasas se saponifican en una solución de hidróxido sódico en una caldera abierta, que tiene en el fondo tubos de vapor cerrados, para el calentamiento indirecto, y otros abiertos para un calentamiento directo, pasando el vapor a una velocidad adecuada para mantener la agitación y la ebullición. Cuando la reacción ha sido completada, se añade sal con lo que se separan gruesos coágulos de jabón de la lejía (compuesta por glicerina, agua, NaCl y NaOH). La lejía, se elimina y lleva consigo algo de jabón remanente (esto es algo que se debe tener en cuenta ya que, al descender la temperatura, el jabón puede precipitar y generar obstrucciones en los tanques de almacenamiento de lejía). A su vez, esa lejía puede ser reutilizada para el siguiente batch o se la puede destinar a un sistema de separación para separar la glicerina y venderla como subproducto ⁽³⁾.

El jabón crudo remanente, contiene glicerina, álcali y sal y, para separar estas impurezas, se hierve con suficiente cantidad de agua para que se forme un líquido homogéneo, volviendo a precipitar el jabón por adición de sal. Este proceso puede repetirse, para recuperar totalmente la glicerina y eliminar las impurezas (aunque la eficiencia disminuye luego del segundo lavado). Finalmente, se hierve con agua suficiente para que se forme una mezcla blanda de la que, dejándola en reposo, se separa arriba una capa homogénea del llamado jabón de caldera, producto que contiene un 69-70% de jabón, 0,2-0,5% de sal y alrededor de un 30% de agua ⁽³⁾. Parte de este producto se vende como tal, y otra parte tras adicionarse perfume y colorante se destina a usos domésticos ⁽³⁾.

En este proceso, se genera un jabón limpio con baja cantidad de glicerina (<3%), un asiento, y lejía gastada con un 15% o más de glicerina. el jabón limpio se separa del asiento durante un período de 24 a 96 horas⁽³⁾. Este ajuste es difícil de lograr y deja abierta la posibilidad de que no se disponga de un jabón limpio aceptable después del período de asentamiento prescrito, lo que provoca interrupciones en el proceso y una considerable cantidad de retrabajo⁽³⁾.

Para asegurar un funcionamiento adecuado en todas las líneas de producción, el proceso de ebullición completa requiere una cantidad significativa de equipos y una amplia superficie de trabajo. Estos factores aumentan considerablemente las inversiones iniciales, lo que hace que este tipo de proceso solo sea rentable cuando se planea producir grandes volúmenes de jabón de alta calidad. El proceso de ebullición completa también permite la recuperación de la glicerina como subproducto. No obstante, se estima que es necesario procesar entre 1 y 2 toneladas de grasa al día para que la operación sea económicamente viable. Este proceso es altamente flexible y ha demostrado ser muy útil en la industria, ya que posibilita la fabricación de una amplia variedad de jabones, desde los de uso doméstico común hasta los de tocador de alta gama ⁽³⁾.

SISTEMAS CONTINUOS DE SAPONIFICACIÓN Y NEUTRALIZACIÓN

En este proceso, las materias primas se dosifican en el reactor, la columna de lavado y el neutralizador. El jabón que ha reaccionado en el reactor se enfría utilizando sosa gastada reciclada proveniente del separador estático. Al ingresar al separador estático, el jabón y la sosa gastada se separan: el jabón fluye hacia la parte superior del separador, mientras que la sosa gastada se dirige hacia la parte inferior. El jabón que se obtiene del separador estático es tratado en una columna de extracción contracorriente, donde se utiliza sosa de lavado para eliminar la glicerina. Debido a la diferencia de densidades, la sosa de lavado se desplaza hacia la parte inferior de la columna como media sosa gastada, y se recicla al reactor. El jabón, por su parte, sale por la parte superior de la columna de lavado, luego pasa por un proceso de centrifugado para eliminar la sosa de lavado arrastrada. La sosa separada en la centrifugadora se recicla nuevamente a la columna de lavado. Finalmente, el jabón centrifugado se dirige a un neutralizador, donde se ajusta su alcalinidad mediante un agente neutralizante y se incorporan los aditivos necesarios, como antioxidantes (ver figura 6) ⁽⁵⁾.

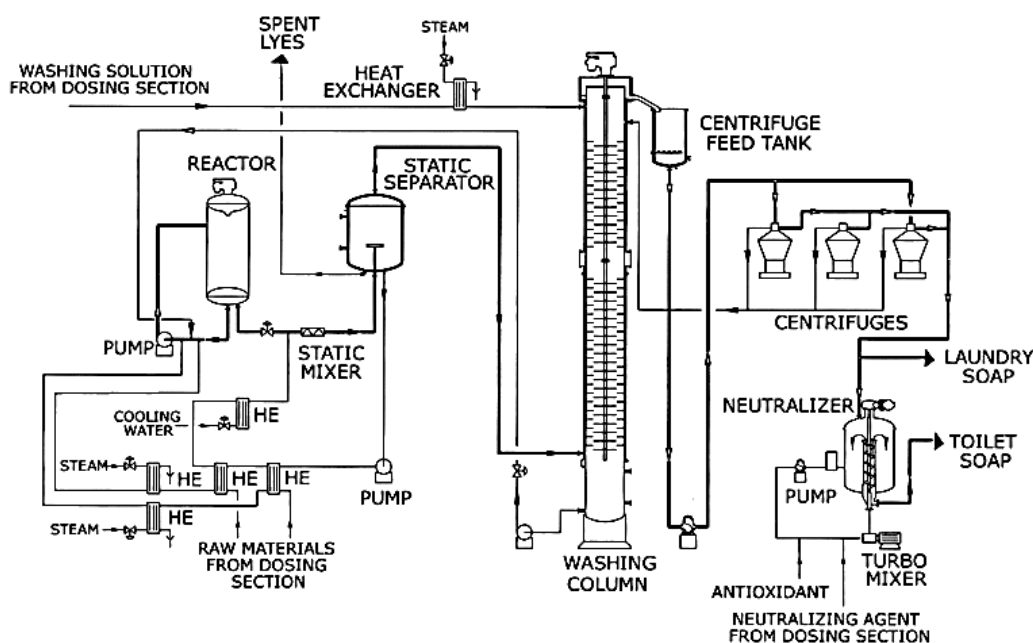


Figura 6. Layout típico de una planta de saponificación continua ⁽⁵⁾.

Neutralización: Reacción en la que se reduce el exceso de NaOH en el jabón terminado y también permite la adición de otros ingredientes como antioxidantes al jabón antes de su almacenamiento (ver ecuación 8)



Esta reacción tiene lugar a una velocidad significativamente mayor que la reacción de saponificación y libera calor (14 cal/mol de ácido graso reaccionado) ⁽³⁾. Este calor generado se aprovecha en el proceso para mantener la temperatura constante dentro del reactor de neutralización.

Cabe aclarar que algunos conceptos de los procesos continuos, tales como el lavado a contracorriente o la separación por centrifugación, pueden ser aplicados en el caso de los procesos discontinuos para acelerar los ciclos de producción (ver tabla 3).

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Aportan rapidez de ciclo de producción. • Permiten ahorrar espacio y energía. • Menor necesidad de personal cualificado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Solo son rentables generalmente para producciones superiores a 1 t/h (>6.000 t/año), lo que necesita una inversión previa importante.

Tabla 3. Ventajas y desventajas de los sistemas continuos de saponificación y neutralización.

SEMI-HERVIDO O "SIN ASIENTO"

La saponificación semi-hervida es un proceso sin eliminación de glicerina que produce "jabón puro" con toda la glicerina contenida en las grasas y aceites iniciales. A diferencia del proceso de saponificación completo o continuo, no requiere pasos de lavado ni neutralización, lo que lo hace más sencillo. Tradicionalmente, este tipo de jabón se usaba para jabones de lavandería, pero ahora también está ganando popularidad para jabones de tocador debido a su simplicidad y ahorro de energía ⁽³⁾.

Este alto nivel de glicerina proporciona considerables cualidades "Nomar", pero a veces da como resultado una base que "suda" y huele mal en condiciones de alta humedad. En este tipo de proceso, la reacción de saponificación se lleva a cabo en un tiempo de más de 90 minutos. Durante ese tiempo, es importante monitorear la alcalinidad libre del producto para ajustar las cantidades de sosa cáustica o grasas/aceites si es necesario. Una vez completada la reacción, el jabón semi-hervido se descarga en un periodo de 20 a 30 minutos ⁽³⁾.

El proceso de semi-ebullición puede llevarse a cabo de manera discontinua, semi continua y continua.

- **Proceso Semi-continuo:** El sistema más comúnmente utilizado para la producción de jabón semi-hervido semi-continuo consta de dos crutchers (tipo de reactor diseñado para facilitar el contacto entre fases), que operan en tándem. En este sistema, mientras un crutcher está saponificando un lote de jabón, el otro está descargando un lote de jabón semi-hervido ya terminado ⁽³⁾.
- **El proceso continuo** se logra al agregar un mezclador de alta cizalladura (turbodispersor) y una bomba de reciclaje al crutcher, convirtiendo así un sistema por lotes en un proceso completamente continuo. El mezclador asegura un buen contacto entre todos los reactivos, y el crutcher, combinado con la bomba de reciclaje, acelera y completa la reacción. Al inyectar una pequeña cantidad de reactivos frescos en una corriente de jabón ya formado, no se produce separación, manteniendo los aceites y la soda cáustica en contacto el tiempo necesario ⁽³⁾.

El proceso descarga de forma continua una tasa nominal de producción mediante materiales frescos que ingresan a través de una tubería de "sifón". En algunos casos, especialmente cuando no hay almacenamiento intermedio antes del secado, el crutcher inicial es seguido por otro llamado "maturador", que asegura la finalización de la reacción al permitir un mayor tiempo de residencia, y también sirve para añadir ingredientes menores en diversas formulaciones de jabón (ver tabla 4).

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • No se genera subproductos, lo que reduce el impacto ambiental asociado con la producción de jabón. • Son más eficientes, en términos de uso de materia prima, ya que todo lo que se introduce al sistema permanece en el producto final ⁽³⁾. 	<p>En términos de la calidad del producto final, el contenido de materia grasa total (TFM) de los jabones semi-hervidos es generalmente menor (58-40%) en comparación con los jabones producidos por métodos completos o continuos (62-63% TFM). El TFM es un indicador clave de la calidad del jabón, y su menor cantidad en los jabones semi-hervidos se debe a la retención de glicerina dentro del producto, lo que también afecta la apariencia y la dureza del jabón terminado.⁽³⁾</p>

Tabla 4. Ventajas y desventajas de un proceso semihervido o "sin asiento".

Teniendo en cuenta que esta tesis busca diseñar una planta de producción de jabón de mediana escala y debido a las ventajas previamente explicadas es que se elige para esta tesis como proceso productivo el de tipo semi-hervido discontinuo, lo que se verá más adelante.

CAPÍTULO 2: FORMULACIÓN, DISEÑO DEL PROCESO PRODUCTIVO Y CÁLCULOS.

2.1 FORMULACIÓN

La formulación de barras de limpieza es un proceso que requiere una combinación de conocimientos científicos y creatividad para elegir los ingredientes correctos. El desafío de los formuladores de jabón no se limita a producir un buen agente limpiador. Hoy en día, la creación de estas barras es más compleja debido a las demandas variadas de los consumidores, influenciadas por factores sociales, económicos y psicológicos. Además, los avances en áreas como la cosmetología, dermatología y tecnología han permitido el desarrollo de productos más sofisticados y multifuncionales ⁽¹⁾.

Se sabe que el desempeño y estructura del jabón está íntimamente relacionado con el equilibrio entre las fases sólida y líquida del producto. Factores como la temperatura, el contenido de agua, electrolitos y aceites en la formulación afectan este equilibrio, lo que determina su dureza o suavidad. A mayor fase líquida, más suave será el jabón. Por ejemplo, un aumento en la temperatura disuelve más jabón sólido, suavizando el producto, mientras que un incremento del contenido de agua (1-2%) también lo ablanda ⁽³⁾.

Los ácidos grasos libres en concentraciones mayores al 5 % suavizan el jabón, ya que alteran la estructura de las micelas hacia una forma más fluida. De manera similar, la glicerina, a concentraciones de hasta el 2 %, ablanda el jabón, pero en mayores concentraciones (más del 6 %) puede endurecerlo al actuar como electrolito adicional. Los minerales y el perfume, a concentraciones moderadas, también afectan la dureza, pero a niveles elevados pueden hacer que el jabón se vuelva más blando debido a la debilidad en la fase sólida ⁽³⁾.

2.1.1 GRASAS Y ACEITES

Para mejorar el rendimiento del jabón, lo mejor es utilizar mezclas de aceites denominados "aceites de nuez" (como el aceite de coco (CNO) o el aceite de palmiste (PKO)) con aceites no de nuez (como las grasas animales (AT o T) o aceites de palma (PO)). Esto, ya que los aceites no de nuez (que contienen ácidos grasos saturados de cadena larga) añaden dureza y estabilidad a la espuma, mientras que los aceites de nuez (que son ricos en ácidos grasos de cadena corta) proporcionan una buena capacidad de hacer espuma. La combinación de ambos aumenta la solubilidad y la capacidad de hacer espuma en jabones, incluso trabajando con temperaturas más bajas ⁽³⁾.

En términos de calidad del jabón, la elección de los aceites influye directamente a la estructura y las propiedades del jabón (capacidad de limpieza, la dureza, la estabilidad de la espuma y la sensación en la piel). Por ejemplo: el Aceite de coco produce una espuma abundante, pero puede ser irritante para la piel si se usa en exceso, el aceite de palma da una gran dureza al jabón y estabiliza la espuma y el aceite de oliva aporta suavidad y humectación, pero genera menos espuma ⁽⁵⁾. Para el caso de estudio se eligió formular un jabón con una proporción de aceites de 80:20, siendo el 80 % de aceite de oliva y un 20 % de aceite de coco.

2.1.2 SODA CÁUSTICA

La soda cáustica se puede conseguir en formato sólido, en forma de perlas al 99 % o en formato líquido en distintas concentraciones. Si se utiliza soda en formato sólido la misma debe ser previamente disuelta en agua (previamente tratada). La soda cáustica que se considera en esta tesis es en formato líquido, diluida al 40 % que se puede obtener en el mercado como materia prima industrial. Utilizamos este formato debido a la facilidad de información respecto a precios de la misma y para no tener que recurrir a tratamientos de agua (algo que se entenderá más adelante).

2.1.3 CONSERVANTES

En la industria del jabón, se ha descubierto que, en sistemas de jabón tradicionales a un pH de 10, los quelantes ofrecen mejor protección que los antioxidantes. Los agentes quelantes más utilizados son el EDTA (ácido etilendiaminotetraacético) y el HEDP (ácido 1-hidroxi-etilidifosfónico) ya que estos secuestran los iones metálicos que catalizan las reacciones de oxidación y, al hacerlo, mejoran la estabilidad del producto y alargan su vida útil por lo que son considerados antioxidantes indirectos ⁽³⁾.

1. EDTA:

El EDTA es un quelante muy versátil y tiene la capacidad de capturar una amplia gama de iones metálicos. Los iones metálicos que más frecuentemente captura el EDTA como ser el Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} y Fe^{3+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Al^{3+} .

2. HEDP:

El HEDP es particularmente eficaz en la prevención de la formación de depósitos de calcio y magnesio (responsables de la dureza del agua), lo que ayuda a evitar la precipitación de sales de calcio que pueden alterar la textura y apariencia del jabón.

Concentración típica: La cantidad de EDTA que se utiliza en la fabricación de jabón suele estar en el rango de 0,05 % a 0,2 % del peso total de la fórmula, mientras que la de HEDP entre 0,01 % a 0,1 % del peso total de la fórmula ⁽³⁾.

Otro conservante utilizado es la vitamina E, que no solo es un antioxidante directo, sino que además aporta beneficios para la piel y se puede utilizar como estrategia de marketing. La vitamina E se incluye principalmente en un rango de concentración del 0,5 al 1 % para maximizar sus efectos antioxidantes y preservar la estabilidad de los aceites en la formulación ⁽¹⁶⁾.

Para los efectos de esta tesis se utilizará un 0,05 % de EDTA y un 0,01 % de HEDP y un 0,5 % de vitamina E en la fórmula.

2.1.4 COLORANTES:

- **Colorantes certificados:**

Son colorantes que deben cumplir con los requisitos regulatorios y son aprobados por autoridades como la FDA para su uso en productos farmacéuticos y cosméticos. Se utilizan principalmente en productos que tienen propiedades medicinales o cosméticas ⁽³⁾.

- **Colorantes no certificables:**

Estos colorantes no requieren certificación oficial, pero son permitidos en productos cosméticos, como jabones. Generalmente se usan en productos que no hacen reclamaciones farmacéuticas ⁽³⁾.

- **Colorantes Naturales:**

Aunque no son colorantes en el sentido estricto, son extractos de plantas que brindan colores brillantes al producto. Se presentan en forma de líquidos y polvos solubles en agua, así como ceras y polvos solubles en aceite ⁽³⁾.

Algunos de los colorantes que se podrían utilizar para el tipo de jabones que se busca formular en esta tesis son (ver tabla 5):

Colorante	Color	Proveniencia	CIN
<i>Betacaroteno</i>	Naranja	Zanahoria o algas	75 1 301/40800
<i>Óxido de hierro</i>	Negro	Mineral	77489
<i>Óxido de hierro</i>	Amarillo	Mineral	77492
<i>Óxido de hierro</i>	Marrón/ Terracota	Mineral	77499
<i>Óxido de hierro</i>	Rojo	Mineral	77491
<i>Óxido de zinc</i>	Blanco	Mineral	77497

Tabla 5. Colorantes naturales y sin restricciones de uso que se podría usar para esta tesis.

CIN: es un sistema de identificación utilizado para clasificar colorantes y pigmentos. Cada colorante tiene asignado un número único, conocido como el Color Index Number, que ayuda a identificar de manera precisa el colorante y su composición. Este sistema es utilizado por la industria para asegurarse de que los productos que se fabrican sean consistentes en cuanto a sus propiedades y regulaciones.

2.1.5 FRAGANCIAS

Se pueden crear casi cualquier tipo de fragancia para ajustarse al perfil del producto y concepto de marketing. Las fragancias deben ser desarrolladas para asegurar su estabilidad y eficacia en la formulación del jabón. Las concentraciones suelen variar, comenzando entre 0,25 y 0,50 % para enmascarar olores, y pueden llegar hasta 34 % para jabones de lujo ⁽³⁾.

Las fragancias elegidas para elaborar los jabones que se pretenden producir en esta tesis son aceites esenciales, ya que estos no solo contribuyen con su aroma, sino que también confieren propiedades beneficiosas para la piel y son productos naturales. Se pretende utilizar en la formulación un 1,5 %. Sin embargo, es necesario aclarar que puede que exista la necesidad de incrementar la concentración de aceites esenciales a modo de asegurar la percepción óptima de la fragancia y persistencia en el producto final.

Algunos de los aceites esenciales que se pueden utilizar y las propiedades que los mismos confieren son las siguientes (Ver tabla 6):

<i>Aceite esencial</i>	<i>Propiedades</i>
<i>Lavanda</i>	Propiedades calmantes, antiinflamatorias, cicatrizantes y antimicrobianas. ⁽⁸⁾
<i>Limón</i>	Propiedades astringentes: Ayuda a reducir los poros dilatados y equilibra la producción de sebo. Propiedades antimicrobianas y antioxidantes. Rico en vitamina C, ayuda a proteger la piel contra el daño de los radicales libres. ⁽⁸⁾
<i>Eucalipto</i>	Propiedades antimicrobianas y antiinflamatorias. Aporta una sensación refrescante, ayudando a reducir la irritación y picazón. ⁽⁸⁾

Tabla 6. Aceites esenciales que se podría usar para esta tesis.

2.1.6 ELECTROLITOS

La adición de electrolitos, como el NaCl, tiene el efecto de aumentar la fase sólida y, por ende, endurece el jabón. A concentraciones de NaCl del 0,5 al 1,0 %, la dureza del jabón puede duplicarse ⁽³⁾. Para el caso de estudio se ha elegido adicionar una proporción de NaCl correspondiente al 1,0 % de la fórmula.

2.1.7 ADITIVOS

Los jabones suelen también incluir aditivos para cumplir funciones específicas o por motivos de marketing. Estos incluyen:

- **Emolientes:** Suavizan la piel.
- **Humectantes:** Retienen la humedad.
- **Hidratantes:** Aportan hidratación.
- **Agentes oclusivos:** Sellan la humedad.

- **Exfoliantes:** Eliminan células muertas.
- **Componentes farmacológicos:** Tienen efectos terapéuticos.
- **Anti-irritantes:** Reducen la irritación.
- **Aceleradores de espuma:** Mejoran la espuma.
- **Otros compuestos:** Ingredientes diversos con efectos variados.

Para los efectos de esta tesis, no se considerará el agregado de aditivo alguno.

2.1.8 PRONÓSTICO DE PROPIEDADES

Para hacer un pronóstico de las propiedades del jabón formulado recurriremos a la calculadora de saponificación de mendrullandia.

La calculadora de saponificación de mendrullandia es una herramienta que utiliza los índices de saponificación para devolver los kg de soda necesaria para saponificar las cantidades y especies de grasas o aceites que se le ha indicado (en las proporciones de superfatado seleccionadas y % de solución de soda cáustica). Además, la misma nos da un pronóstico de las propiedades que tendría el jabón, por lo que sirve para predecir si el jabón formulado será un buen o mal producto.

Para ello, lo primero que debemos definir son las toneladas anuales de producto a producir (1.000 toneladas de jabón en nuestro caso).

Es sabido que, por cuestiones de proceso, de las 1.000 t/año de producto que se desea obtener, se perderán un 15% aproximadamente en la etapa del prensado (algo que se verá más adelante) por lo que se necesitará producir 1.150 t/año para poder cumplir con las toneladas de producción. Despreciando los porcentajes de HEDP Y EDTA (por ser insignificantes frente al resto) podemos obtener las toneladas de jabón neto que se debe producir para cumplir el plan de producción anual (ver tabla 7).

FORMULA	PORCENTAJE	t/año
Jabón neto (con glicerina, humedad entre 15-22% y 1% de NaCl)	97,5%	1.121,25
Colorante	0,5%	5,75
Esencia	1,5%	17,25
Vitamina e	0,5%	5,75
JABÓN BRUTO	100%	1.150

Tabla 7. Aporte porcentual del jabón, colorante, vitamina e y esencia a la fórmula total y su respectiva conversión a toneladas anuales para producir 1.150 toneladas de jabón.

Cabe aclarar que cuando hablamos de jabón neto hacemos referencia al jabón que ya contiene su valor de humedad dentro de los parámetros establecidos (15-22 %), un porcentaje de NaCl de 1% y la glicerina producida en la reacción (ya que el proceso de producción elegido para esta tesis es un proceso semihervido) es decir hacemos referencia al producto final obtenido del reactor.

Una vez conocido este dato, recurriremos a la calculadora de saponificación, en donde especificaremos los aceites elegidos (en sus respectivas proporciones), el porcentaje de superfatado elegido (5%), el uso de NaOH en su formato al 40% en solución (ver figura 7) y obtendremos un pronóstico de las propiedades del jabón (ver figura 8).

Ingredientes	Peso kilos	SAP (KOH)	Grasas	Fórmula	Álcali	info	Borrar
Oliva Virgen, aceite de	659808,455kg	0,192	80,1%	58,9%	86677,155kg	i	-
Coco, aceite de	163952,113kg	0,248	19,9%	14,6%	27819,815kg	i	-
Sal	10997,008kg			1,0%		i	-
+ Nuevo	Suma	834757,576kg	100,0%	74,5%	114496,970kg		+
Opciones de la lejía		Peso		Fórmula		info	
	Agua	171745,455kg		15,3%			
	Sosa cáustica (NaOH)	114496,970kg	Pureza 99%	10,2%			
Yodo 64	INS 139	TOTAL 1121000,000kg		100,0%		i	

Sobreengrasado Concentración

5%
 40%

Figura 7. Datos obtenidos con la calculadora de saponificación ⁽¹⁵⁾.

Pronósticos de la mezcla:						
Acondicionado	Limpieza	Burbujas	Persistencia	Dureza	Solubilidad	Secado
48	52	51	49	49	49	51
Notas:						
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 30%;"> <p>Nueva Resultados de la mezcla: SAP: 0,203, Yodo: 64, INS: 139</p> <p>Pronóstico 0% SE 5% SE</p> <p>Acondicionado: 44,9 48,3</p> <p>Limpieza: 55,2 51,9</p> <p>Burbujas: 52,5 50,6</p> <p>Persistencia: 46,2 48,5</p> <p>Dureza: 50,2 48,7</p> <p>Solubilidad: 48,4 49,0</p> <p>Secado: 52,6 51,3</p> </div> <div style="width: 35%;"> <p>Ácidos grasos: Saturados ≈ 31,4% ≡ Insaturados ≈ 68,5%</p> <ul style="list-style-type: none"> caproico - C6:0 = 0,01% caprílico - C8:0 = 1,39% cáprico - C10:0 = 1,59% láurico - C12:0 = 9,53% mirístico - C14:0 = 3,18% palmitico - C16:0 = 12,70% palmitoleico - C16:1 = 0,60% esteárico - C18:0 = 2,48% oleico - C18:1 = 61,21% linoleico - C18:2 = 5,95% linolénico - C18:3 = 0,40% araquídico - C20:0 = 0,47% gadoleico - C20:1 = 0,34% behénico - C22:0 = 0,08% </div> <div style="width: 30%;"> <p>Etiquetado INCI: Olea europaea oil, aqua, cocos nucifera oil, sodium hydroxide, sodium chloride</p> <p>Otros datos: Peso total grasas: 823,760kg 73,5% de la fórmula. Total lejía requerida: 286,242kg 25,5% de la fórmula. Concentración: 40% Proporción: 1:1,5 Agua: 15,3% de la fórmula. Álcali: 10,2% de la fórmula. Contenido en glicerina ≈ 87,119kg ≈ 7,8% de la fórmula.</p> </div> </div>						

Figura 8. Pronóstico de propiedades del jabón ⁽¹⁵⁾.

Para corroborar que los datos obtenidos con la calculadora sean confiables recurriremos a calcular manualmente el porcentaje de glicerina que se debería obtener (único valor aproximado que devuelve la calculadora). Para ello recurriremos a la ecuación 12 obtenida de la bibliografía adjunta ⁽³⁾:

$$\text{Glicerina \%} = \frac{SV}{1000} \times \frac{92}{168.3} \times 100 \quad (12)$$

Luego:

$$\text{Glicerina \%} = SV \times 0.0547 \quad (13)$$

Se debe además tener en cuenta que en dicha bibliografía, SV es el índice de saponificación encontrándose este valor dentro del orden de los 100-300, mientras que en la calculadora se encuentra en el orden de los 0,1-0,3 (es decir que para aplicar la ecuación deberíamos primero multiplicar el índice de saponificación considerado en la calculadora por 1.000).

La calculadora nos muestra que el índice de saponificación (respecto al KOH) para la mezcla es 0,203, por lo que usando la ecuación obtenemos un índice de saponificación de 0,1447 respecto al NaOH. Si utilizamos este valor por 1000 y obtenemos un porcentaje de glicerina de 7,9 %. Un valor casi igual al devuelto por la calculadora. Por ende, corroboramos que los datos obtenidos con la calculadora son confiables y procederemos a utilizarlos.

Para entender el pronóstico que la calculadora nos devuelve respecto a las propiedades del jabón, es necesario comprender que la misma indica por medio de números una aproximación de cómo va a comportarse el jabón respecto a propiedades como acondicionado, limpieza, burbujas, persistencia de las burbujas, dureza, solubilidad y secado. Los valores deberían estar lo más próximo posibles a 50 ya que valores más altos indican que el jabón excede de esa propiedad y viceversa ⁽¹⁵⁾.

Tal y como se ve en la figura 10, los valores están muy próximos a 50 y el INS y el Índice de yodo se encuentran en valores aceptables, por lo que se considera que el jabón ha sido correctamente formulado. Además, podemos ver que el mismo tiene una humedad final de 15,3 %, es decir que no será necesario exponer al jabón a una etapa de secado posterior ya que el mismo presenta una humedad aceptable.

Cabe aclarar que en la calculadora de saponificación no se ha tenido en cuenta el agregado de los colorantes, esencias y vitaminas, por lo que las propiedades pueden llegar a variar respecto a lo esperado.

2.2 DISEÑO DEL PROCESO PRODUCTIVO

2.2.1 PROPIEDADES DE LAS PRINCIPALES ESPECIES INTERVINIENTES

Antes de abordar el diseño de un proceso productivo es importante analizar las propiedades de las especies intervinientes en la reacción ya que estas nos darán pautas claves para su abordaje. En las tablas 8, 9 y 10 se puede observar las propiedades de las principales especies intervinientes en la reacción.

ACEITE DE OLIVA

Color	Verde a dorado, dependiendo de la variedad de aceitunas y el grado de madurez. ⁽⁴⁾
Olor	Afrutado, que puede variar según el tipo de aceituna y la región de producción. En su forma extra virgen, su aroma puede ser fresco, con notas herbáceas o frutales ⁽⁴⁾ .
Forma física	A temperatura ambiente, el aceite de oliva es un líquido ⁽⁴⁾ .
Peso molecular	El peso molecular del aceite de oliva varía, ya que es una mezcla compleja de ácidos grasos. En promedio, el peso molecular de los principales ácidos grasos (como el ácido oleico) está alrededor de 282g/mol ⁽⁴⁾ .
Punto de ebullición e inflamabilidad	Entre 300 °C y 320 °C, dependiendo de la calidad del aceite y su contenido en compuestos como los ácidos grasos ⁽⁴⁾ . Inflamable a altas temperaturas.
Punto de congelación	Oscila entre -6 °C y -20 °C, dependiendo de su composición de ácidos grasos ⁽⁴⁾ .
Densidad	Aproximadamente 0,91-0,93 g/cm ³ a 20 °C. Esto significa que es menos denso que el agua ⁽⁴⁾ .
Solubilidad	Insoluble en agua ⁽⁴⁾ .

Tabla 8. Propiedades del aceite de oliva.

ACEITE DE COCO

Color	Blanco en estado sólido y transparente o ligeramente amarillento en estado líquido. ⁽¹⁰⁾
Olor	El aceite de coco tiene un aroma característico, dulce, especialmente en su forma virgen (extra virgen). Su olor puede ser menos pronunciado o casi nulo en la versión refinada. ⁽¹⁰⁾
Forma física	A temperaturas por encima de los 25 °C, el aceite de coco es un líquido. Por debajo de esa temperatura, es un sólido ceroso blanco. ⁽¹⁰⁾
Peso molecular	El peso molecular del aceite de coco no se puede determinar de manera única porque es una mezcla de triglicéridos (moléculas que contienen ácidos grasos). Sin embargo, algunos de los ácidos grasos principales en el aceite de coco, como el ácido láurico, tienen un peso molecular de aproximadamente 204g/mol. ⁽¹⁰⁾
Inflamabilidad	Inflamable a altas temperaturas. ⁽⁵⁾
Punto de fusión	Alrededor de 25 °C. ⁽¹⁰⁾
Densidad	Aproximadamente 0,92 g/cm ³ a temperatura ambiente. ⁽¹⁰⁾
Solubilidad	Insoluble en agua. ⁽¹⁰⁾

Tabla 9. propiedades del aceite de coco.

NaOH

Color	Blanco en estado sólido.
Olor	No tiene un olor característico.
Forma física	El NaOH se presenta en forma de sólidos (escamas, perlas o pellets) o en solución acuosa (cuando se disuelve en agua).
Corrosividad	Compuesto altamente corrosivo ⁽⁵⁾
Peso molecular	El peso molecular del NaOH es de 40 g/mol.
Punto de fusión	El punto de fusión del NaOH sólido es de aproximadamente 318 °C (590 °F).
Densidad	La densidad del NaOH sólido es de 2,13 g/cm ³ a temperatura ambiente.
Solubilidad	Tiene una solubilidad de aproximadamente 1080 g/L en agua. La disolución del NaOH en agua es exotérmica, por lo que la solución se calienta durante el proceso.

Tabla 10. Propiedades del NaOH.

Es importante destacar que el NaOH se utilizará disuelto en agua en un 40 %.

DIFICULTADES TÉCNICAS

- **MATERIA PRIMA CORROSIVA:** Una de las principales dificultades en la construcción y diseño de la planta viene dada por el carácter corrosivo del hidróxido de sodio y por el hecho de que este compuesto al disolverse en agua sube de temperatura, alcanzando fácilmente los 80 °C disuelta al 33%⁽⁵⁾. Es por ello que, para evitar la corrosión de los equipos, se debe recurrir al uso de acero inoxidable en cañerías y equipos por los que pasa el jabón y la sosa.
- **MATERIA PRIMA INFLAMABLE:** Las grasas y los aceites son sustancias inflamables, aunque tienen altos puntos de inflamación y autoignición (alrededor de 250 °C y 290 °C, respectivamente). En las áreas de almacenamiento, no se necesitan medidas de seguridad extraordinarias, más allá de contar con sistemas para contener posibles fugas y disponer de equipos móviles para la extinción de incendios en caso de emergencia ⁽⁵⁾.
- **BAJO PUNTO DE SOLIDIFICACIÓN:** Para el caso del aceite de coco, lo que puede generar obstrucciones.
- **OLOR Y COLOR:** Para el caso del aceite de oliva, propiedades que pueden alterar la calidad del producto final

2.2.2 POTENCIAL ECONÓMICO

El Potencial Económico (PE) inicial es un indicador que se utiliza como una estimación preliminar para descartar de manera anticipada las rutas de reacción que no sean rentables. Se calcula como la diferencia entre los ingresos obtenidos por la venta del producto y los costos asociados a la materia prima (ver ecuación 9). El mismo determina que una ruta de reacción rentable cuando el PE es mayor a cero.

$$PE = \text{Ingresos por ventas} - \text{Costos de materia prima} \quad (9)$$

Antes de realizar cálculos adicionales, analizaremos la reacción general involucrada en el proceso (ver figura 8). Esta es:

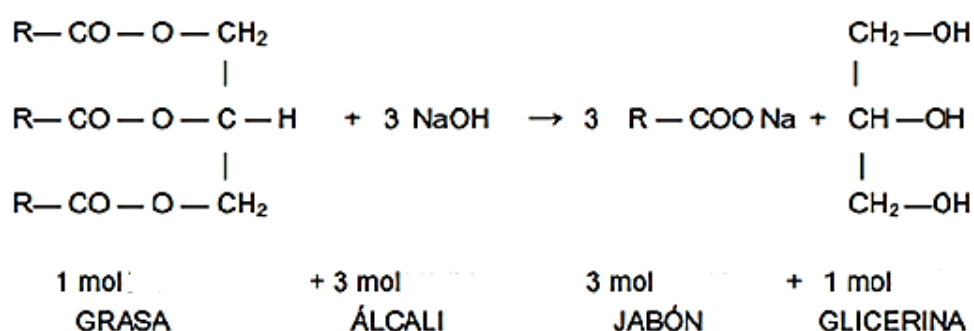


Figura 8. Reacción de saponificación⁽⁶⁾.

En donde la molécula de grasa o TAG será aportada por los aceites de oliva y coco. Llegado a este punto, es importante tener en cuenta que los mismos no son componentes puros, es decir que no se encuentran compuestos por un solo tipo de TAG, sino por una serie de distintos TAG, siendo los ácidos oleicos y láuricos los ácidos grasos que predominan en sus estructuras.

Si nos quedamos solo con la ecuación general y partimos de la suposición que las reacciones que se plantean tienen una conversión del 100 %, entonces 1 mol de TAG combinado con 3 de NaOH producen 1 mol de glicerol (que no será tenido en cuenta para la ecuación ya que, por el tipo de proceso escogido, este subproducto no es separado) y 3 moles de jabón. Por lo tanto, se puede escribir el PE como se ve en la ecuación 10:

$$PE = \text{producción anual} \times (3 Pr_{\text{jabón}} - Pr_{\text{TAG}} - 3Pr_{\text{NaOH}}) \quad (10)$$

Siendo la producción anual de producto 1.121,25 toneladas. Siendo además las variables Pr_i los costos molares de las materias primas y los precios molares de venta de los productos, por lo que se debería afectar los precios por tonelada (tabla 11), por los pesos molares y así obtener los precios en dólares por mol:

Compuesto	Precio en USD/tonelada
Aceite de oliva	3.700 ⁽¹¹⁾
Aceite de coco	1.900 ⁽¹¹⁾
NaOH al 40 %	640 ⁽¹¹⁾
Jabón de castilla	4.000 ⁽¹¹⁾

Tabla 11. Precios de insumos por tonelada.

Cabe aclarar que:

- En la tabla 11 se tomó el precio del jabón de castilla (jabón producido en Castilla España, cuya materia prima es aceite de oliva únicamente) por su similitud con el tipo de jabón planteado en esta tesis.
- Para el análisis económico se considerará despreciable el aporte de las esencias, el colorante, la sal, el EDTA, el HEDP y la vitamina e por ser estos productos minoritarios en la formulación.
- Cuando hablamos de jabón neto hacemos referencia al jabón que ya contiene su valor de humedad dentro de los parámetros establecidos (15-22 %), un porcentaje de NaCl de 1% y la glicerina producida en la reacción (ya que el proceso de producción elegido para esta tesis es un proceso semi-hervido) es decir hacemos referencia al producto final obtenido del reactor.

Como determinar el peso molar promedio para afectar en la ecuación 10 es bastante complejo para este tipo de jabón, ya que el producto final no es solo jabón, sino una mezcla de jabón, agua residual, sal y glicerol se recurrirá al cálculo del PE por medio de los índices de saponificación.

ANÁLISIS DEL POTENCIAL ECONÓMICO CON ÍNDICES DE SAPONIFICACIÓN

Para analizar el PE desde la saponificación recurriremos al uso de la ecuación 9 en vez de la 10 y utilizaremos los índices de saponificación para determinar los kg necesarios de materia prima que luego serán utilizados en la ecuación.

Sabemos que el índice de saponificación para el aceite de coco es 0,248 y el del aceite de oliva es 0,192 ⁽¹⁵⁾. A su vez, sabemos que se utilizara soda caustica al 40 % y una mezcla 80:20 de aceite de oliva y coco, respectivamente. Luego, calculamos con el índice de saponificación las cantidades de materias primas necesarias para producir 1.121,25 toneladas de producto, que descontando el 1% que corresponde a la sal, nos da un total de 1.110 toneladas de jabón (ver tabla 12).

Materia prima/ Producto	Cantidad t/año	USD/t
Aceite de coco	163,952	1.900
Aceite de oliva	659,808	3.700
NaOH 40 %	286,242	640
Jabón	1.110	4.000

Tabla 12. Toneladas de materias primas necesarias para producir 1.110 toneladas de jabón. Luego, reemplazando en la ecuación 9, obtenemos la ecuación 11 y 12:

$$PE = 1.110 \times 4.000 - 286,242 \times 640 - 659,808 \times 3.700 - 163,952 \times 1.900 \quad (11)$$

$$PE = 1.504.000 \frac{USD}{Año} \quad (12)$$

Vemos que el proceso de obtención elegido cumple con la condición inicial de factibilidad.

2.2.3 RÉGIMEN DE OPERACIÓN

Para determinar el régimen de operación se considera la cantidad a producir. Para cantidades igual o mayores a 5000 t/año es conveniente utilizar procesos continuos de producción. Este es un heurístico basado en la experiencia. Como la producción anual requerida es 1000 t/año utilizaremos un proceso discontinuo y, teniendo en cuenta que los reactivos son líquidos elegiremos la utilización de un reactor de tipo tanque agitado discontinuo. A su vez, tal y como se aclaró anteriormente, plantearemos para el diseño de esta planta el método de obtención de jabón semi-hervido para evitar la generación de subproductos que luego se debería tratar y para que el jabón tenga más glicerina.

2.2.4 ESTRUCTURA DE ENTRADA-SALIDA DEL PROCESO

Una representación de diagrama de caja negra permite visualizar las corrientes de entrada y salida que conformarán la estructura del proceso (ver Figura 9).

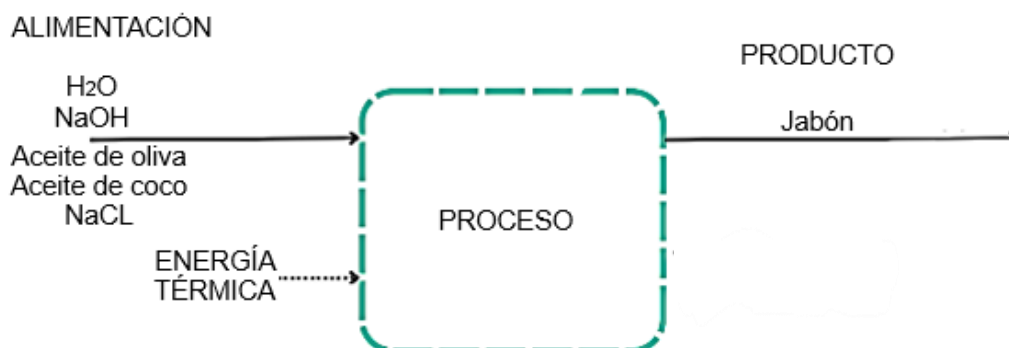


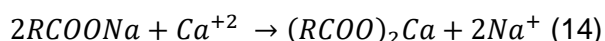
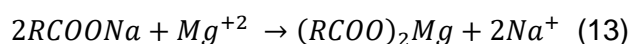
Figura 9. Diagrama de caja negra, estructura entrada-salida del proceso productivo del jabón.

TRATAMIENTO DE MATERIAS PRIMAS

Teniendo en cuenta lo que se vio en la tabla 8, podemos decir que el color oscuro y aroma poco agradable e invasivo del aceite de oliva son propiedades potencialmente invasivas y que pueden interferir con la calidad final del producto. Sobre todo, teniendo en cuenta que el producto formulado es un cosmético. Es por ello que se ha elegido para esta tesis realizar un pretratamiento del mismo por medio de un proceso de adsorción con tierra fuller.

A diferencia del aceite de oliva, el aceite de coco posee un aroma agradable y menos invasivo, además de carecer de color que pueda afectar la calidad del producto final por lo que tan solo debería ser sometido a un proceso de filtrado antes de ser ingresado al reactor. Sin embargo, tal y como se vio en la tabla 9, el problema que presenta esta materia prima es su bajo punto de solidificación que en épocas invernales puede trancar las cañerías, provocar sobreesfuerzos en la bomba de dosificación, además de dificultar el contacto entre las fases durante la reacción, lo que se traduce en una disminución de la velocidad de reacción. Es por este motivo que se ha elegido para esta tesis realizar un pretratamiento del aceite de oliva que consista en una pre calefacción del aceite a modo de asegurar el estado líquido del mismo.

Es importante que el agua utilizada no sea muy dura ni contenga un alto nivel de electrolitos para evitar que se formen sales insolubles e inactivas de calcio y magnesio que disminuyen el rendimiento de la espuma y la eficiencia de limpieza del jabón o lo anulan por completo (ver ecuaciones 13 y 14) ⁽³⁾.



Para esta tesis no se incorporará agua a la preparación ya que la misma será aportada por la soda caustica al 40%. Es por ello que no realizaremos un pretratamiento de agua, aunque sí será de gran importancia, el uso de EDTA y HEDP en la preparación para evitar la presencia de cualquier ion metálico que pueda encontrarse en las materias primas ⁽³⁾.

SEPARACIÓN DE PRODUCTOS Y SUBPRODUCTOS

Por lo general, luego de la etapa de reacción los productos obtenidos deben ser sometidos a otros tratamientos a modo de separar los productos de los subproductos y/o purificar el producto deseado. Para esta tesis, el subproducto obtenido es la glicerina, sin embargo, tal y como se ha especificado en el capítulo 1, se ha optado por no realizar la separación. Esto ya que la presencia de la glicerina no solo aporta propiedades beneficiosas para la piel, sino que también favorece la permanencia de la espuma en el jabón y disminuye los costos que implicaría una separación. A su vez, considerando que para la formulación elegida la humedad final se encuentra dentro de los parámetros establecidos (15 a 22%) ⁽³⁾, es que no será necesario agregar una etapa de secado. Queda únicamente la necesidad de una etapa de enfriamiento a modo de adicionar los aditivos termolábiles (como lo son las esencias) y a modo de obtener un producto más duro, pero a la vez maleable para poder ser extrudado y prensado en lo que sería la etapa de acabado del jabón ⁽³⁾.

2.2.5 DISEÑO DEL PROCESO PRODUCTIVO POR ETAPAS

Luego de haber analizado todo lo anterior podemos concluir que la estructura del proceso se subdivide en cinco unidades, tal y como se ve en la Figura 10.

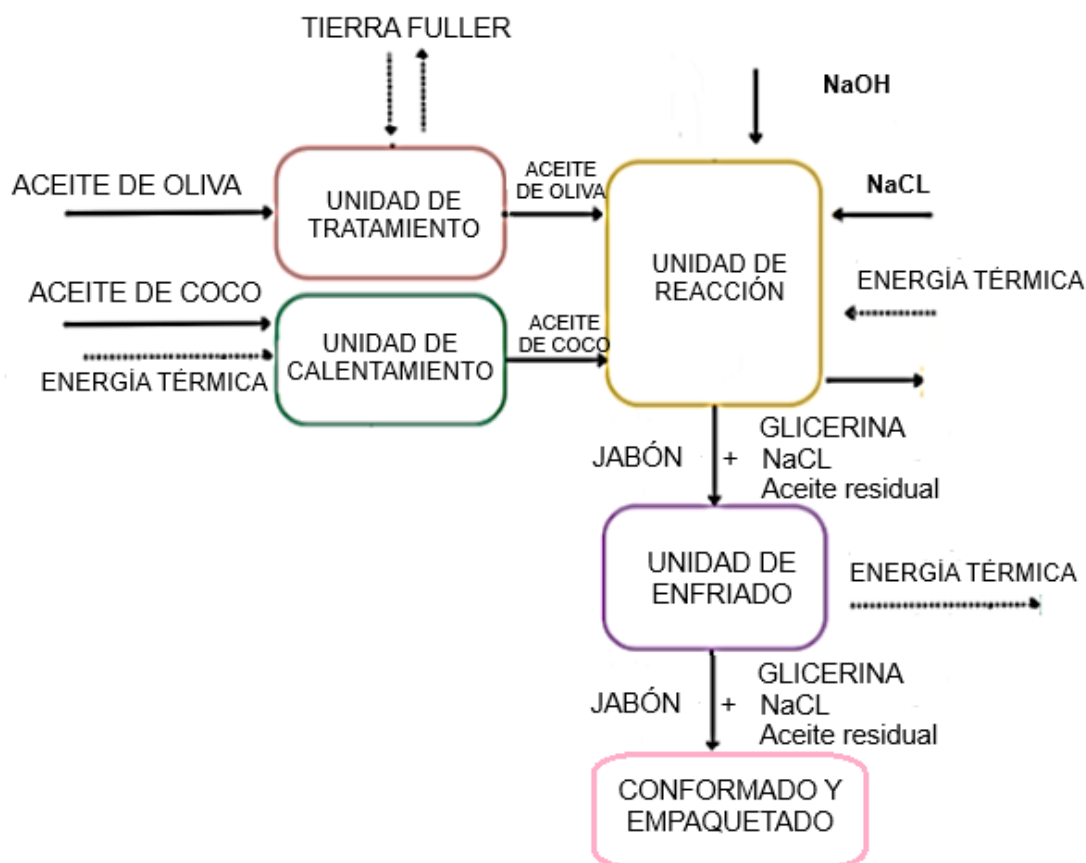


Figura 10. Esquema del proceso productivo de jabón subdividido en unidades.

UNIDAD DE TRATAMIENTO DEL ACEITE DE OLIVA

El aceite de oliva someterá a un tratamiento de

Este tratamiento consta de las siguientes etapas:

- **Filtrado inicial:** El aceite es filtrado previamente para eliminar impurezas visibles, como restos sólidos o partículas suspendidas ⁽³⁾.
- **Adsorción:** El aceite ingresa a un tanque agitado con un 2 % de tierra de fuller ⁽³⁾. (que es un tipo de arcilla natural, rica en sílice, y de estructura porosa que funciona como componente adsorbente). La mezcla se someterá a un proceso de agitación por 30 minutos. Durante este proceso, la tierra de fuller adsorberá los compuestos colorantes y los compuestos responsables del olor, como ácidos grasos libres ⁽³⁾.
- **Filtración final:** Finalmente se procederá a separar la tierra de fuller del aceite mediante un sistema de filtración. Para ello, se utilizará un filtro de placa y marco que eliminará la mayor parte de la tierra de fuller. Luego, se realizará una filtración final

con un filtro de cartucho para asegurar que no queden restos de tierra en el aceite blanqueado ⁽³⁾.

UNIDAD DE CALENTAMIENTO DEL ACEITE DE COCO

El tanque de almacenamiento del aceite de coco debe contar con un sensor de temperatura para que, en cuanto la misma descienda por debajo de los 25 °C (punto de solidificación del aceite) se accione la apertura de la válvula de vapor que calefactará el aceite hasta los 27 °C. Otro factor a tener en cuenta es que las cañerías que conecten los equipos deben estar aisladas para impedir una pérdida de calor que podría producir atascos (por el propio enfriamiento). Para ello se colocará tergotol como aislante debido a su bajo costo.

UNIDAD DE REACCIÓN: REACTOR

El reactor elegido para el proceso es un crutcher de alta cizalla ya que facilita el contacto entre las fases y por ende la reacción. El mismo debe estar construido con materiales de acero inoxidable para evitar la corrosión ya que se trabajará con soda caustica en altas concentraciones y a temperatura (ver figura 11).

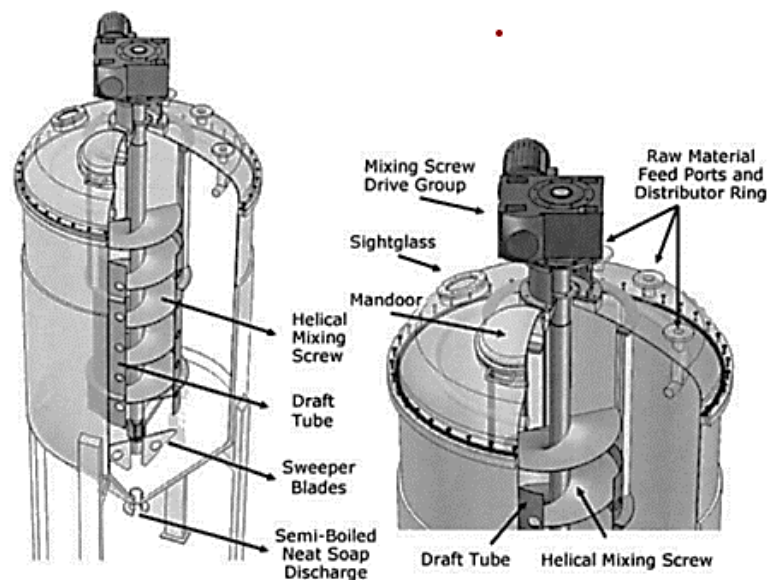


Figura 11. Crutcher ⁽³⁾

El crutcher está equipado con un tornillo mezclador vertical insertado en un tubo de aspiración. Este robusto tornillo garantiza una mezcla vigorosa del material a procesar ya que impulsa las materias primas hacia arriba cuando están dentro del tubo de aspiración y hacia abajo cuando están fuera. Además, la presencia de una pala de anclaje giratoria evita que los productos se depositen en el fondo. La velocidad del tornillo de rotación se puede variar mediante el variador de frecuencia.

Las variables de reacción son:

- **TEMPERATURA DE REACCIÓN:** Como la temperatura de 80 a 100 °C para la saponificación asegura que la reacción de sea eficiente sin comprometer la integridad de los aceites (ya que, a temperaturas superiores a 100 °C, los aceites y grasas pueden empezar a descomponerse) ⁽³⁾. Se elige como temperatura de trabajo 80 °C a modo de asegurar la calidad de materias primas y para disminuir la energía necesaria en el proceso de enfriado posterior.
- **PRESIÓN:** Considerando que trabajar con un sistema a presión implica el uso de equipos más costosos se elige trabajar a presión atmosférica en el reactor. Esto se aplica también al resto de los equipos.
- **REACTIVO LIMITANTE:** Se elegirá como reactivo limitante a la soda cáustica a pesar de ser este un compuesto más barato, ya que se busca que quede un porcentaje de un 5 % de aceite residual en el producto terminado para propiciarle al jabón propiedades humectantes y para asegurar una conversión total y eliminar el posible exceso de soda cáustica que elevaría el pH del jabón. Es decir que se trabajará produciendo un jabón de tipo superfatado.

UNIDAD DE ENFRIADO

La temperatura del jabón debe descender de 80 °C a 40 °C aproximadamente ya que con este descenso de temperatura se podrá adicionar los productos más sensibles a la temperatura (como lo son las esencias y la vitamina E) y conseguir un incremento en la dureza del jabón. Esto permitirá obtener un producto lo suficientemente duro y maleable como para poder ser sometido al posterior proceso de prensado. Para ello se utilizará un intercambiador de calor de placas con flujos en contracorriente debido a su alta eficiencia para la transferencia de calor, sobre todo, teniendo en cuenta que la viscosidad del fluido se verá incrementada. El fluido de enfriamiento utilizado será agua a temperatura ambiente debido a su bajo costo y a que la misma puede enfriar fluidos en ese rango de temperaturas.

CONFORMADO Y EMPAQUETADO: LINEA DE ACABADO DEL JABON

Una vez que el jabón ha alcanzado su temperatura y humedad final, el jabón obtenido es dirigido hacia la línea de acabado que conferirá al jabón comercial su aspecto final ya que el jabón de tocador necesita un acabado más minucioso.

El proceso de acabado del jabón en barra se divide en seis etapas:

1. **Mezcla:** Se mezcla la base principal de jabón, con ingredientes líquidos y sólidos menores como lo son las esencias y los colorantes. El mezclador más comúnmente utilizado se conoce como "amalgamador", es una unidad de carga superior y descarga inferior que no se inclina, equipada con palas de perfil Sigma de tipo "brazo abierto". Tiene un diseño de palas, eficiente y fácil de limpiar que recubre la superficie externa de los pellets con los ingredientes adicionales. Sin embargo, este tipo de mezcladores por sí solo es limitado para la penetración de los aditivos ⁽³⁾ (ver figura 12).

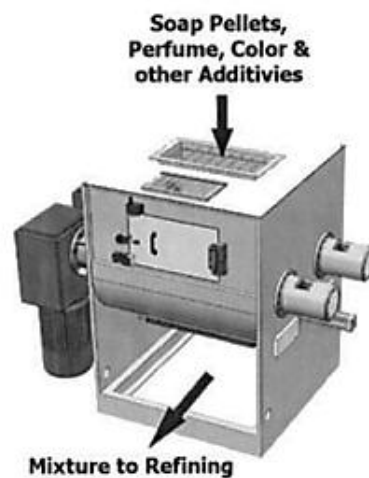


Figura 12. Amalgamador ⁽³⁾

2. **Refinado:** El refinado es el proceso en el que el jabón se somete a una acción combinada de presión y corte con el objetivo de obtener un producto homogéneo y uniforme, mejorar la textura de la barra eliminando partículas duras que tienen baja solubilidad y mejorar la capacidad de hacer espuma, la solubilidad y la firmeza del jabón, alterando su estructura cristalina.

Para el diseño de la planta se elige realizar esta etapa con un molino de tres rodillos del modelo BRM-V ya que con su configuración en forma de V presenta áreas de contacto lo suficientemente grandes para asegurar un refinado y enfriamiento adecuados, además de un fácil ajuste y control de la separación entre rodillos. Este diseño asegura que no se pierda jabón al suelo, evitando la contaminación del producto y logrando un control óptimo de la temperatura ⁽³⁾ (ver figura 13).

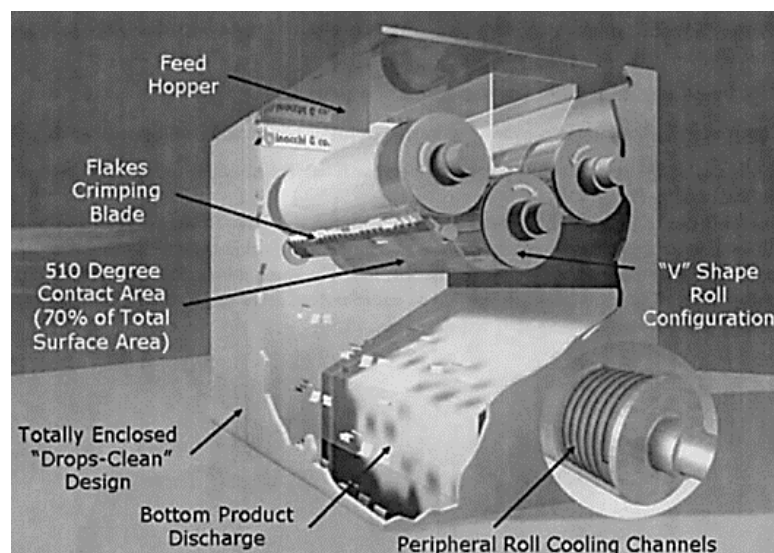


Figura 13. Binacchi BRM-V Molino de Tres Rodillos. Fuente Binacchi & Co.

3. **Extrusión:** El producto refinado se extruye en una forma compacta y predefinida, generando jabón en barras o bolos de forma continua, listas para ser cortadas y procesadas en la siguiente fase de producción. La extrusora puede trabajar en vacío para eliminar la presencia de aire y completar el secado.

Para el diseño de la planta se utilizará un plodder dúplex con vacío de un solo tornillo, que está compuesto por dos plodders conectados mediante una cámara de vacío. El primer plodder actúa como un refinador simplex y utiliza una pantalla de refinado de 50 mallas (es clave destacar que el plodder solo actúa como refinador si está equipado con una pantalla de 50 mallas ya que, si se usan pantallas más gruesas, como las de 30 o 20 mallas, el refinado será menos eficiente). El segundo plodder compacta y extruye los pellets refinados (con un cono de extrusión) en un bolo continuo, sin aire atrapado. De esta forma se obtendrán las etapas de refinado y extrusión con un mismo equipo ⁽³⁾ (ver figura 14 y 15).

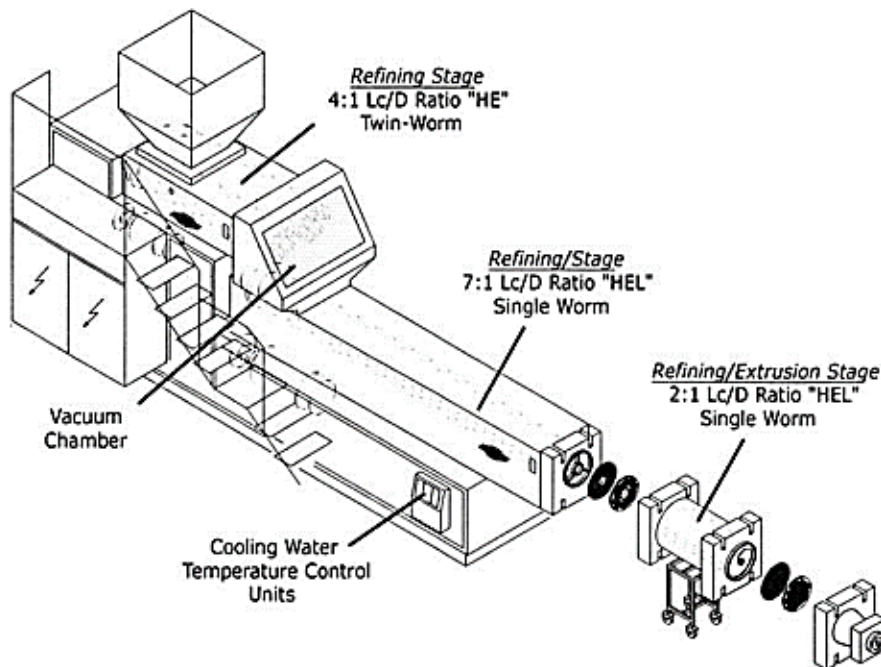


Figura 14. Plodder Mazzoni LB Multirefining (MRP) con dos etapas de refinado: una con un gusano 4:1 y otra con un gusano 7:1 y 2:1, siendo la segunda removible para limpieza ⁽³⁾

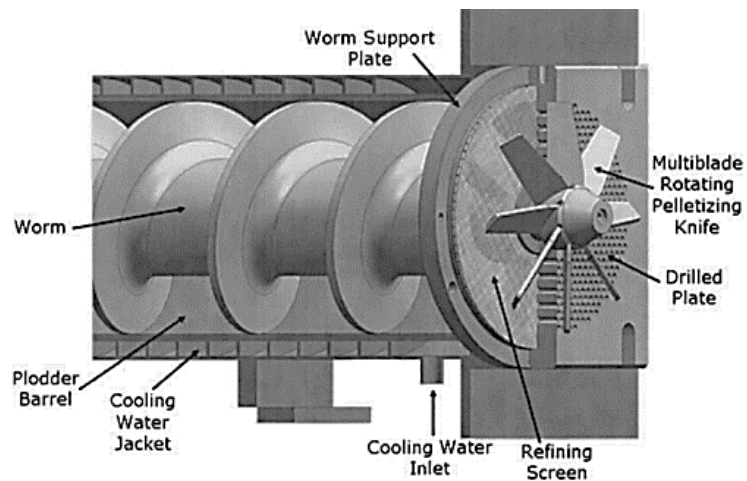


Figura 15. Vista interior del primer podde (etapa de refinamiento) ⁽³⁾

4. **Corte:** Los bolos extruidos se cortan en longitudes individuales según las especificaciones del modelo de prensa de jabón a utilizar ⁽³⁾ (ver figura 16).

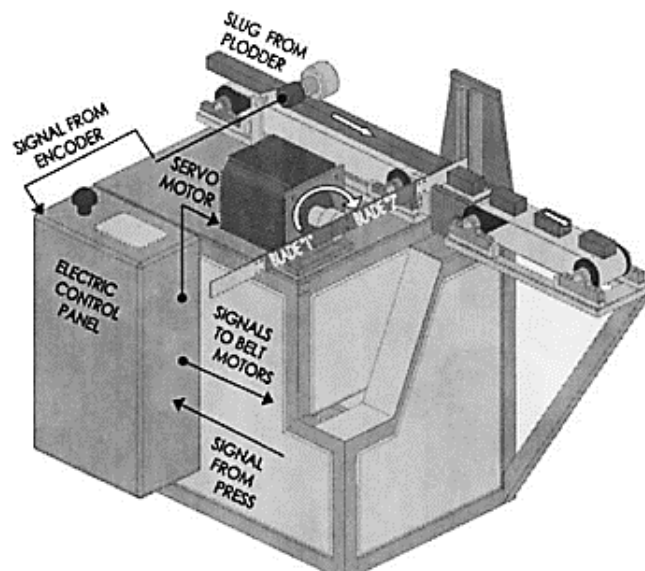


Figura 16. Cortadora electrónica SAS Easycut. Fuente: SAS ⁽³⁾

5. **Estampado:** El bolo cortado se somete a un proceso de prensado para que la barra cumpla con el peso y la forma deseados. Esto puede ser:
 - **Con banda (Banded):** Jabones cuyo perímetro tiene lados verticales, formando una banda en su exterior ⁽³⁾.
 - **Sin banda (Bandless):** Jabones que solo no tiene los lados verticales que rodean su contorno ⁽³⁾.

A su vez, estas formas se pueden clasificar en cuatro variaciones: rectangular, redonda, ovalada e irregular ⁽³⁾ (ver figura 17).

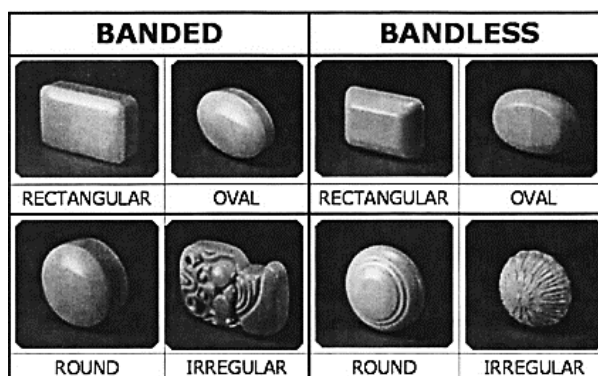


Figura 17. Formas del jabón prensado ⁽³⁾

En general, durante el prensado una pequeña cantidad de jabón puede quedar adherida a los moldes o ser retirada como "exceso" (conocido como "flash").

El porcentaje de esta pérdida tiende a ser entre un 10 % y 30 % dependiendo de varios factores, como el tipo de prensa, el diseño del molde y el método de producción ⁽³⁾. Para minimizar estas pérdidas se utilizará un prensado de estilo banded rectangular y se supondrá para los cálculos que el porcentaje de producto terminado perdido en el proceso es de un 15%.

- 6. Empaque:** Las barras estampadas se empaquetan en diversos estilos de embalaje. Para esta tesis consideraremos un envasado en caja de cartón ya que este tipo de empaque aporta una buena protección sin necesidad de recurrir a productos plásticos que demoran más tiempo en degradarse. A su vez, el embalaje será tipo multipack, de tres unidades por caja. Esto, para reducir los costos de embalaje unitario ⁽³⁾.

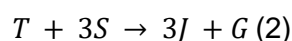
2.3 CÁLCULOS

Lo primero que se debe saber al hacer los cálculos es las toneladas de producto que se quiere obtener por año para luego utilizar dicho parámetro como guía.

Se propone una producción de jabón de 1.000 t/año que, por lo explicado anteriormente, se termina traduciendo en 1.121,5 toneladas de jabón neto. Teniendo ese dato como guía procederemos a realizar el resto del análisis.

2.3.1 DISEÑO DEL REACTOR TIPO BATCH (TAD)

Lo primero que necesitamos conocer para abordarnos en el diseño del reactor es el tiempo de reacción ya que el mismo determina el número de batchadas diarias. A partir de esta información es posible determinar el volumen del reactor a partir de la siguiente ecuación de reacción:



Considerando que nuestro reactivo limitante es el NaOH, es decir S y partiendo del balance para del reactivo limitante obtenemos la ecuación 15:

$$G_S = \frac{dN_S}{dt} \quad (15)$$

Donde G_S es la tasa de cambio por reacción química de la especie S dentro del sistema con respecto al tiempo.

Considerando la ecuación de diseño de un TAD, obtenemos la ecuación 16:

$$G_S = \frac{dN_S}{dt} = -r_S V \quad (16)$$

Siendo la reacción en fase líquida, es posible asumir que el volumen de la mezcla reaccionante es constante ⁽¹⁷⁾.

Al no tener datos de la cinética de reacción para la formulación planteada, consideraremos que la cinética de reacción de saponificación de la sosa con exceso el aceite de palma a 80°C obtenida de bibliografía ⁽¹⁴⁾ puede ser utilizada como referencia para el diseño de nuestro reactor al tratarse de materias primas similares (reacciones de saponificaciones con NaOH en condiciones de exceso de TAG a 80°C). Cabe aclarar que, ya que la velocidad de reacción depende de la temperatura, de las concentraciones y del tipo de reactivos, el tiempo de reacción obtenido de esta manera no es necesariamente el mismo que el que se producirá en nuestra reacción con aceite de coco y oliva, pero servirá como estimación el cálculo del tamaño del reactor.

La cinética para la reacción de saponificación puede ser expresada tal y como lo indica la ecuación 17:

$$r_S = K_2 C_T C_S \quad (17)$$

siendo $K_2 = 0,0234 \frac{L}{mol \cdot min}$ ⁽¹⁴⁾, C_T la concentración de triglicérido y C_S la concentración de sosa.

De la unión de las ecuaciones 16 y 17 obtenemos la ecuación 18:

$$G_S = \frac{dC_S}{dt} = -K_2 C_T C_S \quad (18)$$

Podemos obtener las ecuaciones 20 y 21:

$$x = \frac{C_{S0} - C_S}{C_{S0}} \quad (19)$$

$$C_S = C_{S0}(1 - X) \quad (20)$$

$$C_T = C_{S0} \left(C_{T0} - C_{S0} \frac{X}{3} \right) \quad (21)$$

De los balances y la conversión (x) del reactivo limitante, dada por la ecuación 19 y y tomando las mismas condiciones iniciales reportadas por Vallejo, N., & Martínez, D. I. (2004). siendo C_{S0} la concentración inicial de sosa y C_{T0} la concentración inicial de triglicéridos ⁽¹⁴⁾.

A su vez, reemplazando las ecuaciones 20 y 21 en la ecuación 18 y, expresando todo respecto de la conversión, obtenemos la ecuación 22, que integrando desde $x = 0$ a $x = 0.95$ ⁽¹⁴⁾ y de $t = 0$ hasta $t = tr$ se puede obtener el tiempo de reacción (tr) con la ecuación 23:

$$K_2 dt = \frac{dX}{C_{S0}(1-X)(C_{T0} - C_{S0}\frac{X}{3})} \quad (22)$$

$$tr = \int_{X=0}^{X=0,95} \frac{dX}{K_2 C_{S0}(1-X)(C_{T0} - C_{S0}\frac{X}{3})} \quad (23)$$

Luego $tr = 244$ minutos.

Obtenido el tiempo de reacción, podemos calcular la producción establecida por cada batchada y luego, realizar el dimensionado del equipo. Como sabemos que la reacción de saponificación se lleva a cabo en un tiempo aproximado de 244 minutos y que, una vez completada la reacción, el jabón semi-hervido se descarga en un periodo de 20 a 30 minutos ⁽³⁾. Considerando el caso más desfavorable, se puede calcular el tiempo del ciclo con la ecuación 24, que da como resultado cinco horas.

$$T_{Ciclo} = T_c + T_d + T_r \quad (24)$$

Donde:

T_c = tiempo de carga del reactor (consideramos 30 minutos).

T_d = tiempo de descarga del reactor (consideramos 30 minutos).

T_r = tiempo de reacción.

Sabiendo que se debe producir 1.121,25 toneladas por año de jabón y, teniendo en cuenta que se producirá de lunes a viernes y que los sábados se realizará la limpieza, los días productivos son 261.

Considerando que el tiempo del ciclo es de 5 horas, y que la producción se realiza en dos turnos de 8 horas, podemos decir que solo se podrían realizar tres batchadas por día (ver figura 18), dejando un tiempo muerto de dos horas que a medida que la planta se ponga en funcionamiento se evaluará si efectivamente sirve como *backup* ante cualquier imprevisto o si resulta más conveniente acortar la jornada laboral a dos turnos de 7,5 horas.

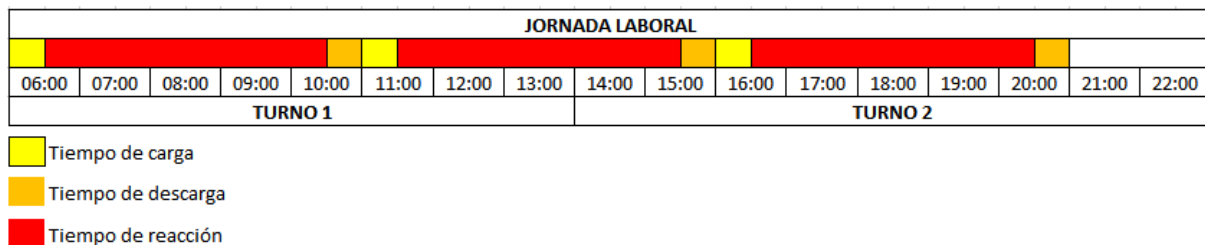


Figura 18: distribución de batchadas en la jornada laboral.

Considerando además que los días productivos son 261, deducimos que se podría realizar 783 batchadas por año, lo que significa que en cada batchada se deberían producir 1,43 t de jabón.

De esas 1,43 t de jabón, 15,3% corresponden al agua residual que queda en el producto, 1% corresponde a la sal agregada (ambos, inertes de reacción) y un 7,8% corresponde a la glicerina formada. Por lo que de las 1,43 t que se pretenden producir solamente 1,085 t corresponden a jabón puro.

Para obtener el volumen de reactor utilizaremos la ecuación 25:

$$P = C_p \times V_r \quad (25)$$

Donde:

P = Producción que se desea obtener (en moles) por ciclo de jabón puro.

C_p = Es la concentración de jabón puro obtenida en el ciclo, que a su vez se puede obtener por balances con la ecuación $C_p = C_{S_0}X$, todos valores conocidos.

V_r = volumen de reacción.

Para obtener P en moles utilizaremos la ecuación 26:

$$P = \frac{1.085 \text{ t}}{PM} \quad (26)$$

Vemos que necesitamos para el cálculo el peso molecular medio. Para obtenerlo, recurriremos a la calculadora de mendrulandia. La misma nos indica la proporción de ácidos grasos que conforman los triglicéridos de la mezcla de aceites utilizada, por lo que tomando un valor de peso molecular promedio de la sal sódica de estos ácidos grasos y multiplicándola por tres podríamos simular un peso molecular aproximado del jabón puro obtenido (ver ecuación 27 y tabla 13).

$$PM_{promedio} = \frac{\sum_{i=1}^{14} (PM_{jabón,i} \times x_i)}{\sum_{i=1}^{14} x_i} \quad (27)$$

Ácido graso	Fórmula	PM ácido graso (g/mol)	PM sal sódica (g/mol)	Porcentaje
Caproico (C6:0)	C6H12O2	116,16	125,16	0,01%
Caprílico (C8:0)	C8H16O2	144,21	153,21	1,39%
Cáprico (C10:0)	C10H20O2	172,27	181,27	1,59%
Láurico (C12:0)	C12H24O2	200,32	209,32	9,53%
Mirístico (C14:0)	C14H28O2	228,37	237,37	3,18%
Palmitico (C16:0)	C16H32O2	256,42	265,42	12,7%
Palmitoleico (C16:1)	C16H30O2	254,40	263,4	0,6%
Estearico (C18:0)	C18H36O2	284,47	293,47	2,48%
Oleico (C18:1)	C18H34O2	282,46	291,46	61,21%
Linoleico (C18:2)	C18H32O2	280,45	289,45	5,95%
Linolénico (C18:3)	C18H30O2	278,43	287,43	0,4%
Araquídico (C20:0)	C20H40O2	312,53	321,53	0,47%
Gadoleico (C20:1)	C20H38O2	310,51	319,51	0,34%
Behénico (C22:0)	C22H44O2	340,58	349,58	0,08%
TOTAL			274,93⁽²⁷⁾	

Tabla 13. Proporciones de ácidos grasos presentes en la mezcla de aceite de oliva y coco y sus correspondientes sales, luego de la saponificación.

Luego $P = 3.946 \text{ mol/ciclo}$, $C_p = 2.44 \text{ mol/L}$

De esta manera obtenemos un volumen de reacción de 1.620 L.

Para obtener el volumen del reactor afectaremos por un factor de seguridad de 20 % obteniendo así un reactor de aproximadamente 1.9 m³.

2.3.2 DIMENSIONADO DE TANQUES

Al dimensionar los tanques se busca conocer el volumen máximo que los mismos contendrán. Esto se da cuando el tanque se encuentra en su máximo estado de carga, es decir justo antes de que el tanque sea descargado y justo luego de que termine de ingresar todo el flujo de masa de entrada. Traduciéndolo en balances, la ecuación sería:

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad (21)$$

Una forma fácil de realizar el dimensionado de equipos es basarnos en las 1,43 t de jabón que debemos producir por ciclo. De esta manera y, reescalando la fórmula con la calculadora de mendrullandia se podría realizar el cálculo de dimensionado de equipos con las densidades (ver tabla 14 y figura 19).

Ingredientes		Peso kilos	SAP (KOH)	Grasas	Fórmula	Álcali	info	Borrar
Oliva Virgen, aceite de		841,718kg	0,192	80,1%	58,9%	110,574kg	i	-
Coco, aceite de		208,930kg	0,248	19,9%	14,6%	35,452kg	i	-
Sal		14,287kg			1,0%		i	-
+ Nuevo	Suma	1064,935kg	0,203	100,0%	74,5%	146,026kg		+
Opciones de la lejía		Peso			Fórmula		info	
Agua		219,039kg			15,3%			
Sosa cáustica (NaOH)		146,026kg	Pureza 99%		10,2%			
Yodo 64	INS 139	TOTAL 1430,000kg			100,0%		i	

Sobreengrasado Concentración

5%

40%

Reescalar
Fórmula
1430,0

Figura 19. kilos de aceite, NaOH, sal y agua necesarios para producir 1,43 t de jabón con un superfatado de 5% ⁽¹⁵⁾.

MATERIA PRIMA	kg/ciclo	DENSIDAD kg/m³	VOLUMEN m³
<i>Aceite de coco</i>	208,93	910	0,23
<i>Aceite de oliva</i>	841,718	920	0,915
<i>Soda caustica 40%</i>	365,065	1.320	0,276

Tabla 14. Materias primas necesarias por batchada.

DIMENSIONADO DE TANQUE DE CALENTAMIENTO DE ACEITE DE COCO

La unidad de calentamiento del aceite de coco servirá como un tanque pulmón capaz de abastecer al reactor con cuatro cargas. De esta manera, el tanque pulmón alcanzara su carga máxima cuando la masa sea igual a cuatro veces la carga de aceite de coco $m = 4 \times 208,93 \text{ kg}$. Afectando por la densidad podemos decir que el volumen del tanque debe ser de $0,92 \text{ m}^3$. Afectando por un 10% extra para evitar rebalses, podemos concluir que el volumen del tanque de calefacción del aceite de coco debe ser de 1 m^3 .

Este tanque no contará con un sistema de agitación y poseerá un sistema de vasos comunicantes que indicará el nivel dosificado por batchada.

DIMENSIONADO DE TANQUE DE ABASTECIMIENTO DE NAOH

El tanque de abastecimiento de NaOH funcionará como un tanque pulmón capaz de abastecer al reactor con cuatro cargas. De esta manera, el tanque pulmón alcanzara su carga máxima cuando la masa sea igual a cuatro veces la carga de NaOH al 40%. Afectando por la densidad podemos decir que el volumen del tanque debe ser de $1,1 \text{ m}^3$. Afectando por un 10% extra para evitar rebalses, podemos concluir que el volumen del tanque de pulmón de NaOH será de $1,2 \text{ m}^3$.

Este tanque debe tener un sistema de agitación para facilitar la disolución, debe ser diseñado en material de acero inoxidable, para evitar la corrosión y debe poseer un sistema de vasos comunicantes que indique el nivel dosificado por batchada.

DIMENSIONADO DE TANQUES DE TRATAMIENTO DE ACEITE DE OLIVA

El proceso de tratado del aceite de oliva constará de un tanque inicial, en donde se cargará el aceite de oliva y la tierra fuller; el sistema de filtrado, conformado por un filtro de placas y un tanque capaz de contener el producto filtrado que será directamente dosificado al reactor luego de corroborar que el mismo carece de aroma, color y/o tierra fuller en su composición. En caso de que el producto obtenido no haya sido filtrado correctamente se lo desviara al primer tanque nuevamente. Tal y como lo indica la figura 20.

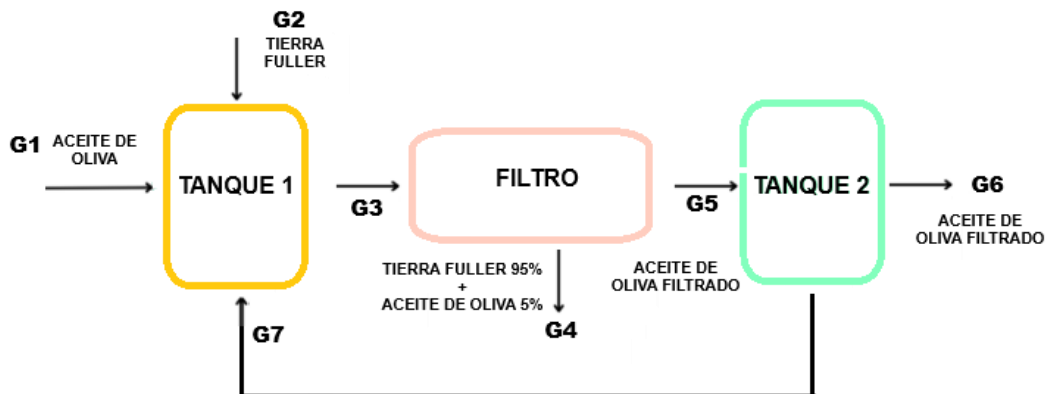


Figura 20. Diagrama del sistema de tratamiento de aceite de oliva.

Se debe tener en cuenta que los tanques deben estar diseñados de manera tal que la operación completa se realice en un período menor al del ciclo (5 horas). Dado que el tiempo de contacto entre el aceite de oliva y la tierra de fuller en el primer tanque debe ser de 30 minutos, se dispone de una ventana de 4,5 horas para el resto del proceso. Considerando que la filtración se realiza en un periodo de 30 minutos, y que tanto la carga como la descarga requieren un total de 30 minutos, podemos concluir que dimensionar los tanques para una carga por ciclo es suficiente, ya que el tiempo del ciclo permite realizar un segundo filtrado en caso de ser necesario.

En cuanto al tanque 2, este alcanzará su carga máxima cuando $ms=0$ y $m(t)=841,718$ kg. Si bien se pierde aproximadamente un 5 % del aceite de oliva en la tierra de fuller, este efecto se considerará despreciable para los fines del diseño. Teniendo en cuenta la densidad del aceite de oliva a 25 °C, se concluye que el volumen del tanque 2 será de 0,915 m³. Aplicando un factor de seguridad del 10 % para evitar rebalses, el volumen final del tanque 2 (V_2) será de 1 m³.

Para el cálculo del primer tanque, se debería tener en cuenta la proporción de tierra de fuller agregada; sin embargo, dado que solo representa un 2 % de la mezcla, su aporte se considerará despreciable. Se tomará un volumen total de 1 m³ para la mezcla de aceite de oliva y tierra de fuller. Este tanque se afectará con un factor de seguridad del 20 %, ya que contendrá un sistema de agitación que no está presente en el segundo tanque y que ocupará volumen adicional. Así, el volumen del tanque será de 1,1 m³.

2.3.3 CÁLCULOS DE INTERCAMBIO CALÓRICO

Para determinar la cantidad de calor que deberá ser extraído del jabón se debe primero calcular el calor específico medio del producto en el rango de temperaturas utilizadas. Se empleará para ello la ecuación 23 obtenida de la bibliografía adjunta ⁽³⁾

$$\overline{Cp, jabon} = 0,6 \times \frac{\%TFM}{100} + 1 \times \frac{\%H}{100} \quad (23)$$

Donde:

%TFM: Contenido de materia grasa total del producto seco obtenido, en %.

%H: contenido de humedad en base húmeda del producto seco obtenido, en %. Tal y como se ve en la ecuación 24.

$$\% H = \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa total}} \times 100\% \quad (24)$$

$\overline{Cp, jabon}$: calor específico medio del producto sólido obtenido, en kcal/kg °C.

Utilizando los datos obtenidos de la calculadora de saponificación, (73,5 % de TFM) y calculando la humedad en base húmeda del jabón a la salida del reactor (%H = 15,3) se obtiene un $\overline{Cp, jabon}$ de 0,594 kcal/kg °C.

Luego, para calcular la cantidad de energía térmica que hay que extraer del jabón que sale del reactor aplicaremos balances de energía (ecuación 25).

$$\dot{Q} = m \times \overline{Cp_{medio, jabon}} \times (T2 - T1) \quad (25)$$

Donde:

Q es la cantidad de calor a extraer.

M es la masa de jabón que sale del reactor.

T1 es la temperatura a la que el jabón sale del reactor (80 °C) y T2 es la temperatura final que el mismo debe alcanzar (40 °C).

Luego la cantidad de calor a extraer es 33.976,8 kcal.

Considerando que el fluido de enfriamiento es agua a 25 °C, que su temperatura incrementará hasta 50 °C y que su capacidad calorífica media es de 1 kcal/kg °C, podemos concluir que la masa de agua requerida para realizar el intercambio es de 1.360 kg.

Para calcular el área del intercambiador recurriremos a la ecuación 26 de intercambio calórico para un intercambiador de placas:

$$\dot{Q} = U \times A \times \Delta T_{ml} \quad (26)$$

Donde

U es el coeficiente global de transferencia de calor del intercambiador.

A es el área de transferencia de calor.

ΔT_{ml} es la diferencia de temperatura media logarítmica entre los fluidos.

Para calcular ΔT_{ml} recurriremos a la ecuación 27.

$$\Delta T_{ml} = \frac{(Th1 - Tc2) - (Th2 - Tc1)}{\ln\left(\frac{Th1 - Tc2}{Th2 - Tc1}\right)} \quad (27)$$

Donde

Th1 = Temperatura del fluido caliente en la entrada.

Th2 = Temperatura del fluido caliente en la salida.

Tc1 = Temperatura del fluido frío en la entrada.

Tc2 = Temperatura del fluido frío en la salida.

Para intercambiadores de calor de placas en operación industrial, se suele encontrar un valor de U entre 1.000 a $3.500 \text{ W/m}^2\text{°C}$ ⁽¹²⁾. Consideraremos para el cálculo el caso más desfavorable dado que los fluidos de alta viscosidad tienden a disminuir la eficiencia térmica.

Luego $U = 1.000 \text{ W/m}^2\text{°C} = 859,8 \text{ kcal /m}^2\text{°C}$

Luego, el área de transferencia del intercambiador de placas debe ser de $1,55 \text{ m}^2$.

3.3.4 LAYOUT DE LA PLANTA

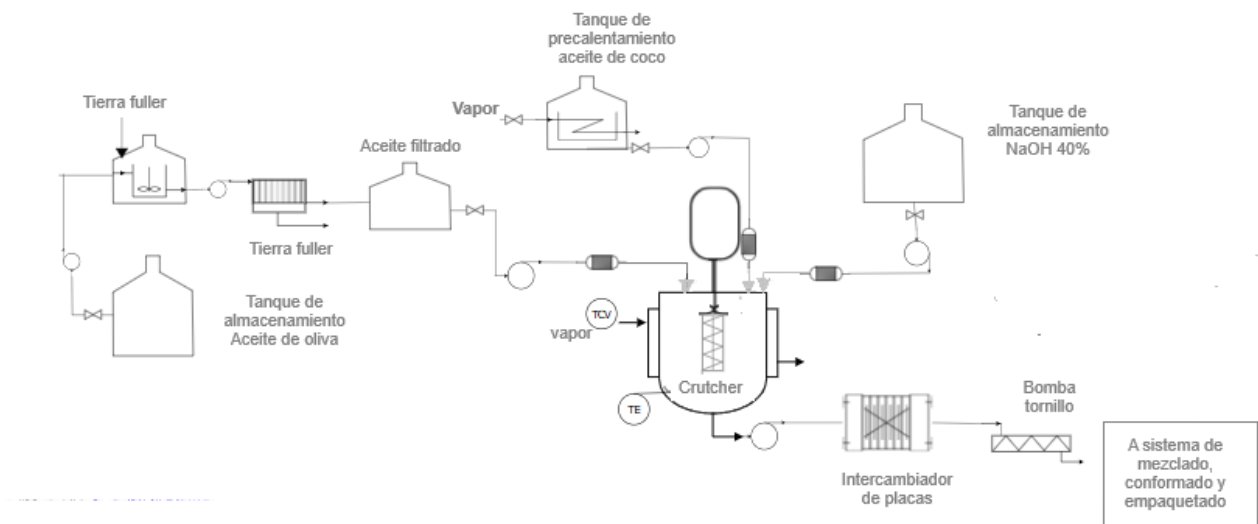


Figura 21. Layout de la planta de saponificación diseñada.

Es importante destacar que todas las bombas que lleven las materias primas al reactor deben contar con un sistema de control de caudal para asegurar la correcta dosificación de materia prima. Para ello se va a optar por el uso de bombas peristálticas o de diafragma con control de pulso y un uso de vasos comunicantes medidos.

3.3.5 DETERMINACIÓN DE LA INVERSIÓN INICIAL

Determinamos la inversión inicial de capital fijo. Para ello, se necesita estimar el costo de los equipos presentes en el proceso y los costos asociados a estos como lo son la instalación de equipos, instrumentación, tuberías, obras, terrenos, entre otros. Cabe aclarar, que solo se hará la determinación de la inversión inicial de los equipos cuya área se ha calculado por lo que se debería tener en cuenta que el valor obtenido será más bien estimativo.

COSTO DE LOS EQUIPOS

El costo de los equipos se estima mediante el sitio web <http://www.matche.com/>; los precios obtenidos del mismo son correspondientes al año 2.014.

En la tabla 15 se pueden ver los equipos utilizados para el proyecto y el costo de los mismos en función de sus dimensiones y materiales.

EQUIPO	DIMENSIONES (m³)	MATERIAL	COSTO (USD)
Tanque 1	1,1	Acero al carbono	\$15.300
Tanque 2	1	Acero al carbono	\$5.200
Tanque 3	1	Acero al carbono	\$6.200
Tanque 4	1,2	Acero inoxidable	\$24.900
Reactor	1,9	Acero inoxidable	\$86.000
ICQ	1,55	Acero inoxidable	\$17.000

Tabla 15. Costos en USD de equipos necesarios.

Nota: tener en cuenta que el tanque 1 es un tanque de tipo agitado (correspondiente al tanque en el que se mezcla el aceite de oliva con la tierra fuller), el tanque 3 es encamisado (correspondiente con el tanque pulmón de aceite de coco) y el tanque 4 es un tanque agitado (correspondiente al tanque pulmón de NaOH).

COSTO CIF Y ACTUALIZACIÓN DE PRECIOS

Los valores obtenidos se deben actualizar mediante el índice CEPCI (Chemical Engineering Plant Cost Index) usando el último índice anual disponible que corresponde al año 2.022 (816,0) y al año 2.014 (576,1) tal y como lo indica la ecuación 28:

$$Costo_{2022} = Costo_{2014} \times \frac{I_{2022}}{I_{2014}} \quad (28)$$

A su vez, para actualizar el costo del año 2022 a 2025, se utilizará un ajuste por inflación monetaria, utilizando una tasa de inflación interanual del 2 %. Luego obtenemos la ecuación 29:

$$Costo \text{ actual} = Costo_{2022}(1 + 2\%)^3 \quad (29)$$

Los precios obtenidos son precios FOB (Free on Board), que es el precio de exportación del producto. Los costos de fletes y seguros internacionales se estiman en un 20 % del costo FOB, por lo que podemos obtener los costos CIF, que son aquellos que incluyen estos costos, con la ecuación 30:

$$Costo \text{ CIF} = Costo \text{ FOB} \times 1,2 \quad (30)$$

Los cálculos realizados se muestran en la Tabla 16.

EQUIPO	DIMENSIONES (m³)	MATERIAL	COSTO 2014 (USD)	COSTO 2025 (FOB)	COSTO 2025(CIF)
Tanque 1	1,1	Acero al carbono	\$15.300	\$22.998	\$27.597
Tanque 2	1	Acero al carbono	\$5.200	\$7.816	\$9.379
Tanque 3	1	Acero al carbono	\$6.200	\$9.319	\$11.183
Tanque 4	1,2	Acero Inoxidable	\$24.900	\$37.428	\$44.913
Reactor	1,9	Acero inoxidable	\$86.000	\$129.268	\$155.122
ICQ	1,55	Acero inoxidable	\$17.500	\$26.305	\$31.565
Costo total				\$233.133	\$279.760

Tabla 16. Costos actualizados al año 2022.

COSTOS ASOCIADOS

Para obtener la inversión de capital fijo necesitaremos también calcular los costos asociados. Para ello utilizaremos el Método de los Factores Relativos (ver tabla 17).

Rubro	Porcentaje del costo del equipo entregado	Costo (USD)
COSTOS DIRECTOS		
Equipos adquiridos y entregados	100%	\$ 279.760
Instalación	47%	\$ 131.487
Instrumentación y controles	18%	\$ 50.357
Cañerías y tuberías	66%	\$ 184.642
Instalaciones eléctricas	11%	\$ 30.774
Obras civiles	18%	\$ 50.357
Mejoras de terreno	10%	\$ 27.976
Instalación de servicios	70%	\$ 195.832
Terrenos	6%	\$ 16.786
Costo directo total	346%	\$ 967.970
COSTOS INDIRECTOS		
Ingeniería y supervisión	33%	\$ 92.321
Gastos de construcción	41%	\$ 114.702
Honorarios de contratista	21%	\$ 58.750
Eventuales	42%	\$ 117.499
Costo indirecto total	137%	\$ 383.271

Tabla 17. Costos directos e indirectos.

Podemos concluir entonces que el costo total de inversión de capital fijo sería de USD 1.351.241.

CAPÍTULO 3: SUSTENTABILIDAD Y CONCLUSIONES

3.1 PLANTAS SUSTENTABLES SEGÚN NORMAS ISO

De acuerdo con los lineamientos de las normas internacionales ISO, una planta se considera sustentable cuando adopta un enfoque de producción que minimiza los impactos negativos sobre el medio ambiente, optimiza el uso de los recursos naturales y promueve la mejora continua de su desempeño ambiental.

La norma ISO 14001:2015 establece los requisitos para implementar un Sistema de Gestión Ambiental (SGA) eficaz. Este sistema debe identificar y controlar los aspectos e impactos ambientales de la operación industrial (como emisiones, residuos o consumo energético), prevenir la contaminación, asegurar el cumplimiento de la legislación vigente y fomentar prácticas responsables en toda la organización. Por su parte, la ISO 14046:2014 complementa este enfoque al introducir el concepto de huella hídrica, que permite evaluar y reducir el impacto de la planta sobre los recursos hídricos, tanto en términos de consumo como de contaminación. Una planta alineada con esta norma debe analizar el uso del agua a lo largo de todo el ciclo de vida de sus productos y procesos, buscando alternativas para disminuir su demanda o evitar la generación de efluentes.

3.2 CONCLUSIÓN

El desarrollo de esta tesis permitió diseñar una planta de producción de jabón sólido que cumple con los objetivos técnicos, económicos y ambientales establecidos. Se proyectó una producción anual de 1.000 toneladas de jabón neto, formulado exclusivamente con materias primas naturales, como aceites vegetales, colorantes minerales y aceites esenciales. La elección de estos ingredientes, libres de compuestos sintéticos o de origen animal, lo que permite ofrecer un producto vegano y natural (en línea con las tendencias actuales del mercado).

Desde el punto de vista técnico, se dimensionaron los principales equipos del proceso: cuatro tanques de tratamiento de materias primas con volúmenes de entre 1 y 1,2 m³, un reactor de saponificación de 1,9 m³ y un intercambiador de calor de 1,55 m³. Se optó por una modalidad de producción semi-hervida y discontinua, que minimiza la generación de residuos y no produce efluentes líquidos contaminantes. Estas decisiones operativas reflejan un enfoque alineado con los principios de las normas ISO 14001:2015 e ISO 14046:2014.

En cuanto al análisis económico, se estimó una inversión total de capital fijo de USD 1.324.748.

Por otro lado, se incorporaron criterios de sustentabilidad en todo el proceso, desde la elección de un proceso de producción semi-hervido y discontinua, que no genera efluentes líquidos ni residuos contaminantes (más allá de lo generado en el proceso de prensado), hasta el diseño del empaque, que reemplaza el plástico por cartón reciclable y reduce el uso de materiales por unidad de producto, además de la elección de la forma del jabón, que también respondió a criterios de eficiencia y reducción de pérdidas. Estas decisiones técnicas reflejan un enfoque coherente con los principios de la norma ISO 14001:2015, que promueve

la prevención de la contaminación, la gestión responsable de los recursos y la mejora continua del desempeño ambiental. A su vez, también reflejan un enfoque coherente con los principios de la norma ISO 14046:2014, al disminuir en gran medida la generación de efluentes.

En conjunto, el diseño propuesto no solo responde a los requerimientos del proyecto, sino que plantea un modelo productivo comprometido con el cuidado ambiental. La planta diseñada representa así una solución integral que conjuga viabilidad técnica y responsabilidad ambiental, alineándose con las demandas del consumidor actual y con los desafíos de la industria de higiene personal en un contexto de sostenibilidad creciente.

REFERENCIAS:

- (1) Informe de Expertos. (2025). *Mercado de jabón, participación, crecimiento 2025-2034*. Informes de Expertos. <https://www.informesdeexpertos.com/informes/mercado-de-jabon>
- (2) Hernández Mérida, M. de los Á. (2015). Determinación del índice de saponificación en aceite de maíz usando una lipasa de procedencia nacional. Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias, Departamento de Química, Laboratorio de Polímeros.
- (3) Spitz, L. (2010). *Soap manufacturing technology*. AOCS Publishing.
- (4) Bailey, Alton E. (1984). "Aceites y grasas industriales". Ediciones Reverté.
- (5) Flores Rodríguez, M. (2017). *Ingeniería básica de una planta de producción de jabón sólido* (Trabajo de Fin de Grado). Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, Sevilla.
- (6) Ortega Font, R. (2009). Diseño, implementación y automatización de una planta piloto de saponificación (Tesis de maestría). Universitat Politècnica de Catalunya, Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Telecomunicació de Barcelona. Barcelona, España.
- (7) Orellana Martínez, K. D. (2019). *Comparación de las propiedades físicoquímicas y organolépticas de un jabón cosmético elaborado a partir de base de aceite de coco y de aceite de oliva a escala laboratorio* (Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química).
- (8) Perry, N., & Metzger, J. (1996). "Antibacterial activity of essential oils from Eucalyptus and other species." *Journal of Essential Oil Research*.
- (9) Chalco Sanchez, J. G., & Serrano Nuñez, G. J. (2017). *Estudio técnico económico para la elaboración de jabón industrial a partir del aceite vegetal usado (AVU) de los restaurantes de la ciudad del Cusco - 2016* Tesis de pregrado, Universidad Andina del Cusco, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Industrial]. Cusco, Perú.
- (10) Gunstone, F. D. (2004). *Coconut oil: Chemistry and technology*. In *Vegetable Oils in Food Technology: Composition, Properties and Uses* (pp. 136-146). Blackwell Publishing.
- (11) IndexMundi. (n.d.). *Precios de mercado*. IndexMundi. Recuperado el 17 de marzo de 2025, de <https://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/>
- (12) Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2007). *Introduction to Heat Transfer* (6ª edición). John Wiley & Sons.
- (13) Cátedra de Química Orgánica, Departamento de Ingeniería de Procesos y Gestión Industrial. (2022). *Trabajo práctico: Lípidos. Saponificación de grasas. Obtención de jabón* [Trabajo práctico]. Universidad Nacional de Tucumán.

⁽¹⁴⁾ Vallejo, N., & Martínez, D. I. (2004). Propuesta cinética y mecanismo de la saponificación de triacilglicéridos extraídos de la palma de aceite africana *Elaeis guineensis* L. *Química Industrial*, Universidad Tecnológica de Pereira, Programa de Química Industrial.

⁽¹⁵⁾ Mendrullandia. (s.f.). *Calculadora de saponificación*. <https://calc.mendrullandia.es/>

⁽¹⁶⁾ *Cosmetic Formulation: A Practical Guide*” de D. G. Watkins.

⁽¹⁷⁾ Fogler, H. S. (2008). *Elements of chemical reaction engineering* (4th ed.). Prentice Hall.