

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

Estudio de factibilidad de un proceso de recuperación de aceite de palma para su potencial reutilización y venta

Diego Nicolás Larrea Román

Ingeniería Química

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de Ingeniero Químico

Quito, 05 de mayo de 2021

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

Estudio de factibilidad de un proceso de recuperación de aceite de palma para su potencial reutilización y venta

Diego Nicolás Larrea Román

Nombre del profesor, Título académico

José Álvarez, Ph.D.

Nombre del profesor, Título académico

Juan Diego Fonseca, Ph.D.

Quito, 05 de mayo de 2021

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que, los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Diego Nicolás Larrea Román

Código: 00135786

Cédula de identidad: 1721988903

Lugar y fecha: Quito, 05 de mayo de 2021

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>.

RESUMEN

Este proyecto analiza la pre-factibilidad de la implementación de un innovador método de recuperación de aceite. Primero, se definió que el proceso más adecuado para implementar es un método de extracción por solvente asistido por una fuerza mecánica para una recuperación de 2,000 toneladas de aceite anuales. Luego, se realizó la selección de las operaciones unitarias en las que consiste el proceso y sus balances de masa y energía; posteriormente, se definieron y seleccionaron los equipos necesarios para la planta de procesamiento. De la misma forma, se define que la principal aplicación del aceite recuperado es para la generación energética como combustible. Finalmente, se realizó un análisis económico en base a la estimación de costos de los equipos. Se encuentra que de haber una venta total de los productos el proyecto sería rentable. La implementación de este proyecto generaría un impacto positivo para la industria de refinación de aceite vegetal y el medio ambiente.

Palabras clave: blanqueo, extracción por solvente, extracción sólido-líquido, reutilización.

ABSTRACT

This project analyzes the pre-feasibility of the implementation of an innovative method for recovery of oil. In the first place, it was defined that the process most suitable for implementation is an ultrasound-assisted solvent extraction followed by calcination for the recovery of 2,000 tons of oil per year. Then, the selection of the unit operations in which the process consists of and its mass and energy balances were carried out; later, the necessary equipment was defined and selected. In the same way, it is defined that the main application of the recovered oil is for energy generation as fuel. Finally, an economic analysis was carried out based on estimate equipment costs; it was found that the project is profitable. The implementation of this project would generate a positive impact for the vegetable oil refining industry and the environment.

Key words: bleaching, solvent extraction, solid-liquid extraction, reuse

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN	10
1.1.	Antecedentes del proyecto	10
1.2.	Justificación para la implementación del proyecto	10
1.3.	Objetivos del proyecto	11
1.3.1.	Objetivo general.....	11
1.3.2.	Objetivos específicos	12
1.4.	Resultados esperados de la implementación del proyecto	12
2.	BASES DEL DISEÑO.....	13
2.1.	Descripción de los productos	13
2.2.	Descripción de materias primas	14
2.3.	Tecnologías actuales de recuperación de aceite y regeneración de tierras agotadas	15
2.3.1.	Extracción por solventes	15
2.3.2.	Procesos térmicos.....	16
2.3.3.	Tratamientos químicos.....	16
2.3.4.	Métodos combinados	17
2.4.	Situación actual de los mercados aplicables al proyecto	18
2.4.1.	Aplicaciones del aceite recuperado.....	18
2.4.2.	Aplicaciones de las tierras regeneradas	19
2.5.	Limitaciones y normas	19
2.6.	Terminología especializada	20
2.6.1.	Acrónimos.....	20
2.6.2.	Términos	20
3.	DISEÑO DEL PROCESO	22
3.1.	Métodos de extracción asistidos por un efecto mecánico	22
3.2.	Definición de los criterios de selección	22
3.3.	Selección del proceso.....	22
4.	DISEÑO DE LA PLANTA DE PROCESAMIENTO.....	24
4.1.	Definición del caudal de producción	24
4.2.	Descripción del proceso a ser implementado como planta de regeneración	24
4.3.	Selección y dimensionamiento de los equipos.....	25
4.4.	Consumo energético de los equipos.....	27
5.	ANÁLISIS ECONÓMICO	28
5.1.	Estimación de costos de la planta de producción.....	28
5.2.	Estimación de costos de capital fijo, capital de trabajo y costos de producción	29

5.3. Estimación de ingresos	30
5.4. Análisis de tiempo de recuperación de la inversión inicial.....	30
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	32
7. REFERENCIAS.....	33
AGRADECIMIENTOS	35

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1. Precios de venta y comercial de los productos según los proveedores.....	13
Tabla 2.Especificaciones de los equipos cotizados para el proceso de implementación.....	25
Tabla 3.Especificaciones de los equipos dimensionado para el proceso de implementación.	26
Tabla 4.Resumen del balance de energía y requerimiento energético para el proceso a ser implementado.....	27
Tabla 5.Resultados de la estimación de los costos de capital fijo, capital de trabajo y los costos efectivos de producción.	30
Tabla 6. Resumen de los resultados obtenidos del análisis de recuperación.	30

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes del proyecto

En el año 2016 se registró que la producción de aceite de palma en el Ecuador fue de 350 mil toneladas métricas (FEDAPAL, 2017). Las tierras de blanqueo son un recurso necesario para dicha producción ya que son usadas para la eliminación de impurezas en el llamado proceso de blanqueamiento (también referido en inglés como “*bleaching*”).

En el proceso de refinación de aceite de palma, se estima el uso de 1–2 % en masa de tierras de blanqueo por cada tonelada de aceite procesado (Haro, De-la-Torre, Aragón, & Guevara, 2012). A nivel mundial se aproxima que más de 120 millones de toneladas de aceite de palma son procesadas por medio del uso de tierras de blanqueo. Además las tierras de blanqueo contienen un porcentaje de entre 20–40 % en peso de aceites residuales, lo cuales son desperdiciados por la industria de refinación de aceites ya que las tierras agotadas usualmente son desechadas al relleno sanitario (Beshara & Cheeseman, 2014).

1.2. Justificación para la implementación del proyecto

El presente proyecto nace de la cooperación entre la empresa privada y la Universidad San Francisco de Quito; en este, se tiene como necesidad elaborar un proceso a ser implementado para la recuperación de aceite. El método propuesto en este proyecto se basa en el uso innovador de una técnica mecánica para la extracción del aceite, el cual tiene un rendimiento mayor que los métodos tradicionales que se encontraron en la literatura y que serán descritos en la sección 2.3. Los productos obtenidos del proceso tienen un valor considerable, por lo que su implementación puede traer un beneficio económico para la industria. Por medio de la comercialización o la posible

reutilización de los productos sería posible conseguir una reducción de costos de operación y de insumos, así como una nueva fuente de ingresos. Estos ingresos estarán en función de las características de los productos y las aplicaciones pertinentes; este tema se describe en la sección 2.4.

Para el diseño de dicho proceso, se utilizará como base de cálculo, las cifras de residuos de una empresa nacional productora de aceite comestible, con una composición alta de aceites contenidos; en vista de esto, existe una potencial oportunidad de revalorizar lo que se considera un desecho para la empresa, y con ello reducir su impacto ambiental y aumentar sus réditos.

Asimismo, se estima en primera instancia que el margen bruto del proyecto posea valores positivos, por lo que, este proyecto de implementación es potencialmente rentable. Para hacer esta estimación se usaron los valores de las materias primas, que serán discutidas en la sección 2.2. Además, se consideró el caudal de producción y precio de venta para establecer un estimado de los ingresos; éstos serán tratados en el capítulo 5. Con base a esto, se encontró un margen bruto preliminar de aproximadamente un millón de dólares, por lo que se esperaba que el proyecto sea favorable.

1.3. Objetivos del proyecto

1.3.1. Objetivo general

Analizar la factibilidad técnico-económica de la implementación de un proceso de recuperación de aceite de palma por medio una técnica mecánica para su potencial reutilización y venta.

1.3.2. Objetivos específicos

Se plantean los siguientes objetivos específicos, los cuales serán desarrollados respectivamente en los capítulos: 3, 4 y 5 con el fin de alcanzar el objetivo general.

1. Definir la tecnología más adecuada para el proceso de recuperación de aceite de palma (Capítulo 3).
2. Diseñar el proceso y la correspondiente planta de procesamiento (Capítulo 4).
3. Realizar un análisis económico para determinar la rentabilidad de la implementación del proceso propuesto (Capítulo 5).

1.4. Resultados esperados de la implementación del proyecto

Una vez alcanzados los objetivos planteados en la sección 1.3 se espera que el proyecto pueda ser implementado y que tenga un impacto positivo dentro de la industria en términos económicos, sociales y ambientales. El proceso de implementación de recuperación de aceite permitiría una diversificación de la oferta al mercado de la empresa ya que ofertaría nuevos productos. Por otro, al tratar estos desechos que representan una problemática ambiental también se los estaría revalorizando y al mismo tiempo se estaría reduciendo los costos de tratamiento de los mismos. A nivel social, el impacto positivo se vería reflejado en la generación de plazas de trabajo.

En adición, se generaría un impacto positivo en términos del aporte al desarrollo e investigación de métodos no convencionales para la recuperación de aceite; éste reporte podría ser usado como referencia para la implementación de nuevas y más eficientes técnicas que no tienen muchos antecedentes en la literatura ni en la industria.

2. BASES DEL DISEÑO

2.1. Descripción de los productos

Se proyecta generar dos productos diferentes: se plantea recuperar el aceite vegetal con un contenido mínimo de etanol y que cumpla las características necesarias para funcionar como aceite para la generación de energía (Rousset, 2008). Por otro, las tierras regeneradas (RBE) con una tasa de decoloración mayor del 75%, una tasa de filtración mayor al 5% y una densidad de entre el 0.7-1.1 g mL⁻¹.

Estos productos, dependiendo del proceso utilizado para su recuperación y sus características finales, pueden tener varios usos. En cuanto al aceite recuperado, su aplicación es destinada a la generación energética ya que puede ser utilizado como combustible o como aceite térmico, así como para la producción de biocombustibles; esto se ampliará en la sección 2.4. Mientras que las RBE, estas pueden ser consideradas para reutilización dentro del proceso de blanqueamiento. Tanto la presentación como el precio de los diferentes productos se establecieron de acuerdo a las características y detalles distintivos de productos similares encontrados en el mercado. Por un lado, la presentación comercial de las tierras regeneradas es en costales de diez kilos, de fibras sintéticas recubiertas, mientras que para el aceite el envasado consiste en canecas, de cinco galones, de polietileno. Con respecto a los precios de los productos se establece que:

Tabla 1. Precios de venta y comercial de los productos según los proveedores.

Producto	Precio de venta	Precio Comercial	Proveedores
Tierras Regeneradas	0.6 [USD/kg]	0.7 [USD/kg]	Fedepal
Aceite Recuperado	1.2 [USD/kg]	0.4 [USD/kg]	Leping Jiejing Bleaching Earth

Los productos deben ser almacenados y transportados en lugares secos y con ventilación. Dada la naturaleza inflamable del aceite, éste no se debe disponer cerca de sustancias que puedan generar ignición.

2.2. Descripción de materias primas

Las tierras agotadas son una de las materias primas más importantes del proyecto (SBE). Las SBE provienen de procesos de blanqueo de aceite crudo vegetal. Por ello, las tierras agotadas van a ser obtenidas de los desechos generados por la industria de refinación de aceite vegetal con fines alimenticios.

Dependiendo del proceso se requiere una serie de materias primas adicionales. Primero, en la etapa de extracción de aceite de las tierras agotadas es necesario el uso de un solvente que sea afín con el aceite de palma, por lo que se podrían utilizar MEK, metanol, etanol, y acetona, entre otros. Luego, en la etapa de tratamiento de tierras agotadas desaceitadas es necesario una corriente de agua. Para la regeneración de la tierra agotada desaceitada se puede optar por un tratamiento ácido en el cual se usa ácido sulfúrico o clorhídrico; sin embargo, también se puede optar por un proceso térmico. Por otro lado, para el proceso de recuperación del aceite es necesario un método de separación del aceite y el solvente. Esto se puede lograr por medio de una unidad de evaporación, destilación, o extracción líquido-líquido; con ello, se plantea la recirculación del solvente al proceso y la obtención del aceite. Cabe mencionar que una parte del solvente estará presente en la corriente de aceite como producto final, por lo que es necesario considerar una corriente de reposición del solvente.

2.3. Tecnologías actuales de recuperación de aceite y regeneración de tierras agotadas

En la literatura se presentan varios métodos para la recuperación de aceite y la regeneración de tierras agotadas. A continuación, se presentarán las tecnologías, en orden desde las más usadas a las de menor uso. Dependiendo del método de recuperación/regeneración se puede llegar a obtener un producto diferente: si solo se quiere regenerar las tierras se puede optar por métodos de extracción de impurezas seguidos de técnicas de activación como procesos térmicos o el uso de ácidos inorgánicos como ácido sulfúrico o clorhídrico; si por lo que se opta es solo la recuperación del aceite contenido, se utilizan técnicas de extracción con solventes orgánicos, agua o fluidos supercríticos; por otro lado, si el objetivo es la regeneración de las tierras y la recuperación del aceite, entonces se emplean métodos combinados como extracción por solvente seguida por procesos de activación. La tecnología delimita tanto el diseño como la selección de los equipos, y es por ello, que se debe escoger el proceso más conveniente para el aprovechamiento de estas tierras agotadas.

2.3.1. Extracción por solventes

La extracción por solventes es uno de los métodos más comúnmente utilizados dentro de las tecnologías de recuperación de aceite y regeneración de SBE. Este método consiste en la remoción de los aceites residuales e impurezas contenidas en las tierras agotadas usando un solvente orgánico por medio de extractores, los mismos que pueden ser tornillos de prensado o recipientes especializados (Haro, De-la-Torre, Aragón, & Guevara, 2012). Dependiendo del tipo de aceite, se pueden considerar varias alternativas de solvente, sean estos polares o no polares. Entre los solventes polares, se nombran al metiletilcetona (MEK), acetona, alcohol isopropílico o cloroformo, mientras que entre los solventes no polares comunes se encuentran el benceno, xileno,

tolueno y hexano. La elección del solvente determina la eficiencia de la extracción del aceite, la calidad de las tierras regeneradas, el costo de materia prima, complejidad de operación, además de diferentes condiciones de almacenamiento, manipulación y seguridad (Mu & Wang, 2019).

2.3.2. Procesos térmicos

El objetivo central del método por procesos térmicos es eliminar las impurezas contenidas en las tierras agotadas para su regeneración y activación aplicando calor (Haro, De-la-Torre, Aragón, & Guevara, 2012). Entre estas técnicas se encuentran la pirólisis y la calcinación. La pirólisis es un proceso termoquímico de descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno, mientras que la calcinación es un proceso térmico en el que se somete directamente a las tierras agotadas a temperaturas en el rango de 400 a 700 °C por un tiempo determinado que puede variar entre 15 a 300 minutos para luego realizar una segunda activación o una molienda y tamizado (Alhamed & Al-Zahrani, 2002). En esta técnica, el control de la temperatura es un factor determinante en el grado de activación de las tierras; se encontró en la literatura que a temperaturas superiores a los 500 °C se puede modificar la estructura de las tierras, por lo que su reutilización no sería una opción viable; sin embargo, si la temperatura del proceso está entre 400-500 °C se encontró que su regeneración es factible (Al-Zahrani & Daous, 2000).

2.3.3. Tratamientos químicos

Los tratamientos químicos corresponden a varias técnicas tales como tratamientos con ácidos o activación con bases. El tratamiento ácido consiste en someter a las tierras en un reactor en agitación en un rango de temperatura de 25 a 100 °C durante 120 minutos con ácidos inorgánicos, por ejemplo el ácido clorhídrico o el ácido sulfúrico (Alhamed & Al-Zahrani, 2002), después de

que éstas hayan sido tratadas por un proceso térmico o una extracción. Este método es una buena alternativa debido al alto rendimiento de activación. Por otro lado, la activación con bases es un método que usa bases comunes en reacción a temperaturas alrededor de 100 °C. Las tierras regeneradas obtenidas han mostrado que pueden ser usadas como un absorbente de alta calidad en aplicaciones agrícolas (Mu & Wang, 2019).

2.3.4. Métodos combinados

En la literatura es común encontrar que varios de los procesos detallados anteriormente están combinados; al usar varios métodos combinados en la recuperación de aceite y regeneración de las tierras agotadas se puede aumentar la eficiencia y calidad del producto. Los métodos combinados son la alternativa que presenta un costo reducido y un buen rendimiento para obtener una operación óptima y un aprovechamiento total de las tierras agotadas ya que por medio de estos procesos se puede tener una extracción del aceite contenido, así como la regeneración de las SBE con la calidad suficiente para propósitos como la reutilización (Mu & Wang, 2019). Los métodos combinados más usados son: extracción por solventes - tratamiento térmico, y activación ácida – tratamiento térmico.

2.3.4.1. Extracción por solventes - Tratamiento térmico

La combinación de las técnicas de extracción por solventes seguido por tratamiento térmico es uno de los métodos más explorados industrialmente. Esta técnica inicia con la extracción con solvente detallada en la sección 2.3.1. En dicha etapa se logra separar los contenidos de aceite de las SBE. En este punto se tiene dos corrientes: una es la mezcla de aceite recuperado y solvente, y la otra es una corriente de tierra agotada desaceitada. Esta última se pasa a un proceso de calcinación a las

temperaturas mencionadas en la sección 2.3.2. y con ello se obtiene como producto final tierras regeneradas. Por otro lado, la mezcla de solvente y aceite recuperado pasa por un sub-proceso de separación, en el cual se logra recuperar el aceite y se puede recircular el solvente a la etapa de extracción.

2.3.4.2. Activación ácida – tratamiento térmico

Este método combinado consiste en una impregnación con un ácido inorgánico, como se mencionó en la sección 2.3.3, para su posterior tratamiento térmico como se denotó en la sección 2.3.2. Según los estudios de (Boukerroui & Ouali, 2000), este proceso puede requerir una relación de tierras agotadas–ácido de 1:5 en peso, mientras que en el proceso térmico, la temperatura puede variar desde 300 hasta 800 °C. Esta técnica presenta un alto rendimiento en la regeneración de SBE; sin embargo, para poder recuperar el aceite es necesario una etapa prensado hidráulico.

2.4. Situación actual de los mercados aplicables al proyecto

Dado que los productos que se espera obtener no están dentro de una categoría comercial definida, es necesario identificar cuáles son sus posibles aplicaciones y en función a ello seleccionar el mercado en el cual se pueden tener un mayor impacto. Para ello, se debe identificar tanto las posibles aplicaciones para las tierras regeneradas como para el aceite recuperado. A continuación, se describen algunas de sus posibles aplicaciones.

2.4.1. Aplicaciones del aceite recuperado

La cantidad y calidad del aceite recuperado van a depender del proceso escogido, y su aplicación va a estar limitada por las características del aceite obtenido al final del proceso; sin embargo, se

pueden reconocer tres posibles aplicaciones: la primera es el uso del aceite como medio de generación energética, es decir, como un combustible tanto para la industria (Rousset, 2008) como para la calefacción como un *heating oil* (Department of Energy, 2011); la segunda es el uso del aceite como un medio térmico en el transporte de calor (Kroil, 2018); finalmente, la tercera posible aplicación es como una materia prima para la manufactura de biocombustibles como el biodiesel o biogás (Cortés-Gómez & Torres-Cruz, 2016).

2.4.2. Aplicaciones de las tierras regeneradas

Las tierras regeneradas pueden llegar a tener varias aplicaciones dependiendo del proceso y de la calidad final de las mismas; sin embargo, la principal utilización que se quiere tener es su reutilización en el proceso de refinación de aceite. Además pueden ser usadas en la manufactura de elementos de construcción (Cortés-Gómez & Torres-Cruz, 2016), en procesos de purificación de agua (Mu & Wang, 2019) o como un aditivo en tierras de cultivo (Cortés-Gómez & Torres-Cruz, 2016).

2.5. Limitaciones y normas

Debido a estos factores de incertidumbre, un factor limitante son las características tanto de las tierras regeneradas como del aceite recuperado por medio de la aplicación de esta tecnología. Dependiendo de las características de los productos, se puede determinar su aplicación y fin comercial. Por otro lado, se tiene que considerar las normativas de calidad, manejo y desechos que los productos deben cumplir para ser utilizados a nivel comercial. Además, dependiendo del análisis experimental se puede determinar a qué normativa aplicarían los productos.

Por otro lado, otro factor importante a considerar es la elección del solvente ya que es determinante en cuanto al rango de efectividad en la extracción de aceite contenido en las tierras agotadas (Lee, Seng, & Liew, 2000). Por esta razón, dependiendo de la elección de solvente se esperaría tener un rendimiento y una cantidad de aceite extraído diferentes (Lee, Seng, & Liew, 2000).

2.6. Terminología especializada

2.6.1. Acrónimos

SBE: Tierras agotadas (*Spent bleaching earths*)

RBE: Tierras regeneradas (*Regenerated bleaching earths*)

2.6.2. Términos

Tierras de blanqueo: Materia prima utilizada para el proceso de purificación del aceite crudo. Éstas están destinadas para la remoción de fosfolípidos, ácidos grasos, y metales.

Tierras agotadas: Son producto del proceso de blanqueo del aceite vegetal. Pueden llegar a tener un porcentaje de aceite retenido del proceso de blanqueo que va del 20 al 40% en peso (Mu & Wang, 2019).

Tierra regenerada: Tierra obtenida del proceso de regeneración a partir de tierra de blanqueo. Esta contiene un porcentaje de aceite menor y puede ser reutilizada dentro del proceso de blanqueo o como materia prima para otros procesos.

Aceite recuperado: Aceite obtenido después del proceso de recuperación/regeneración de tierras agotadas de blanqueo.

Blanqueo: Operación por la cual se reducen los porcentajes de pigmentos como carotenoides y clorofila. Además, se eliminan residuos como fosfáticos, jabones, metales, etc. Este proceso se da por medio de la adsorción con tierras activadas a presiones bajas y temperaturas altas (Fediol, 2020).

Extracción por solvente: Método para eliminar el aceite residual y algunas impurezas dentro de la tierra de blanqueo (Mu & Wang, 2019).

Tratamiento térmico: Proceso a altas temperaturas para activar las tierras de blanqueo agotadas luego del proceso de extracción por solvente (Salazar, 2019) & (Haro, De-la-Torre, Aragón, & Guevara, 2012).

3. DISEÑO DEL PROCESO

El diseño del proceso de recuperación de aceite se basa en la metodología encontrada en la literatura y en la sección 2.3. En este capítulo, se definirá cuál es el proceso más adecuado para la implementación del proyecto.

3.1. Métodos de extracción asistidos por un efecto mecánico

Uno de los métodos innovadores encontrados en la literatura para la recuperación del aceite de las tierras de blanqueo agotadas es la extracción por solventes asistida por un efecto mecánico, el mismo representa una mejora en la eficiencia de extracción del aceite contenido.

3.2. Definición de los criterios de selección

De los procesos detallados en la sección 2.3 y en la información descrita en la sección 3.1, se define que los posibles procesos a implementarse para la recuperación del aceite son una extracción con solvente, un proceso de calcinación, y el método combinado de extracción por solvente seguido por el proceso de calcinación. Estos métodos serán comparados con el método innovador de extracción por solventes asistida por efecto mecánico seguida por una calcinación. Los criterios de selección definidos para establecer la comparación fueron: la selección del solvente, costo de la materia prima, la eficiencia de extracción y la calidad del aceite recuperado y las tierras regeneradas, la complejidad del proceso y la seguridad.

3.3. Selección del proceso

Por medio de los criterios de selección detallados en la sección 3.2, se elaboró una matriz de decisión para poder comparar a los posibles procesos.

Si se considera al solvente se tendría la misma disponibilidad de la materia para todos los casos. Por otro lado, la eficiencia hace referencia a la cantidad de aceite que puede ser recuperado en la extracción por solvente. Se espera que en el proceso asistido por efecto mecánico tengo una eficiencia mayor y con ello se obtenga una cantidad mayor de aceite. En cuanto a complejidad del proceso para todos es similar ya que comparten las mismas etapas; sin embargo, si se opta por el uso de la técnica de fuerza mecánica se debe añadir una etapa más lo cual hace que este proceso sea más complejo en la implementación.

En cuanto a la seguridad, salud y ambiente, en los procesos que cuentan con la extracción, se trabajan con solventes orgánicos, para los cuales se deben tener las medidas pertinentes tanto para el manejo como en caso de algún accidente. Otra consideración es la utilización de factor mecánico, esto hace que este proceso tenga más riesgos en el ámbito de la salud ya que puede traer consecuencias perjudicables al personal.

De dicho análisis de decisión, se determinó que el proceso que debe ser implementado es el método de extracción por solvente asistida por un efecto mecánico seguida por un proceso de calcinación. Esto se debe a que la eficiencia de extracción del aceite y la calidad de las tierras regeneradas son mejores comparándolos con los procesos tradicionales; este método tiene un enfoque de innovación que, aunque sea un proceso un poco más complejo que los otros, no es un inconveniente debido a las altas expectativas que genera su adaptación e implementación.

4. DISEÑO DE LA PLANTA DE PROCESAMIENTO

El diseño de la planta de procesamiento para la recuperación de aceite por medio de extracción asistida y calcinación se basa en la metodología en la literatura. En este capítulo se indicará el caudal de producción, la descripción detallada del proceso con sus operaciones unitarias, y equipos.

4.1. Definición del caudal de producción

El caudal de producción que sirve como base de cálculo para este proyecto fue establecido como el caudal de recuperación de aceite, el cual es aproximadamente de 2 mil toneladas.

4.2. Descripción del proceso a ser implementado como planta de regeneración

Este proceso se divide en tres etapas: la primera es la extracción, la segunda es la activación de las tierras regeneradas, y la tercera es la recuperación del aceite.

La primera etapa comprende en la alimentación de las tierras agotadas y la alimentación de solvente a un tanque durante un tiempo y temperatura determinados; esta corriente pasa a un tanque extractor. Finalizado este proceso, esta corriente pasa por un proceso de separación en un equipo de filtrado de prensa donde se obtiene una corriente de tierras desaceitadas y una corriente de aceite y solvente. La segunda etapa, de activación, retoma la corriente de tierras desaceitadas, la cual es llevada a un tanque de lavado, y luego sometida a un horno de calcinación. La tercera etapa, para la recuperación de aceite, se da por un proceso de destilación, del cual se obtiene el aceite recuperado y una corriente de solvente.

4.3. Selección y dimensionamiento de los equipos

La selección y dimensionamiento de los equipos se dividió en dos partes. En la primera (tabla 2) se muestran las características de los equipos cotizados en los catálogos de proveedores en línea.

Tabla 2. Especificaciones de los equipos cotizados para el proceso de implementación.

Equipo	Parámetro		
Tanque de extracción I	Capacidad [kg/h]	Potencia [kW]	
	437.80	18.00	
Filtrado de prensa	Capacidad [kg/h]	Potencia [kW]	Dimensiones [mm]
	429.07	1.30	2000x785x1040
Horno de calcinación	Capacidad [kg/h]	Potencia [kW]	Espacio efectivo [mm]
	251.19	25.00	1200x3000
Pulverizador	Capacidad [kg/h]	Potencia [kW]	Finura [um]
	143.33	33.50	15-250

Mientras que la segunda parte (tabla 3) consiste en las características y especificaciones de los equipos dimensionados para el proceso.

Tabla 3. Especificaciones de los equipos dimensionado para el proceso de implementación.

Tanque de extracción II					
Capacidad [Kg/h]	Volumen [m ³]	Masa [kg]	Potencia [kW]	Espesores [m]	
437.80	0.62	609.19	1.32	Pared	0.005
				Terminal plana	0.034
				Terminal elíptica	0.005
Tanque de lavado					
Capacidad [Kg/h]	Volumen [m ³]	Masa [kg]	Potencia [kW]	Espesores [m]	
929.33	1.14	991.88	3.25	Pared	0.005
				Terminal plana	0.039
				Terminal elíptica	0.005
Tanque de lavado					
Capacidad [Kg/h]	Volumen [m ³]	Masa [kg]	Potencia [kW]	Espesores [m]	
220.00	0.33	345.74	3.98	Pared	0.005
				Terminal plana	0.027
				Terminal elíptica	0.005
Columna de Destilación					
Capacidad [Kg/h]	Volumen [m ³]	Masa [kg]	Altura [m]	Adicionales	
223.46	1.08	359.63	6.04	Espesor pared [m]	0.005
				No. platos	18
				Diámetro [m]	0.5
Condensador					
Capacidad [Kg/h]	Volumen [m ³]	Flujo de agua [kg/h]		Adicionales	
172.89	0.26	1,111.02		Potencia [kW]	(57.71)
Bomba	Tipo	Flujo [kg/h]	Potencia [kW]	Adicionales	
	Centrifuga	220.00	0.0015	Eficiencia [%]	0.65

4.4. Consumo energético de los equipos

El balance de energía y el consumo energético de la planta de procesamiento está presentado en la tabla 4.

Tabla 4. Resumen del balance de energía y requerimiento energético para el proceso a ser implementado.

Resumen balance de energía		
Balance de energía total	228.36	[kW]
Consumo energético	1,598.50	[kW] por lote
Consumo energético	7,992.51	[kW] al día

Por medio del balance de energía, se determina que el consumo energético mensual que requiere la planta de producción es de aproximadamente 239,775.19 kW. Se debe considerar que todos los equipos que fueron seleccionados trabajan por medio de una fuente eléctrica. Una vez que se tiene la selección y las características de los equipos se puede realizar la estimación de los costos de la planta.

5. ANÁLISIS ECONÓMICO

En esta sección se van a describir los elementos de los costos de la planta, como lo son: capital fijo, costos de producción, y capital de trabajo, así como los componentes de ingresos. Una vez que se tiene estimado el costo de la planta se establece el flujo de caja del proyecto, y con ello estima la rentabilidad de la planta y el tiempo de recuperación. Por último, se analizará algunos escenarios aplicables y como estos pueden variar la rentabilidad del proyecto. La estimación de costos se basa en el costo de los equipos teóricos detallada en el libro de “Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design” de Sinnott y Towler y en el costo disponible encontrado en las cotizaciones por catálogos en línea.

5.1. Estimación de costos de la planta de producción

Para los costos de *Inside Battery Limits* (ISBL) se parte en base al costo de los equipos; donde se empleó un sistema híbrido usando la estimación teórica de costos de los equipos basada en información histórica y los costos disponibles de los equipos encontrada en las cotizaciones actualmente en los catálogos en línea.

El ISBL comprende los costos del inmueble de la planta, por lo que se parte del costo de los equipos y los factores de instalación; se va a trabajar por medio de tres métodos: el método factorial de Lang, el método factorial de Hand y el método factorial detallado. El método factorial de Lang consiste en el análisis del tipo de procesamiento que van a realizar los equipos y dependiendo de ello se considera el factor de instalación para procesamiento de sólidos, líquidos y mixtos. Por otro lado, el método factorial de Hand considera el tipo de equipo y el material del que está hecho. Por último, el método factorial detallado toma en consideración varios factores de instalación

dependiendo del tipo de proceso como: tuberías, material, montaje de equipos, sistema eléctrico, sistema de control, trabajo civil, estructura y construcción y aislamiento/pintura.

Asimismo, se puede considerar un promedio entre los costos estimados, según lo cual el ISBL estimado tendría un valor superior a los 600,000 USD.

5.2. Estimación de costos de capital fijo, capital de trabajo y costos de producción

La estimación mostrada en la sección 5.1 es base para el cálculo del capital fijo, el mismo concierne a la planta física. El capital fijo corresponde a los costos ISBL, a los *Outside Battery Limits* (OSBL), los costos de Ingeniería y los imprevistos: los OSBL corresponden a los costos que puedan generar una modificación a la construcción; los costos de Ingeniería recaen en los costos para el diseño del proceso y de la construcción; los imprevistos abarcan modificaciones o variaciones de todo tipo que estén en el alcance del proceso. Por otro lado, para el capital de trabajo se considera como los costos de materia prima y los costos de producción necesarios para la puesta en marcha de la planta de procesamiento.

Los costos de producción se dividen en costos de producción fijos (COPF) y en costos de producción variables (COPV). Los COPF no dependen del rendimiento y la producción y comprenden los gastos relacionados a la labor de operación. Por otro lado, los COPV dependen de la producción y su rendimiento. En tabla 5 se muestra un resumen con los valores para los costos descritos en esta sección.

Tabla 5. Resultados de la estimación de los costos de capital fijo, capital de trabajo y los costos efectivos de producción.

Resumen de costos		
Inversión de capital fijo	> 1,2 millones	[USD]
Capital de trabajo	> 1 millón	[USD]
Costo variable de producción	> 400,000	[USD/mes]
Costo fijo de producción	> 90,000	[USD/mes]

5.3. Estimación de ingresos

Por medio de la producción de los productos y el precio de venta para cada uno se puede estimar los ingresos que el proyecto generaría. Con un total que supera a los 6 millones de USD, y un beneficio neto de más de 200 mil dólares.

5.4. Análisis de tiempo de recuperación de la inversión inicial

Para realizar el análisis de recuperación es necesario calcular el número de años que se va a necesitar para la recuperación usando la inversión total inicial y el beneficio neto. Conocer el tiempo de recuperación indica si el proyecto de implementación va a ser rentable en el corto, mediano o largo plazo. Además, parte de este análisis consiste encontrar indicadores como el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR).

Tabla 6. Resumen de los resultados obtenidos del análisis de recuperación.

Análisis de recuperación		
Tasa de interés	10.00	[%]
VAN	> 200,000	[USD]
TIR	> 10	[%]
Tiempo de recuperación	>4	[años]

Por medio de estos resultados presentados en la tabla 6, se indica que el tiempo de recuperación es a mediano plazo ya que se recobraría la inversión a los cuatro años. Por otro lado, el VAN tiene un valor positivo y el TIR tiene un valor mayor a la tasa de interés, por lo que se comprueba que el proyecto sería rentable bajo las condiciones que se han establecido previamente.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente proyecto se logró realizar un estudio de factibilidad para la implementación de un proceso de recuperación de aceite con una innovadora extracción asistida. La producción de la planta se fijó en base a disponibilidad de SBE proveniente de una empresa procesadora de aceites vegetales nacional referencial. La producción de aceite será destinada para la para la exportación como un combustible.

El análisis económico partió de la suposición que la totalidad de los productos iban a ser comercializados. Con base a esto, se encontraron los componentes de costos del proyecto, así como sus ingresos. Para lograr esta estimación fue necesario utilizar tanto los costos teóricos basados en los precios históricos, así como los costos disponibles de los equipos actualmente; con ello, se consiguió obtener una estimación acertada ya que se manejó un modelo híbrido en el cual se tomaron en cuenta ambas aproximaciones para el cálculo de los costos ya mencionados. Por medio de estos cálculos, se puede afirmar que la estimación detallada fue acertada.

Se concluye que la implementación del proceso innovador recuperación de aceite por medio de un método combinado de extracción por solvente o seguido de una calcinación propuesto en este trabajo es factible en términos técnicos, económicos y sociales, con resultados que se anticipan como favorables para la industria de refinación de aceites vegetales. Adicionalmente, se afirma que la metodología usada para el desarrollo del proyecto fue certera ya que por medio de esta se lograron cumplir todos los objetivos establecidos.

7. REFERENCIAS

- FEDAPAL. (2017). *Censo Nacional Palmero 2017*. Retrieved from <http://www.agroecuador.org/index.php/blog-noticias/item/157-censo-nacional-palmero-2017>
- Haro, C., De-la-Torre, E., Aragón, C., & Guevara, A. (2012, Marzo). *Regeneración de Arcillas de Blanqueo Empleadas en la Decoloración de Aceites Vegetales Comestibles*. Retrieved from <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4559/1/CD-4175.pdf>
- Beshara, A., & Cheeseman, C. (2014). Reuse of spent bleaching earth by polymerisation of residual organics. 1770-1774. <https://core.ac.uk/download/pdf/76995839.pdf>.
- Rousset, P. (2008). *Guía técnica para la utilización energética de los aceites vegetales*. Brasília : Cirad. III. .
- Mu, B., & Wang, A. (2019). Regeneration and Recycling of Spent Bleaching Earth. *Handbook of Ecomaterials*, 3147-3167. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68255-6_121.
- Alhamed, A., & Al-Zahrani, A. (2002). Regeneration of Spent Bleaching Clay used in edible oil refinig in Saudi Arabia . *The 6th Saudi Engineering Conference*, Vol. 2. 461-472.
- Al-Zahrani, A., & Daous, M. (2000). Recycling of spent bleaching clay and oil recovery . *Trans IChemE*, Vol 78. 224-228.
- Boukerroui, A., & Ouali, M.-S. (2000). Regeneration of a spent bleaching earth and its reuse in the refining of an edible oil. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 75:773-776.
- Cortés-Gómez, L., & Torres-Cruz, S. (2016). Evaluación de alternativas para el aprovechamiento del residuo de la filtración de un aceite comestible. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria.

Department of Energy. (2011). *Petroleum and other liquids*. Retrieved from Definitions, Sources and Explanatory Notes:

https://www.eia.gov/dnav/pet/TblDefs/pet_cons_821use_tbldef2.asp

Kroil. (2018). *KIB Autopartes* . Retrieved from Thermal Oil :

<https://www.kroil.co/producto/aceite-para-termico/>

Lee, C., Seng, C., & Liew, K. (2000). Solvent efficiency for oil extraction from spent bleaching clay. . *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 77(11), 1219–1223.

doi:10.1007/s11746-000-0190-6 .

Fediol . (2020, March 09). *FEDIOL Code of Practice on vegetable oil and fat refining for food purposes*. Retrieved from

<https://www.fediol.eu/data/FEDIOL%20Code%20of%20Practice%20on%20Oil%20Refining%20-%20revision%209%20March%202020.pdf>

Salazar, J. (2019). *EVALUACIÓN DE LA REUTILIZACIÓN DE TIERRAS PROVENIENTES DE LA ETAPA DE BLANQUEO EN LA REFINACIÓN DEL ACEITE DE PALMA*. Bogota : FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Dios, por ser mi compañía incondicional y mi pilar fundamental. A mis padres porque siempre estuvieron ahí para darme la fortaleza, la sabiduría y el apoyo para salir adelante en todas las situaciones.

Agradezco a José Álvarez, por ser un guía ejemplar y una motivación para seguir creciendo tanto fuera como dentro de las aulas. También a Juan Diego Fonseca por todas las horas, consejos y experiencia impuesta para guiar este trabajo. Además, aprovecho para dar las gracias a todos quienes conforman el departamento de Ingeniería Química de la USFQ por toda la dedicación en el desarrollo de mi aprendizaje.

Asimismo, agradezco a mi *dream team*, a María Belén y a mis amigos que me ayudaron de forma directa e indirectamente a culminar este trabajo.