

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE DESGOMADO DE ACEITE DE PALMA CON  
TECNOLOGIA DE MEMBRANA**

**JULIÁN ANDRÉS HERNÁNDEZ MAHECHA**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA FACULTAD DE INGENIERIAS Y  
ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE INGENIERIA QUIMICA  
PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER-COLOMBIA  
2019**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE DESGOMADO DE ACEITE DE PALMA CON  
TECNOLOGIA DE MEMBRANA**

Autor

**JULIÁN ANDRÉS HERNÁNDEZ MAHECHA**

Director

**JACQUELINE CORREDOR ACUÑA**

Ing. Química, MSc, Dra.

Codirector

**JEISON GALVAN BUELVAS**

Ing. Químico.

Trabajo presentado como requisito para optar por el título de Ingeniero Químico

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE INGENIERIA QUIMICA  
PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER-COLOMBIA**

**2019**

## **Dedicatoria**

*A mis padres por su esfuerzo, dedicación, amor y apoyo incondicional en medio de las situaciones difíciles, a mi abuela Leonor Carmona por su dulce afecto.*

## **Agradecimientos**

Expreso mi más efusivo agradecimiento a mi directora Jacqueline Corredor y Codirector Jeison Galván Buelvas por su entrega en la realización de este proyecto y el conocimiento que me han transmitido durante el transcurso de la carrera universitaria, a todos los docentes del programa de Ingeniería Química que fueron un pilar en el desarrollo como profesional.

A todas aquellas personas que estuvieron dándome apoyo en el transcurso de mi vida, que de alguna manera ayudaron a concluir una etapa de mi vida.

A mis amigos y colegas que estuvieron en el transcurso de mi formación y nunca me abandonaron, por su amistad verdadera y leal, por ponerle ese toque de des estrés en lo que fue ésta etapa de vida.

*Infinitas gracias*

## **Resumen**

La refinación de aceite involucra una serie de pasos de purificación que se realizan para eliminar componentes indeseables, como son los fosfátidos y glicolípidos, el fin del proyecto es estudiar un enfoque diferente al habitual para el proceso de desgomado de aceite de palma con base en tecnologías innovadoras de membrana. La discusión incluye un análisis de los diferentes tipos de membranas propicias para el proceso de purificación, con una relación de ventajas-precio y las principales características físicas son el fundamento para proponer y realizar un diseño del proceso de desgomado.

La propuesta incluye el diseño del sistema filtrante con tecnología de membrana para poder operar con un flujo continuo y un modelado matemático de transporte de la membrana que pueda simular el comportamiento del flujo dentro de esta, en último teniendo en cuenta los requerimientos del proceso convencional de refinación del aceite, se realiza un análisis económico utilizando un método de estimación de costos, con el fin de determinar si el proyecto es viable, para seguir trabajando en este tipo de técnicas que trabajan fuera de lo convencional y así poder implementar este método a una escala industrial, se obtuvo un diseño de un equipo de ultrafiltración para una membrana hecha de material polimérico tipo PVDF , sus estrategias de control para una producción de 100Ton/día, dimensionamiento del módulo en paralelo del soporte de membranas y un análisis de costos de manufactura y rentabilidad de la implementación del proyecto.

## **Abstract**

The refining of oil involves a series of purification steps that are carried out to eliminate undesirable components, such as phosphatides and glycolipids, the purpose of the project is to study a different approach than usual for the process of degumming palm oil based on technologies Membrane innovators The discussion includes an analysis of the different types of membranes conducive to the purification process, with a price-benefit relationship and the main physical characteristics are the basis for proposing and designing the degumming process.

The proposal includes the design of the filtration system with membrane technology to be able to operate with a continuous flow and a mathematical modeling of membrane transport that can simulate the flow behavior within it, ultimately taking into account the requirements of the conventional process of Oil refining, an economic analysis is performed using a cost estimation method, in order to determine if the project is viable, to continue working on this type of techniques that work outside the conventional and thus be able to implement this method at a industrial scale, an ultrafiltration equipment design was obtained for a membrane made of PVDF polymeric material, its control strategies for a production of 100Ton / day, parallel module sizing of the membrane support and an analysis of manufacturing costs and profitability of project implementation.

## **TABLA DE CONTENIDO**

LISTADO DE ECUACIONES .....	12
CAPÍTULO I .....	14
1. DESCRIPCIÓN GENERAL .....	14
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN. ....	14
1.2. DELIMITACIÓN .....	15
1.2.1. Objetivo general. ....	15
1.2.2. Objetivos específicos. ....	15
2. MARCO REFERENCIAL.....	16
2.1. DESGOMADO DE ACEITE CONVENCIONAL .....	16
2.2. MEMBRANAS. ....	18
2.2.1. Características de las membranas. ....	20
2.2.2. Tipos de membranas.....	22
2.2.3. Factores característicos de procesos de membrana.....	23
2.3. DEFINICIONES DE MF, UF, OI Y NF. ....	24
2.4. FUNCIONAMIENTO DEL PROCESO DE ULTRAFILTRACIÓN. ....	26
2.5. TECNOLOGÍA DE MEMBRANAS APLICADA PARA ACEITES VEGETALES. ....	26
2.5.1. Desgomado de aceite vegetal por membrana.....	28
CAPÍTULO III .....	29
3. SELECCIÓN DE LA MEMBRANA .....	29
3.1. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE SELECCIÓN DE LA RUTA Y LAS TÉCNICAS. ....	29
3.2. CRITERIOS Y RESULTADOS. ....	30
3.2.1. Coeficiente de retención.....	31

3.2.2.	Resistencia mecánica. ....	31
3.2.3.	Costo.....	31
3.2.4.	Permeabilidad. ....	32
3.2.5.	Presión transmembrana. ....	32
3.3.	Asignación de peso de los criterios seleccionados.....	32
CAPÍTULO IV .....		36
4. DISEÑO DEL SISTEMA DE DESGOMADO. ....		36
4.1. PRODUCCIÓN.....		36
4.1.1	Flux.....	36
4.1.2	Área activa de la membrana.....	37
4.1.3	Porcentaje de recuperación.....	37
4.1.4	Presión. ....	38
4.1.5	Selectividad. ....	39
4.1.6	Ensuciamiento de la membrana. ....	40
4.1.7	Equipos. ....	41
4.1.7.1	Dimensionamiento de tuberías. ....	41
4.1.7.3	Instrumentación. ....	42
4.1.7.2.1	Medidor de presión.....	42
4.1.7.2.2	Medidor de temperatura. ....	42
4.1.7.2.3	Medidor de caudal. ....	42
4.1.7.2.4	Manómetro. ....	43
4.1.7.2.5	Sensores de nivel. ....	43
4.1.7.2.6	Válvulas.....	43
4.1.7.2.7	Soporte.....	43
4.2.	DIAGRAMAS DE FLUJO DEL PROCESO.....	44

4.2.1 Filosofía de control .....	44
4.2.2. Diagramas PFD y P&ID.....	45
4.3. MODELO DE TRANSPORTE DE LA MEMBRANA.....	45
CAPÍTULO V .....	49
5. EVALUACIÓN ECONÓMICA. ....	49
5.1 ESTIMACIÓN DE COSTOS DE INVERSIÓN.....	49
5.1.1 Inversión inicial.....	49
5.1.2 Costos directos adicionales y generales. ....	50
5.1.3 Costos de manufactura. ....	51
5.1.3.1. Costos de mano de obra operativa.....	51
5.1.3.2. Costos de materia prima.....	52
5.1.3.3. Costos de servicio. ....	52
5.1.3.4. Costos de tratamientos de residuos líquidos y sólidos. ....	53
5.2 ANÁLISIS DE RENTABILIDAD Y VIABILIDAD. ....	54
5.2.1 Valor actual neto (VAN).....	55
CONCLUSIONES.....	57
RECOMENDACIONES .....	58
REFERENCIAS .....	59

## **LISTADO DE GRAFICAS**

Gráfica 1. Etapas del proceso de desgomado convencional. (Autor).....	17
Gráfica 2 Proceso de desgomado con ácido para aceites (Gonzalez M, 2015).....	18
Gráfica 3 Diagrama de un proceso de separación por membrana. (Autor).....	18
Gráfica 4 Convencional (Perpendicular) y membrana (Tangencial) filtración (Paulson, Wilson, & Spatz, 2003).....	19
Gráfica 5 Arquitectura de las membranas porosas: a. y b. homogéneas simétrica y asimétrica respectivamente; c. asimétrica compuesta con poros interconectados (GYIMESY, 2010).....	20
Gráfica 6 Perfil típico de peso molecular de membranas ideales y reales.(Cheryan, Ultrafiltration and Microfiltration Handbook, 1998).....	21
Gráfica 7 Fenómenos presentes en los procesos de separación con membranas: a. Adsorción, b. Bloqueo de poros, c. Polarización por concentración y d. Formación de la capa de gel. (GYIMESY, 2010) .....	24
Gráfica 8 Esquema del proceso (Autor).....	26
Gráfica 9 Proceso de refinación convencional y el modelo propuesto para la refinación mediante tecnología de membrana. (Coutinho, Chiu, & Basso, 2009).....	27
Gráfica 10 Resultados del método Electra para la selección del material de la membrana. (Autor) .....	33
Gráfica 11 Contribución de cada criterio para la selección del material de acuerdo al método de decisión. (Autor) .....	34
Gráfica 12 Membrana con configuración de tipo hueca. (Autor) .....	37
Gráfica 13 Presiones implicadas en el sistema. (Autor).....	39
Gráfica 14 Balance de gradiente máximo para una membrana. (José Marcial Gozávez Zafrilla, 2015) .....	45
Gráfica 15 Relación área/ volumen para un tubo. (José Marcial Gozávez Zafrilla, 2015) .....	46
Gráfica 16 Simulación de la membrana de ultrafiltración. (Autor) .....	48
Gráfica 17 Distribución del costo de manufactura.(Autor).....	54

## **LISTADO DE TABLAS**

Tabla 1 Contenido de gomas en aceites (Gonzalez M, 2015) .....	17
Tabla 2 Clasificación de procesos de membranas cuya fuerza impulsora es la diferencia de presión. (GYIMESY, 2010) .....	25
Tabla 3 Estado del arte de desgomado de aceite con tecnología de membrana (Autor) .....	30
Tabla 4 Criterios y pesos para el método de selección del tipo de membrana para el desgomado de aceite de palma. (Autor) .....	33
Tabla 5 Propiedades típicas de PVDF. (Macián, 2007) .....	34
Tabla 6 Diámetros calculados de tuberías en el sistema de filtración.....	41
Tabla 7 Datos utilizados para el modelamiento de la membrana (Autor) .....	47
Tabla 8 Estimación de costos de equipo (Autor).....	50
Tabla 9 Costos asociados al costo inmovilizado para el sistema de ultrafiltración. (Autor) .....	51
Tabla 10 Costo de materia prima anual (Autor) .....	52
Tabla 11. Costos de servicios y asociados. (Autor) .....	52
Tabla 12 Costo de manufactura y sus componentes principales (Autor) .....	53
Tabla 13 Datos de entrada para el análisis de rentabilidad.(Autor) .....	55

## **LISTADO DE ECUACIONES**

Ecuación 1 Flux de la membrana.....	36
Ecuación 2 Porcentaje de recuperación.....	38
Ecuación 3 Flujo de rechazo.....	38
Ecuación 4 Presión transmembrana (PTM) .....	38
Ecuación 5 Diámetro de la tubería .....	41
Ecuación 6 Balance másico total .....	46
Ecuación 7 Balance de componente.....	46
Ecuación 8 Relación área/volumen.....	46
Ecuación 9 Modelo de capa de gel. ....	46
Ecuación 10 Modelo de Heinrich Blasius o pérdida de carga. ....	47
Ecuación 11 Calculo de la presión con respecto a la longitud de la membrana .....	47
Ecuación 12 Factor de fricción de Blasius. ....	47
Ecuación 13 Ecuación del número de Reynolds (Mulder, 1991).....	47
Ecuación 14 Indicador financiero VAN.....	56

## **LISTADO DE ANEXOS**

Anexo A 1 Diagrama isométrico de la membrana.....	62
Anexo A 2 Diagrama del dimensionamiento del módulo de ultrafiltración.....	63
Anexo A 3 Diagrama PFD del proceso de la ultrafiltración. ....	64
Anexo A 4 Diagrama P&ID del proceso de ultrafiltración. ....	65

## **CAPÍTULO I**

### **1. DESCRIPCIÓN GENERAL**

#### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.**

Los procesos de refinación del aceite de palma crudo son realizados con tecnologías convencionales que consumen una gran cantidad de energía, en forma de electricidad, gas natural o combustibles líquidos, trabajan bajo circunstancias extremas, altas temperaturas y presiones bajas. Debido a esto se pueden eliminar componentes del aceite importantes ya sea por evaporación, como es el caso de los triacilglicerolés que son evaporados durante la refinación física y contribuyen a la cantidad total de pérdida de aceite neutro que se debe mantener dentro de límites estrictos a fin de evitar que la factibilidad económica del proceso de purificación se vea afectada. Por otro lado, la pérdida de antioxidantes naturales (carotenos, tocoferoles y tocotrienoles) son desventajas significativas de este procedimiento especialmente desde el punto de vista nutricional.

Actualmente la aplicación de membranas en el proceso de refinación de aceites vegetales es muy limitada en comparación con su uso en otras industrias que llevan un trabajo de investigación muy avanzado. La necesidad de sintetizar membranas que trabajen con un alto desempeño, resistan al ataque de solventes y la gran escala de producción que se manejan en este tipo de industrias han influido negativamente en su utilización. Durante las dos últimas décadas, muchos grupos de investigación alrededor del mundo han trabajado y analizado el uso en los procesos de elaboración de aceites vegetales; los resultados no han sido del todo satisfactorios, por razón a los problemas indicados anteriormente.

La contribución de un nuevo método de refinación del aceite de palma, es proporcionar un aceite con un mayor contenido nutricional, esperando que muchas personas puedan consumir un producto más sano en diferentes zonas del país. Por otra parte, se espera

generar un impacto en la economía de una planta refinadora, gracias a que el proceso propuesto requiere menos niveles energéticos que pueden reflejarse en un menor gasto de producción y por consiguiente ayudando al crecimiento de las empresas productoras nacionales de aceite de palma.

## **1.2. DELIMITACIÓN**

### **1.2.1. Objetivo general.**

Diseñar un sistema de filtrado para la remoción de fosfolípidos presentes en el aceite de palma crudo.

### **1.2.2. Objetivos específicos.**

- Realizar un análisis multicriterio para la adecuada selección del material de la membrana.
- Diseñar un sistema de un proceso semi-industrial de desgomado de aceite de palma crudo, por medio de membrana.
- Modelar el mecanismo de ensuciamiento de la membrana.
- Realizar un análisis económico utilizando un método de estimación de costos que pueda indicar la viabilidad del proyecto a una escala semi-industrial

## **CAPITULO II**

### **2. MARCO REFERENCIAL**

#### **2.1. DESGOMADO DE ACEITE CONVENCIONAL**

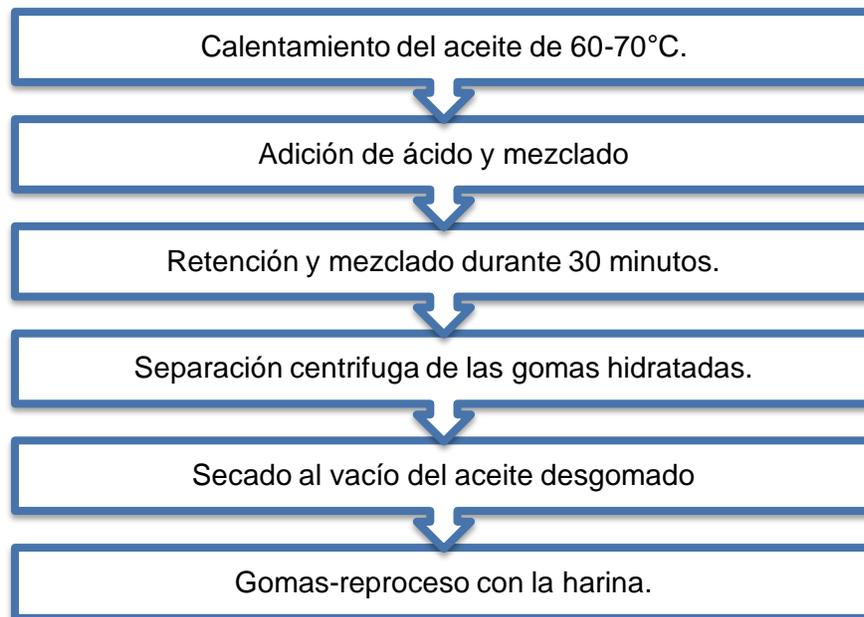
La coloración rojo anaranjado en el aceite de palma crudo se debe principalmente a la presencia de algunos componentes, los carotenos cuya concentración es una de las más altas, va desde 500-700 ppm y componentes menores, tales como tocoferoles y tocotrienoles, esteroides, fosfolípidos, escualeno e hidrocarburos triterpénicos y alifáticos, algunos son necesario retirarlos sin afectar la composición nutritiva del aceite. Los productos de aceite se venden en el mercado ya refinado, blanqueado y desodorizado, esto se hace con el fin de entregar al consumidor un aceite libre de impurezas, contaminantes y rico en propiedades nutritivas. (Maclellan, 2001)

El desgomado de aceite es el primer paso llevado a cabo en una planta de refinería de aceite, existen dos tipos de desgomado de aceite, el químico y el proceso físico que es el más usado, este es desgomado con ácido fosfórico alrededor del 0,1%. Durante esta etapa las gomas, las trazas de metales, los productos de oxidación y algunos carotenos se reducen o se remueven, con el propósito de que no haya sedimentación durante el transporte y almacenaje, disminuir la susceptibilidad a la oxidación, evitar la formación de espumas durante el calentamiento y prevenir la acidulación de gomas. (Ooi, CHOO, YAP, & MA, 1996).

A continuación, en la tabla 1 se encuentran diferentes tipos de aceites y su concentración de fosfátidos en ellos, la importancia de estos radica principalmente en la eficacia de incorporar diferentes ácidos grasos a nivel de la membrana celular, debido a que presentan una mejor absorción y utilización de los triglicéridos, abundantes en el aceite.

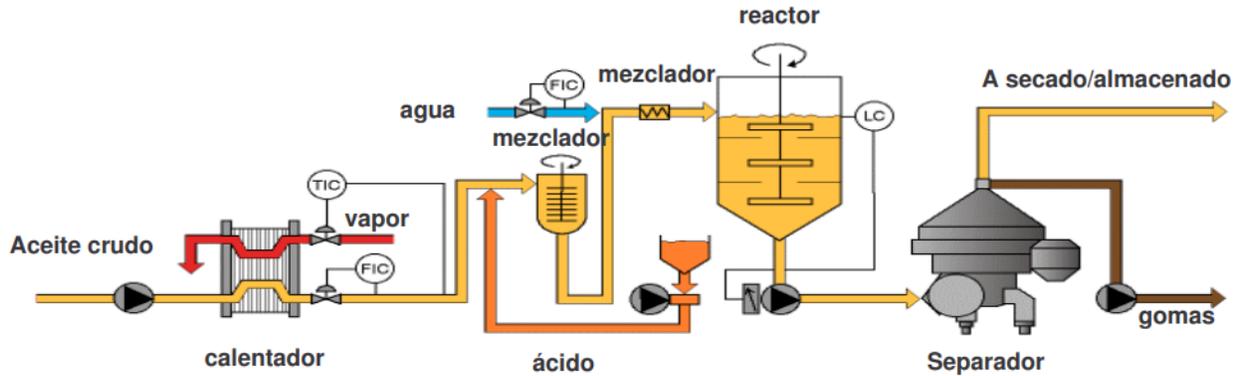
Tabla 1 Contenido de gomas en aceites (Gonzalez M, 2015)

Tipo de Aceite	Fosfátidos (%)	Fósforo (ppm)
Coco	0,02-0,05	10 20
Maíz	0,7-2,0	250-800
Algodón	1,0-2,5	400-1000
Maní	0,3-0,7	100-300
Palma	0,03-0,1	15-30
Soya	1,0-3,0	400-1200
Girasol	0,5-1,3	200-500



Gráfica 1. Etapas del proceso de desgomado convencional. (Autor)

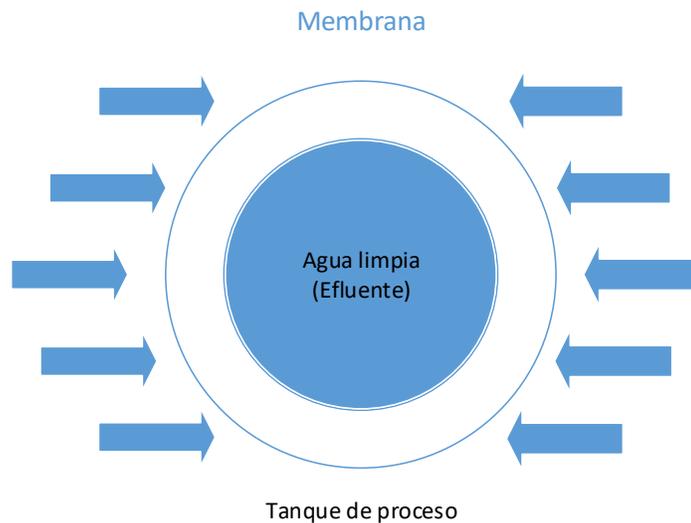
En este proceso se espera obtener una concentración de fósforo en el aceite de 20-50 ppm max, insoluble en acetona (A)% en gomas secas 65 a 70% y una humedad en aceite seco menor al 0,1%.



Gráfica 2 Proceso de desgomado con ácido para aceites (Gonzalez M, 2015)

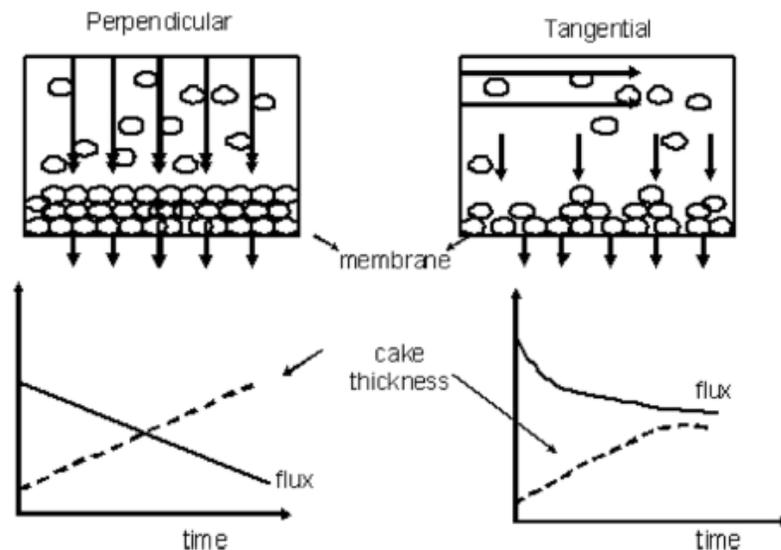
## 2.2. MEMBRANAS.

Una membrana es una barrera selectiva, orgánica o inorgánica, su función es hacer una separación entre un fluido y sus componentes. Este fluido puede venir determinado por diferentes fuerzas impulsoras que son las causantes de que el proceso funcione, como la presión, concentración y potencial eléctrico. La separación generalmente se realiza por el tamaño de partícula o por carga superficial. (GG Pique, 2005)



Gráfica 3 Diagrama de un proceso de separación por membrana. (Autor)

En un sistema de filtración convencional, el fluido ya sea líquido o gaseoso, es perpendicular a la superficie de la membrana, de modo que los solutos se depositan en él, lo que requiere la interrupción periódica del proceso para limpiar o sustituir el filtro. En la filtración tangencial de membrana, el flujo es paralelo a la superficie de la membrana, y los solutos que tienden a acumularse en la superficie se eliminan debido a la alta velocidad, lo que hace que el proceso sea más eficiente. (Paulson, Wilson, & Spatz, 2003).



*Gráfica 4 Convencional (Perpendicular) y membrana (Tangencial) filtración (Paulson, Wilson, & Spatz, 2003)*

El tamaño de poro de una membrana generalmente se indica en la literatura y principalmente por los fabricantes en la ficha técnica de la membrana, mediante el corte de peso molecular, que designa la masa molar del componente más pequeño que se retendrá con una eficiencia de al menos 95-99% aproximadamente. En general, cuando se trata de la separación de macromoléculas, la unidad más utilizada para el corte de la masa molar es el Dalton. En el caso de los poros de la membrana de microfiltración, que generalmente son más grandes que los de la ultrafiltración, el tamaño de poro se da preferentemente en  $\mu\text{m}$ . (Bazinet, 1998)

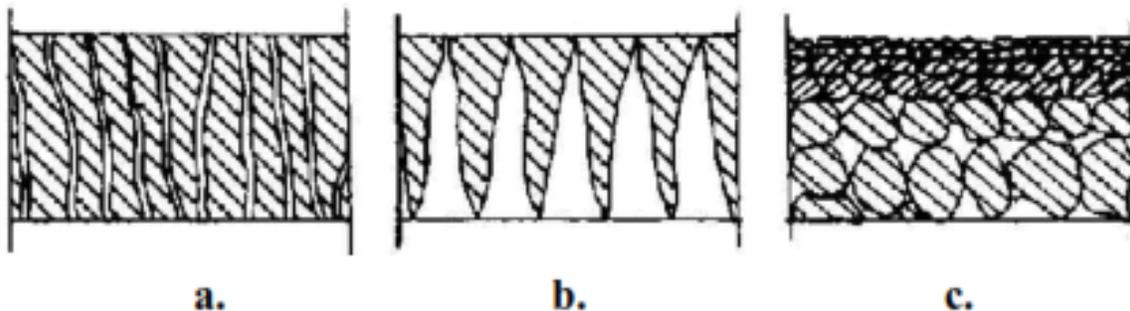
Las membranas deben responder a ciertas exigencias, para poder generar un buen filtrado:

- Eficiencia en la separación: Tener bien definido el umbral de separación y que esté relacionado con el tamaño de poro y la estructura química de la membrana.
- Resistencia mecánica, química y térmica: esto depende de la naturaleza del material escogido para la membrana y se debe adaptar al proceso de filtración. (Gonzalez M, 2015).

### **2.2.1. Características de las membranas.**

Las membranas con respecto a su estructura se pueden clasificar de dos diferentes maneras, simétricas o asimétricas. La asimetría se evalúa respecto a la estructura interna de estas y las membranas simétricas evidencian tamaños de poros uniformes en su sección transversal, mientras que los poros de las membranas asimétricas suelen ser más grandes cuanto más lejos están de la superficie del filtro. (Cheryan, Ultrafiltration and Microfiltration Handbook, 1998).

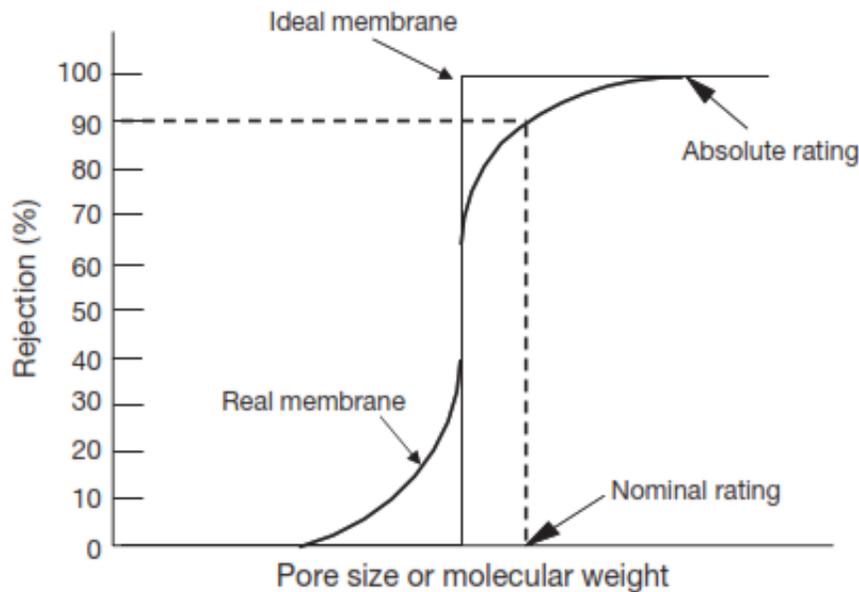
Las características más importantes de las membranas son: espesor, diámetro de poro, permeabilidad al disolvente, porosidad, velocidad de flujo de permeado, resistencia térmica, química y mecánica (Cheryan, 2013)



*Gráfica 5 Arquitectura de las membranas porosas: a. y b. homogéneas simétrica y asimétrica respectivamente; c. asimétrica compuesta con poros interconectados (GYIMESY, 2010).*

Las membranas también se pueden clasificar desde su morfología, en densas y porosas, se consideran densas cuando el transporte de los componentes implica una etapa de disolución y difusión a través del material que la constituye. Por otro lado, se denomina porosa cuando el transporte de permeado ocurre preferentemente en la fase de fluido continuo que llena los poros de la membrana.

El tamaño de poro es la propiedad más importante de una membrana ultrafiltración, los poros se pueden visualizar mediante microscopía electrónica. La porosidad de la superficie (la proporción de la superficie de la membrana ocupada por los poros) es inferior al 10%. En una membrana ideal, todos los poros deben ser del mismo tamaño. En realidad, existe una distribución de tamaños de poro, como se muestra en la gráfica 5.



Gráfica 6 Perfil típico de peso molecular de membranas ideales y reales. (Cheryan, *Ultrafiltration and Microfiltration Handbook*, 1998)

### 2.2.2. Tipos de membranas.

Las membranas sintéticas comerciales se producen a partir de dos clases distintas de material: polímeros que consisten en material orgánico como: acetato de celulosa, poliamida polisulfona y fluoruro de polivinilideno entre otros; y materiales inorgánicos como: metales y materiales cerámicos. (Cuperus, Applications of membrane technology to food, 2008)

La evolución tecnológica de las membranas se divide en cuatro clases distintas:

- **Primera generación:** Son aquellas membranas que su derivación son directamente del acetato de celulosa, estas son desarrolladas originalmente con el objetivo de desalinizar agua de mar. Son sensibles al pH entre 3–8 y operan a una temperatura máximo de 50 °C, además son susceptibles a microorganismos y desinfectantes. (Cheryan, 2009)
- **Segunda generación:** Estas membranas son elaboradas a partir de polímeros sintéticos, principalmente polisulfona o derivados de poliolefina. Se comenzaron a fabricar a partir del año 1975, mostrando variaciones en sus composiciones químicas y propiedades funcionales, como las de poliamidas y polisulfonas. Son resistentes a hidrólisis, ácidos y bases fuertes y a altas temperaturas, pero presentan baja resistencia a la compactación mecánica. Actualmente son las membranas más utilizadas. (Coutinho, Chiu, & Basso, 2009)
- **Tercera generación:** Son membranas constituidas por un material cerámico a base de circonio u óxido de alúmina, depositado sobre una superficie hecha de grafito u otros materiales. Muestran una gran resistencia mecánica y soportan altas presiones. También toleran todo el rango de pH y temperaturas superiores a 400 °C y son químicamente inertes, pero son muy costosos. (Cuperus, 2008)
- **Cuarta generación:** Estos incluyen desarrollos recientes en tecnología de membrana que resultan en un proceso híbrido que consiste de una combinación de electrodiálisis y membranas convencionales con diferentes

tamaños de poros, utilizados en procesos tales como: microfiltración, ultrafiltración y nanofiltración. Esta electroforesis continua con membranas porosas puede definirse como un proceso electroquímico para la separación de moléculas orgánicas cargadas. (Aider, 2008)

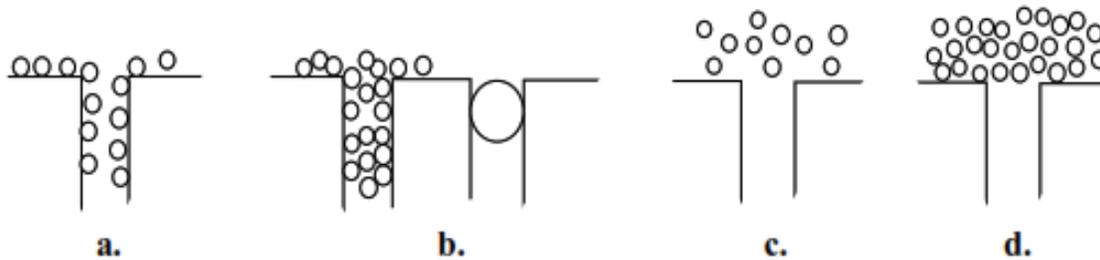
### **2.2.3. Factores característicos de procesos de membrana.**

En el inicio de un proceso de ultrafiltración hay una caída, bastante notoria, en la tasa de flujo de permeado, esto se debe principalmente a la polarización de la concentración, básicamente está en función de las condiciones hidrodinámicas del proceso, aumenta rápidamente hasta formar una capa de gel polarizada. En la segunda etapa, que se lleva más lentamente, la velocidad de flujo continúa disminuyendo debido al efecto de las interacciones entre el material que forma la membrana y el soluto, este proceso es conocido como ensuciamiento. En la tercera etapa, cuando el proceso ha alcanzado un estado casi estacionario, el flujo disminuye muy lentamente, permaneciendo casi constante, debido a la deposición de partículas y la consolidación del ensuciamiento (Marshall, 2008)

La polarización de la concentración ocurre cuando los hidrocoloides, partículas con dimensiones más grandes en comparación con el diámetro del poro de la membrana, se rechazan debido a su gran tamaño y hay una acumulación en la superficie de la membrana. Tal acumulación tiene varios efectos como un aumento en la resistencia al paso del solvente que es el más frecuente y por tal motivo ocasionar un aumento en la presión osmótica local. Si la presión transmembrana y la concentración de soluto en el flujo de alimentación son lo necesariamente grandes, inmediatamente la concentración de partículas logra aumentar hasta el punto de precipitación, formando una capa de gel conocida como capa de gel polarizada, que trabaja similar a una segunda membrana.

El resultado de la interacción entre la membrana y los diversos solutos presentes en la solución se le conoce como ensuciamiento, o incluso puede presentar entre los solutos adsorbidos en la membrana y los solutos presentes en el flujo de alimentación. Existen

tres tipos de obstrucción, el bloqueo completo de los ocurre cuando las partículas que se depositan en la superficie de la membrana son más grandes que los poros de la membrana, obstruyéndolas por completo, el bloqueo parcial de los poros pasa cuando macromoléculas aisladas o grupos de ellas sellan parcialmente los poros, con la posibilidad de formar una torta en la superficie de la membrana, aumentando la resistencia a la permeación y el bloqueo interno de los poros se produce cuando las especies químicas se depositan o adsorben en el interior de los poros de la membrana, lo que reduce el volumen disponible para el paso del permeado. (Cheryan, 1998)



*Gráfica 7 Fenómenos presentes en los procesos de separación con membranas: a. Adsorción, b. Bloqueo de poros, c. Polarización por concentración y d. Formación de la capa de gel. (GYIMESY, 2010)*

### **2.3. DEFINICIONES DE MF, UF, OI Y NF.**

En la literatura existen confusiones a las distinciones y características de la clasificación de los procesos por membrana, uno de estos se puede encontrar en que la UF ha sido referida a procesos de MF y OI e incluso ha recibido el nombre de “hiperfiltración”. Esta clasificación se basa en la fuerza impulsora a la presión que se realiza sobre la base del tamaño molecular de los componentes que se deben separar.

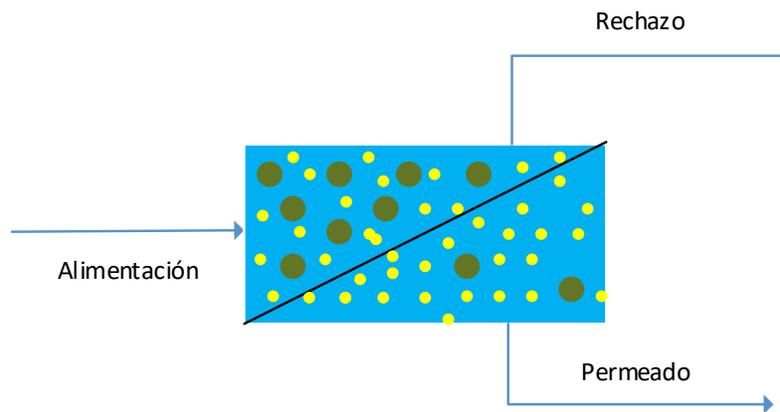
En orden creciente del tamaño de las partículas por separar, estos procesos se denominan: osmosis inversa (OI), nanofiltración (NF), ultrafiltración (UF) y microfiltración (MF); el rango de presiones utilizado en cada caso es una característica que diferencia a estos procesos.

Tabla 2 Clasificación de procesos de membranas cuya fuerza impulsora es la diferencia de presión. (GYIMESY, 2010)

<b>Proceso</b>	<b>Fuerza impulsora</b>	<b>Retenido</b>	<b>Permeado</b>	<b>Aplicación Industrial</b>
Microfiltración (MF) 	Diferencia de presión 0,1-5 bar	Partículas. Diámetro 400-20.000Å Superior 100 kDa	Disolventes; Componentes diluidos	Lavado de pigmentos; limpieza y reciclaje de agua-jabón; separación de emulsiones aceite-agua.
Ultrafiltración (UF) 	Diferencia de presión 1-10 bar	Partículas, macromoléculas. Diámetro 30-1000 Å 1-100 kDa	Disolventes; componentes diluidos con masa molecular pequeña; iones.	Concentración y limpieza de productos biotecnológicos; concentración de albúmina, gelatina, suero.
Nanofiltración (NF) 	Diferencia de presión 10-40 bar	Partículas; sustancias diluidas; iones polivalentes. Diámetros de partículas entre 8-80 Å entre 200-1000 Da	Disolventes; componentes diluidos con masa molecular muy pequeña; iones monovalentes	Limpieza y concentración de productos, como colorantes, productos farmacéuticos; concentración, reciclaje limpieza de aguas residuales
Osmosis inversa (OI) 	Diferencia de presión 10-200 bar	Partículas y todos los componentes diluidos menor de 10 Å y 200 Dalton	Solamente disolventes (agua, metanol, etanol)	Desalinización de agua de mar; limpieza de aguas residuales; reciclaje de productos; concentración de productos

## 2.4. FUNCIONAMIENTO DEL PROCESO DE ULTRAFILTRACIÓN.

La ultrafiltración es el proceso en el cual se utiliza una membrana semipermeable, donde una fuerza impulsora, en este caso la presión es la que activa del proceso que es capaz de fraccionar, separar y concentrar sustancias sin que estas sufran algún cambio fase. En la Ilustración 7 se podrá observar el esquema que lleva un proceso de separación por membranas.



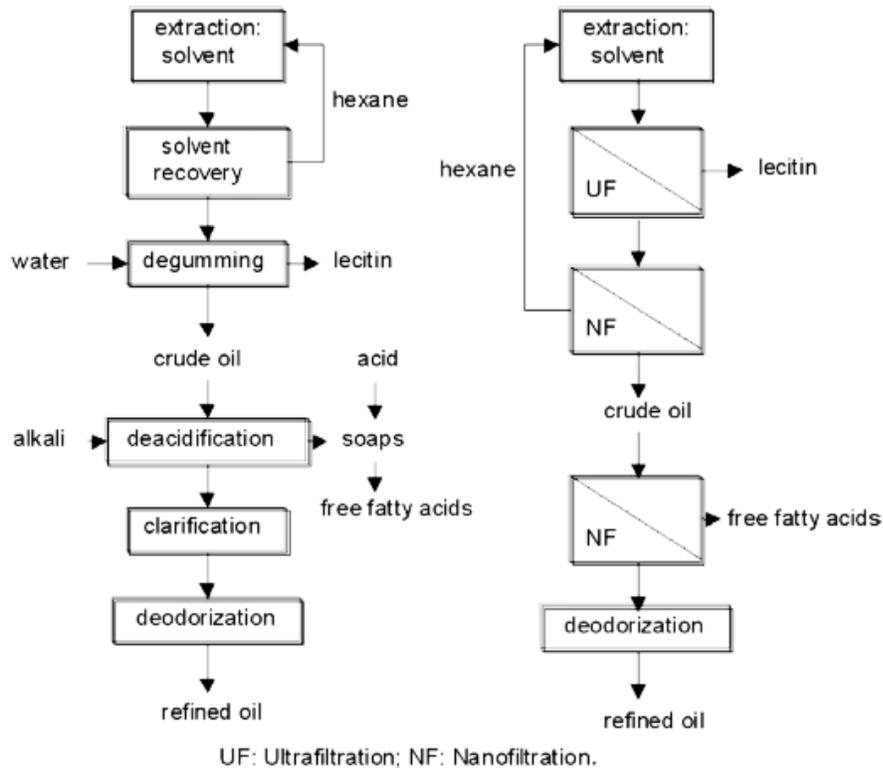
Gráfica 8 Esquema del proceso (Autor)

El fluido de alimentación es conducido a un sistema a baja presión, alrededor de 1-10 atm donde membranas de alta resistencia, reciben el flujo para liberarla de materiales de alto peso molecular y sólidos suspendidos. Los fluidos bajan por la superficie de las membranas a muy alta velocidad en forma horizontal impidiendo la formación de lodos que obstaculicen. Requieren de bajo consumo energético y poco uso de productos químicos para su operación, lo que proporciona bajos costos de operación.

## 2.5. TECNOLOGÍA DE MEMBRANAS APLICADA PARA ACEITES VEGETALES.

La tecnología de membrana todavía está en la fase de desarrollo ya que hay muchas investigaciones sobre este tema y cada vez se encuentran más aplicaciones en el procesamiento de alimentos. Los procesos de membrana más convencionales o más

utilizados, como la microfiltración, la ultrafiltración y la ósmosis inversa, son actualmente considerados operaciones unitarias estándar y son trabajadas en numerosos procesos industriales. Con respecto a la industria alimentaria, el enfoque de esta tecnología está actualmente en la producción de membranas más adecuadas para determinados procesos y productos, o incluso para mejorar la calidad de los productos existentes, ya que el principal problema que se evidencia es la trabajar con algunos tipos de productos. (Cuperus y Nijhuis, 1993). La investigación sobre el uso de la tecnología de membrana para aceites se dirige principalmente a la recuperación de solventes de la micela, desgomado, blanqueo, desacidificación, la hidrólisis de grasas y aceites, la síntesis de lípidos estructurados en un reactor de membrana, la concentración de compuestos minoritarios y la separación de emulsiones. (L. Lin, 1996) En la Ilustración 8. se evidencia un sistema convencional de refinación de aceite vegetal y el propuesto con la tecnología de membrana. (Moura, Gonçalves, & Petrus, 2005)



Gráfica 9 Proceso de refinación convencional y el modelo propuesto para la refinación mediante tecnología de membrana. (Coutinho, Chiu, & Basso, 2009)

### **2.5.1. Desgomado de aceite vegetal por membrana.**

El desgomado se lleva a cabo generalmente después de separar el aceite de la miscela, de una manera convencional los fosfolípidos se pueden eliminar agregando agua o ácido fosfórico al aceite crudo, de modo que se hidratan y se pueden eliminar con elevadas temperaturas y diferentes presiones. (Hui, 1996). Por el contrario, el desgomado por membranas es mucho más fácil ya que puede llevarse a cabo directamente desde la micela. Dado que los fosfolípidos son moléculas anfóteras y estas pueden formar micelas de tipo inversa en el medio del fluido con una masa molar superior a 20 kDa y un tamaño molecular de 20 a 200 nm (Ribeiro, 2006) (Koseoglu, 2002). La ultrafiltración se puede utilizar para separarlos de la mezcla de aceite y hexano. (Pagliero, 2007)

Las micelas se formarán por encima de una concentración de monómero determinada llamada concentración crítica de micelas (CMC), el tamaño de esta se define de acuerdo con la masa molar y se entiende que está relacionado con la masa molar de los fosfolípidos y el número de monómeros utilizados para formarlos. El hexano, al ser un solvente no polar (constante dieléctrica de 1.88 (Rydberg, 1992)), puede esperarse la formación de micelas de fosfolípidos con gran cantidad de monómeros en este solvente, por tal motivo es el ideal para trabajar en el proceso con membrana, la polaridad del solvente utilizado tiene una influencia significativa en la micela de fosfolípidos.

El permeado consiste en hexano, triacilgliceroles, ácidos grasos libres y otras moléculas pequeñas, mientras que casi todos los fosfolípidos son retenidos por la membrana (Scott, 2003). Las membranas adecuadas para esta aplicación deben ser resistentes al hexano, hechas, por ejemplo, de Polietersulfona (PES) (Moura, 2007) poliamida (PA), polisulfona (PS), fluoruro de polivinilideno (PVDF), poliimida (PI) , poliacrilonitrilo (PAN) o materiales inorgánicos como lo es la cerámica). (Cheryan, 2013)

## **CAPÍTULO III**

### **3. SELECCIÓN DE LA MEMBRANA**

En esta sección se describe la técnica utilizada para la selección del tipo de membrana, la cual se realiza con el fin de trabajar con las mejores condiciones de operación para obtener un diseño preliminar del sistema de filtración para la remoción de fosfolípidos, el desarrollo del método de selección y su respectivo análisis.

Es necesario hacer énfasis, que en esta fase del proyecto no se entró en detalles sobre todas las características de la membrana, sino que se trabaja con las que se consideran más importantes para este caso, a criterio del autor. Teniendo en cuenta las características del aceite y las necesidades del equipo, se observarán los componentes y configuración de la misma, para esto se tendrá en cuenta las disponibles en el mercado. Considerando las múltiples opciones que se encuentran para la selección de una, se tendrán cuidado en la toma de cada decisión para que sea acorde a lo requerido para el sistema.

La elección fue llevada a cabo mediante los resultados de los ensayos, teniendo en cuentas las características de las membranas evaluadas por diversos autores.

#### **3.1. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE SELECCIÓN DE LA RUTA Y LAS TÉCNICAS.**

La selección de la membrana se basó en el método de Electre, este se fundamenta en un análisis de decisiones de criterios múltiples que permiten jerarquizar las diferentes alternativas y elegir la que reúne los criterios de aceptabilidad y se basa en otorgar valores a cada uno de los criterios tratados y luego realizar una ponderación y agregación de los valores otorgados. Para realizar esto, se desarrolla un indicador de concordancia y otro de discordancia, que permitirán establecer con claridad si una alternativa satisface o no con claridad los criterios de aceptabilidad. (S.J., 2003)

### **3.2. CRITERIOS Y RESULTADOS.**

La preselección de la membrana se realizó con base en una revisión bibliográfica y considerando la experiencia de las personas encargadas de los proyectos estudiados, los resultados obtenidos y las recomendaciones que mencionan. A continuación, se referencian trabajos de investigación consecuentes y afines con el desarrollo de esta tesis, se mencionan los que obtuvieron el mejor resultado en los diferentes ensayos mencionados en los artículos.

*Tabla 3 Estado del arte de desgomado de aceite con tecnología de membrana (Autor)*

<b>Autor</b>	<b>Título</b>	<b>Tipo de membrana</b>	<b>Retención</b>
(Juliana de Moura, 2005).	Desgomado de aceite vegetal por membrana microporosa.	Polietersulfano	89%
M. Mattea (N. Ochoa, 2001)	Ultrafiltración de aceite vegetal. Desgomado por membranas poliméricas.	Difluoruro de polivinilideno.	98%
(Sarita Arora, 2005)	Procesamiento de membrana de aceite de palma crudo.	Cerámica	95-100%
(L. Lin K. R., 1996)	Desgomado de membrana a escala de banco de aceite vegetal crudo: Optimización de procesos.	Poliamida	99,6%
(Ana Paula Badan Ribeiro, 2008)	La optimización del desgomado del aceite de soja a escala de planta piloto utilizando una membrana cerámica.	Cerámica	99.7%
(Célio Cordeiro de Carvalho, 2006)	Desgomado de miscelas de aceite de soja crudo utilizando membranas cerámicas: presión transmembrana y efecto de velocidad	Cerámica	70-95%
(Ma´rcia Pereira de Souza)	Desgomado de aceite de maíz / hexano miscelas usando una membrana cerámica	Cerámica	65-93,5%
(C. Pagliero, 2001)	Desgomado de aceite de soja crudo por ultrafiltración usando membranas poliméricas	Difluoruro de polivinilideno.	99%

A partir de la información recolectada de la literatura se llega a una preselección del material, se van a trabajar con Polietersulfano, Difluoruro de polivinilideno, cerámica Poliamida para la ejecución del método de selección multicriterio.

La selección del material debe estar sustentada en un análisis objetivo, con el cual se define de manera correcta las causas por las que se llegaron a la determinación de su uso. A continuación, se muestran los criterios necesarios que se analizaron para una buena selección.

### **3.2.1. Coeficiente de retención.**

La retención de los fosfolípidos que ofrezca la membrana es muy importante, ya que el producto debe contener una mínima concentración de fósforo para ser consumido y así que la tecnología de la membrana sea viable.

### **3.2.2. Resistencia mecánica.**

Debido al ataque químico que se presenta al entrar en contacto con solventes orgánicos como en este caso es el hexano, la membrana presenta diferentes tiempos de vida útil, esto va muy de la mano con los costos adicionales que pueda generar el mantenimiento o cambio de la membrana en un cierto periodo de tiempo.

### **3.2.3. Costo.**

Este criterio es muy importante, es necesario realizar un estudio económico sobre el tipo de membrana elegida. El uso de estos provoca un aumento en los costos de mantenimiento, pero también genera ahorros a largo plazo como menores pérdidas de aceite neutro, menores costos energéticos y menor generación de efluentes de agua y soluciones ácidas.

#### **3.2.4. Permeabilidad.**

El flujo de permeado se debe garantizar que sea alto y constante, para que se pueda trabajar a gran escala, este es dependiente de otros factores por eso se desarrollará un modelo que intente predecir el comportamiento del proceso de filtración y este se basará en la relación entre la presión aplicada y la tasa de permeación.

#### **3.2.5. Presión transmembrana.**

Este factor interviene en la polarización por concentración y en la velocidad de flujo en un sistema de filtración, por eso al aumentar la presión transmembranaria aumenta la tasa de flujo, la resistencia de la membrana y costos energéticos, reflejándose en la formación de una torta de partículas colmatantes que reducen la permeabilidad y el rendimiento del sistema; es decir, entre mayor sea la presión aplicada, mayor será la cantidad de fosfolípidos que se depositan sobre el interior de los poros de la membrana.

### **3.3. Asignación de peso de los criterios seleccionados.**

Con el objetivo de aplicar el método Electre se le otorgó a cada tipo de membrana una calificación entre 1 y 100 para determinado criterio.

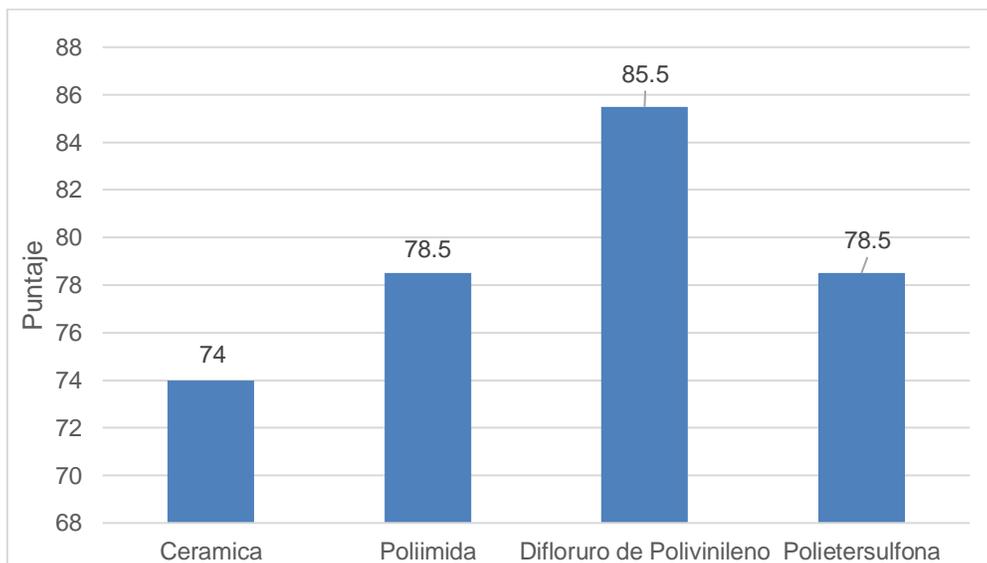
Las calificaciones asignadas de los criterios que indican propiedades para cada alternativa (retención, permeabilidad y presión transmembrana) se realizaron basándose en los datos tabulados en la tabla 4 y las calificaciones asignadas de los criterios de costos y resistencia mecánica se realizaron considerando a partir de fuentes bibliográficas y consideraciones del autor. De igual manera, los pesos asignados a cada criterio fueron establecidos por orden de importancia según el autor.

La tabla 4 muestra los pesos asignados para cada alternativa a cada uno de los criterios y su respectiva calificación otorgada.

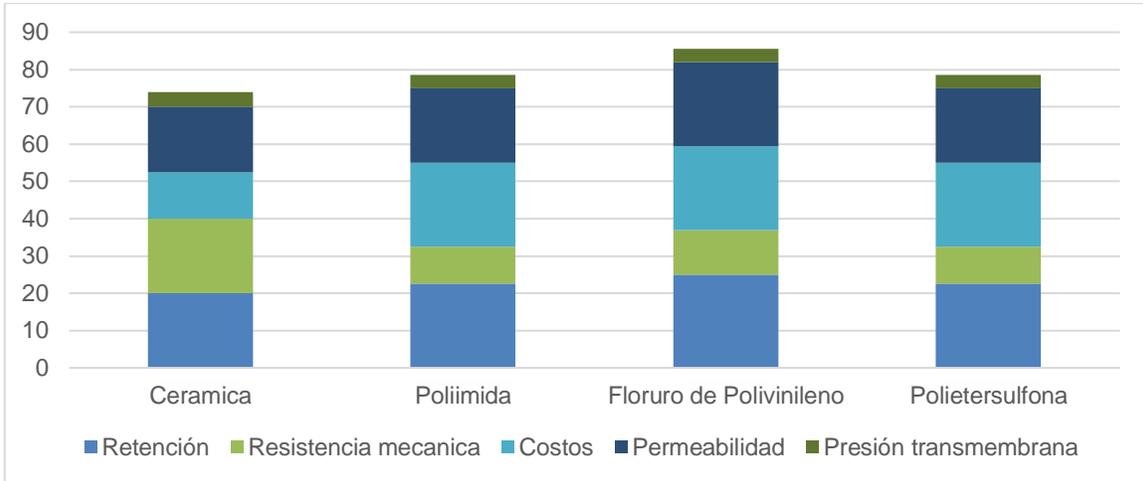
Tabla 4 Criterios y pesos para el método de selección del tipo de membrana para el desgomado de aceite de palma. (Autor)

<b>Criterios</b>	<b>Peso</b>	<b>Cerámica</b>	<b>Poliamida</b>	<b>Difluoruro de Polivinileno</b>	<b>Polietersulfona</b>
Retención	0,25	80	90	100	90
Resistencia mecánica	0,2	100	50	60	50
Costos	0,25	50	90	90	90
Permeabilidad	0,25	70	80	90	80
Presión transmembrana	0,05	80	70	70	70

La grafica 10 y 11 muestran los resultados obtenidos una vez aplicado el método Electre. De acuerdo a estos resultados la mejor alternativa para el material de la membrana para el sistema de filtración es de fluoruro de polivinileno (PVDF).



Gráfica 10 Resultados del método Electra para la selección del material de la membrana. (Autor)



Gráfica 11 Contribución de cada criterio para la selección del material de acuerdo al método de decisión. (Autor)

En la Ilustración 10 se puede apreciar que el material de la membrana es de fluoruro de polivinileno (PVDF) que se utilizara en la filtración de los fosfolípidos de aceite de palma, obteniendo un puntaje de 95,5 siendo un poco más alto que el (78,5) para la Poliimida y el Polietersulfano y por último la cerámica (74). En la tabla 5 se encuentran algunas de las propiedades del polímero a trabajar.

Tabla 5 Propiedades típicas de PVDF. (Macián, 2007)

<b>Propiedad</b>	<b>Método</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Densidad	DIN 53479	g/cm <sup>3</sup>	1.78
Absorción de humedad	50% HR	%	0
	100% HR		0
Punto de fusión	ASTM D789	°C	170
Conductividad térmica	DIN 52612	W/Km	0.2
Temperatura máxima de uso	Con puntas	°C	+150/-50
Resistencia a la tracción	DIN 53455	N/mm <sup>2</sup>	55
Módulo de elasticidad	DIN 53457	N/mm <sup>2</sup>	2000
Dureza Shore	DIN 53505		80
Rigidez dieléctrica	DIN 53481	Kv/mm	60

Como se puede observar en la Ilustración 10, los costos, la retención y la permeabilidad juegan un papel importante en el método de selección de la membrana, estos criterios son de gran relevancia para el diseño del sistema de filtración, debido a que estos factores para el proceso de desgomado de aceite dan un indicio si el proceso es factible por esta nueva tecnología, en ocasiones los trabajos realizados no han tenido una buena permeabilidad, esto hace que se dificulte el proceso y es necesario utilizar el material que mejor comportamiento tenga para evitar posibles problemas de producción.

La resistencia mecánica es un factor que no influyó mucho en la decisión para el material, el daño que ocasiona el aceite y el solvente al material es alto, los polímeros tienden a tener una vida útil menor que la de un material cerámico, pero a cambio esta ofrece un costo más bajo que puede ser redimido con el tiempo, por tal motivo el uso de un material resistente al desgaste físico no tendrá mayores beneficios en cuanto a durabilidad y como todos los materiales trabajados en el documento presentan un buen flujo de permeado se puede omitir esta característica.

En la comparación de las mejorías de las características se tienen en cuenta todas las propiedades en orden de importancia así: la retención, el flujo de permeado, los costos y resistencia mecánica. La presión de transmembrana, es un factor que rige el material de la membrana para que el proceso de filtración trabaje a las mejores condiciones posibles. Los requerimientos que debe presentar la membrana, están enfocados en aquellas que trabajen a temperaturas medianamente altas y altos caudales, además de que presente una alta retención de fosfolípidos, para obtener un producto con una buena calidad, es decir una concentración de fosfolípidos menor a 100 ppm.

## **CAPÍTULO IV**

### **4. DISEÑO DEL SISTEMA DE DESGOMADO.**

#### **4.1. PRODUCCIÓN**

Este factor viene dado por las restricciones hidráulicas específicas del polímero, es decir, los rangos de operación de la membrana como lo son el máximo caudal de permeado, el mínimo caudal de rechazo, el porcentaje de recuperación y la presión máxima de operación con el fin de cumplir con las restricciones reportadas por el fabricante, el diseño debe trabajar un flujo de aceite de 100 Ton/día y el flujo del solvente. La mezcla tendrá 60% p/p de hexano y 40% p/p de aceite.

##### **4.1.1 Flux.**

Es el factor de diseño más importante, por medio del cual se puede obtener una aproximación al flujo de producción de la membrana que este instalada en el sistema. Está ligado principalmente al caudal de entrada de la membrana para obtener un rendimiento de la filtración. es decir, el flux indica el flujo volumétrico de permeado por unidad de superficie de membrana.

$$Flux = \frac{Cantidad\ de\ aceite\ filtrado}{Unidad\ de\ area\ disponible}$$

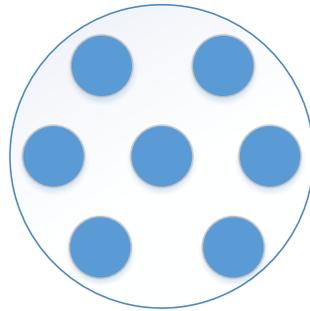
*Ecuación 1 Flux de la membrana*

La cantidad de aceite de filtrado va ligada al caudal de entrada al sistema de filtración y es el requerimiento de la planta refinadora, la unidad de área disponible depende de la superficie filtrante que se reporte en la ficha técnica del cartucho de membrana, pero en este caso se desea trabajar una gran cantidad de flujo es necesario trabajar con una serie de cartuchos para abastecer el caudal y el área requerida. Habitualmente trabajara

a 60-70 L/m<sup>2</sup>h, por medio de una bomba centrífuga controlada, se espera que este flux sea constante durante la producción.

#### **4.1.2 Área activa de la membrana.**

Teniendo en cuenta los factores de producción de una planta refinadora de aceite se estimó el flux que debería operar sin ningún tipo de interrupción o contratiempo, para esto es necesario utilizar un área de 250-300 m<sup>2</sup> de una membrana de PVDF de tipo fibra hueca, este tipo de membrana ayuda a que el aceite por efectos de viscosidad no tenga problemas de atascamiento y pueda realizar la filtración con una buena velocidad, se reporta un rango de área debido a que cada membrana posee un área específica y es difícil obtener un área requerida exacta.



*Gráfica 12 Membrana con configuración de tipo hueca. (Autor)*

#### **4.1.3 Porcentaje de recuperación**

Es aquel porcentaje de flujo de alimentación que se extrae del sistema como producto, es decir, el aceite crudo libre de fosfolípidos, este va a ser muy similar al alimentado ya que este sistema de membrana consiste en disminuir las pérdidas de aceite neutro.

$$\text{Recuperación} = \frac{\text{Flujo de producto}}{\text{Flujo de alimentación}} * 100$$

*Ecuación 2 Porcentaje de recuperación*

Para este caso al aplicar la Ecuación 2, en donde se desea trabajar un flujo de 14779,44 L/h de aceite con solvente y se opera con un porcentaje de recuperación del 96% se obtendría un producto 14631,65 L/h trabajando de una manera continua y un rechazado de 147,79 L/h aproximadamente, sin tener en cuenta factores como limpieza, mantenimiento entre otros.

$$\text{Flujo de rechazo} = \text{Flujo de alimentación} - \text{Flujo de producto}$$

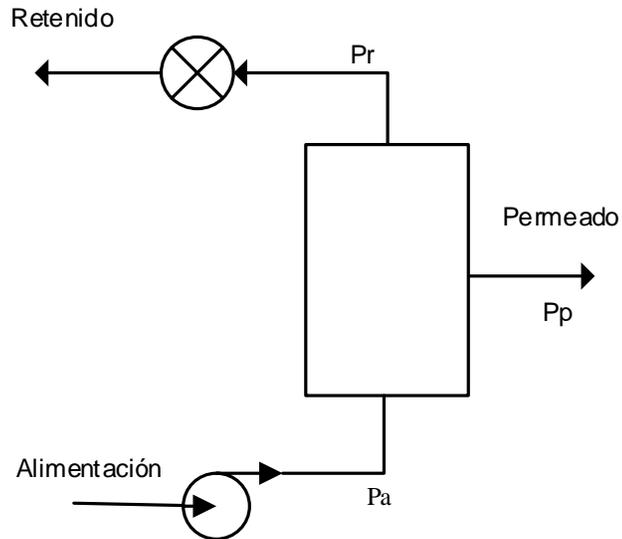
*Ecuación 3 Flujo de rechazo.*

#### **4.1.4 Presión.**

Para realizar un buen dimensionamiento del sistema, se debe tener en cuenta la presión de operación y presión transmembrana (PTM), las cuales depende de la temperatura del aceite de alimentación. Al aplicar una fuerza impulsora como la diferencia de presión, esta logra hacer una separación de las moléculas no deseadas (Fosfolípidos). Por otro lado, se debe tener en cuenta que la diferencia de presión transmembrana, no es constante a lo largo del módulo de filtración esto se debe a que la presión en el lado de la alimentación disminuirá a causa de las perdidas por carga a lo largo del ducto. Esta presión se define por medio de la Ecuación 4.

$$PTM = \frac{Pa - Pr}{2} - Pp$$

*Ecuación 4 Presión transmembrana (PTM)*



Gráfica 13 Presiones implicadas en el sistema. (Autor)

Teniendo en cuenta recomendaciones en las diferentes fuentes bibliográficas con las presiones usadas en cada etapa del sistema y realizando posteriormente el respectivo cálculo se pudo establecer un rango presión óptimo de 1,2 a 1,5 bar, con esto se garantiza que la retención sea alta, que el flujo sea constante durante el proceso y que la membrana opere en el rango establecido por el fabricante.

#### 4.1.5 Selectividad.

Esta propiedad de la membrana viene dada por distintos factores, dependiendo de las características de la membrana como es el tamaño de poro, las moléculas más grandes que el tamaño del poro no pasaran a través de la membrana y con la ayuda del solvente aumenta la afinidad química para que así la sustancia se incorpore fácilmente y pueda atravesarla. La selectividad se puede cuantificar a través de la curva de corte molecular o "cut-off" esta se define como el peso molecular que es rechazado por la membrana en un 90%, es decir, si la membrana tiene un cut-off igual a 30 kDa rechazara en un 90% a los solutos cuyo peso molecular sea 30 kDa. En este caso será la ficha técnica de la membrana la indique la selectividad que se obtendrá al usarla, para este caso se debe

tener en cuenta el tamaño de partícula de los fosfolípidos, como estas forman micelas inversas en el medio se espera tener una masa molar por encima de 20 kDa, presentan un tamaño molecular de 20 a 200nm.

#### **4.1.6 Ensuciamiento de la membrana.**

Los factores principales que afectan el ensuciamiento de la membrana son el tipo de diseño, el material de la membrana y el modo de operación, son factores que puede afectar la suciedad lo que implica que sea un factor importante para tener en cuenta en el dimensionamiento del sistema. Las impurezas que un aceite crudo pueda contener, la obstrucción, y “scaling” son tres tipos de contaminantes que pueden llegar a la membrana, lo que ocasiona un desempeño bajo del sistema, reduciendo el caudal de permeado e incrementando el gasto energético, por este motivo es necesario realizar una limpieza rutinaria después de cada ciclo de filtrado, para este caso el método de limpieza será químico, se debe limpiar hasta el flujo de permeado con una circulación de hexano puro en un sistema abierto en condiciones específicas (40°C, 0,5 bar y 2 m/s) y sin retorno del hexano.

Seguidamente se recircula hexano durante 30 minutos a una temperatura de 40°C con el sistema cerrado (con retorno del hexano) y después alimentando desde el punto de permeado, es decir en reversa a las mismas condiciones. Por medio de este método se restituye mayor parte de la membrana, pero su uso frecuente puede perjudicar la vida útil. Por lo tanto, debe emplearse solo cuando sea estrictamente necesario.

El hexano necesario para el lavado a contracorriente se extrae del tanque de alimentación y es forzada a través del módulo utilizando una bomba. Pasa a través de la membrana desde el exterior (es decir, opuesta a la dirección de flujo de filtración) y es así como se desprende el revestimiento acumulado de la superficie de la membrana.

#### 4.1.7 Equipos.

##### 4.1.7.1 Dimensionamiento de tuberías.

En el sistema de ultrafiltración se utiliza las tuberías en la alimentación, el rechazo y el permeado. Existen varios materiales para tubería, pero en este caso se desea circular hexano y aceite crudo, la mejor opción es acero inoxidable, ya que es más resistente a los ataques que pueda estar expuesto, pero será muy buena opción ya que no se van a manejar temperaturas y presiones altas.

Por medio de la Ecuación 5 se determina el diámetro de la tubería, teniendo en cuenta que se trabajara con una solución de hexano y aceite.

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{v\pi}}$$

*Ecuación 5 Diámetro de la tubería*

Donde Q es el caudal de alimentación y  $v$  es la velocidad media, generalmente para que un sistema de ultrafiltración realice bien su operación de separación se maneja a una velocidad de 2 m/s en toda las zonas, con una membrana de fibra hueca.

*Tabla 6 Diámetros calculados de tuberías en el sistema de filtración.*

<b>Tubería</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Diámetro (In)</b>
Alimentación	14,77	2,012
Permeado	13,892	1,951
Rechazo	0,591	0,403

Para el sistema se trabajaría la tubería de alimentación y permeado con un diámetro de 2 In y el rechazado podría trabajar sin problema alguno de 1 In, esta decisión se tiene en cuenta el rango de seguridad por el caudal que se trabaja, las presiones, menores a ese diámetro pueda producir errores en el sistema, además el material de tubería tendrá que

ser de acero inoxidable AISI 304, ya que no se trabajaran con materiales corrosivos.

#### **4.1.7.3 Instrumentación.**

En cualquier sistema y proceso es de vital importancia hacer una adecuada selección de la instrumentación, para el proceso de ultrafiltración se implementan diferentes tipos de válvulas, medidores de presión y flujo, sensores de nivel, manómetros y bombas

##### **4.1.7.2.1 Medidor de presión**

Estos se encargan de indicar la presión de operación en la entrada, salida e intermedia de la membrana, si se emplea un transmisor de presión como un presostato, este ayuda a abrir y cerrar válvulas, en este caso será establecido por la presión transmembrana, deben brindar alta estabilidad frente a la sobrepresión y los cuales se deben implementar dos para tener un mayor control.

##### **4.1.7.2.2 Medidor de temperatura.**

Para este caso los medidores de temperatura son de suma importancia para el aceite de alimentación ya que dependiendo de esto se obtiene un gran porcentaje de retención de fosfolípidos y hace que el aceite mejore algunas de sus propiedades para el transporte y procesamiento de este. El medidor de temperatura estará ubicado en el tanque de alimentación, para controlar la temperatura de entrada al sistema.

##### **4.1.7.2.3 Medidor de caudal.**

Los medidores de caudal o flujo permiten conocer los 3 flujos implicados en el sistema con esto se mantiene un porcentaje de recuperación controlado, además que el flujo ayuda a saber si las membranas necesitan limpieza. Estarán ubicados en la entrada y las dos salidas del sistema de UF.

#### **4.1.7.2.4 Manómetro.**

Permite medir la presión en los fluidos, determinan la presión entre el fluido y la presión local. Para este caso la mejor opción es de tipo Bourdon, estos consisten en tubos curvados en arco de sección oval, son óptimos para la presión relativa en la que se manejan en el sistema de UF, permitiendo la lectura adecuada de la presión.

#### **4.1.7.2.5 Sensores de nivel.**

Los sensores de nivel son muy importantes en un proceso en el que se manejen líquidos, para este caso una mezcla de aceite y hexano, estos implementan una medición continua de nivel del proceso transmitiendo la señal de manera digital, cada tanque contara con su respectivo sensor.

#### **4.1.7.2.6 Válvulas.**

Estas son necesarias para controlar los flujos del sistema y evitar cualquier accidente que se pueda presentar por la presión que el fluido genera en las tuberías. Se implementarán válvulas manuales a la entrada y salida del sistema, además una válvula solenoides en la corriente de rechazo.

#### **4.1.7.2.7 Soporte.**

Es aquel que le da el sostenimiento del equipo, es decir a la serie de membranas ubicadas de una manera correspondiente para trabajar a un mayor caudal y poder adecuar teniendo en cuenta el número de membranas que se van a utilizar con su área específica, para esto se debe partir de una membrana base, e iniciar su diseño, el diseño se hace para 6 membranas ubicadas en paralelo.

Se adecua el sistema en paralelo, las alimentaciones y las salidas tanto de permeado como de rechazo de cada módulo se conectan con cada una de las correspondientes tuberías generales. Esta disposición se usa para producir un caudal  $n$  veces superior al

suministrado por un módulo, siendo  $n$  el número de módulos instalados en paralelo. Como la máxima conversión de trabajo para cada módulo será la conversión máxima que puede conseguirse con esta agrupación, en los Anexos A1 y A2 se puede observar el dimensionamiento completo del soporte.

## **4.2. DIAGRAMAS DE FLUJO DEL PROCESO.**

Son una representación esquemática del proceso, sus condiciones de operación normal y su control básico. Estos diagramas se realizan con el fin de dar una información clara, ordenada y concisa de todos los pasos que compone el proceso de ultrafiltración de aceite a nivel industrial.

### **4.2.1 Filosofía de control**

El tanque de alimentación TK-001 cuenta con un sistema de calentamiento y una capacidad 25000L, es llenado con una mezcla homogénea de aceite-hexano y posee indicador de temperatura y de nivel, con el fin de controlar estas variables de alimentación, cuenta con un serpentín de calentamiento cuando alcanza la temperatura ideal la mezcla (40°C), es enviado a la membrana y el nivel de líquido en cada depósito es leído por un sensor de nivel que proporciona una señal y actúa sobre la bomba centrífuga P-001, de igual modo la presión de alimentación a la membrana es controlada por medio de la bomba y cuenta con presostato, que al detectar un nivel de presión por debajo del establecido provocan la parada de las bombas a las que están asociados. Una vez recuperada una presión por encima del vacío se vuelve automáticamente a la situación conveniente en ese instante, ya que de esta depende la presión transmembrana (PTM).

El permeado de la membrana llega al tanque de almacenamiento TK-003, este es el aceite libre de fosfolípidos y el flujo de retención son las miscelas retiradas del proceso, se envía al tanque de almacenamiento TK-002, para posteriormente ser tratada tiene una configuración de retorno por cuestiones de facilidad en la limpieza para ambos casos

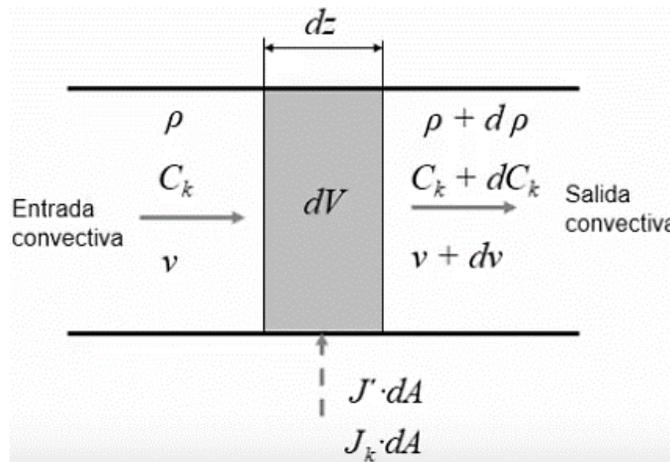
y cada uno cuenta con un control de presión.

#### 4.2.2. Diagramas PFD y P&ID.

En el anexo A3 y A4 se muestran los componentes relaciones en el flujo del proceso de desgomado de aceite de palma, en el diseño muestra los lazos de control que se requiere, dado que el proceso es de tipo BATCH, no es necesario que los tanques de almacenamiento TK-002 y TK-003 tengan un control de nivel, ya que el diseño está hecho para que tengan el volumen suficiente para trabajar un ciclo completo del sistema y mucho menos un control de temperatura ya que la mezcla no es lo suficiente viscosa.

#### 4.3. MODELO DE TRANSPORTE DE LA MEMBRANA.

El transporte de materia en membranas de ultrafiltración contempla simultáneamente dos mecanismos: Capa de gel y pérdida de carga, se utilizan ecuaciones de gradiente máximo aplicadas en una membrana de ultrafiltración, esto se presenta para cuando se trabaja un flujo de tipo pistón y un elemento diferencial.



Gráfica 14 Balance de gradiente máximo para una membrana. (José Marcial Gozávez Zafrilla, 2015)

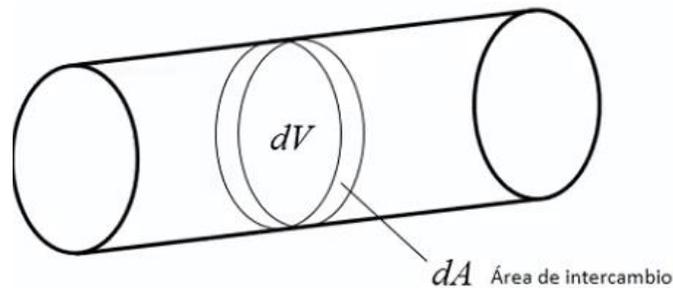
Típicamente el proceso de membrana la densidad de flujo se define como saliente se deben trabajar las ecuaciones con un signo negativo, se asume que hay un rechazo del 100%.

$$\frac{dv}{dz} = \frac{-Jvp \frac{dA}{dV}}{\rho} = -J_v \frac{dA}{dV}$$

*Ecuación 6 Balance másico total*

$$\frac{d(vC_k)}{dz} = J_k * \left(\frac{PA}{S}\right) + rk = 0$$

*Ecuación 7 Balance de componente.*



*Gráfica 15 Relación área/ volumen para un tubo. (José Marcial Gozávez Zafrilla, 2015)*

$$\frac{dA}{dV} = \frac{p_A dz}{Xdz} = \frac{\pi d}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4}{d}$$

*Ecuación 8 Relación área/volumen.*

$$J_v = k * \ln\left(\frac{C_g}{C}\right)$$

*Ecuación 9 Modelo de capa de gel.*

La ecuación 9 explica la densidad de flujo volumétrico, es decir los m<sup>3</sup>/h que estamos obteniendo y la ecuación 10 explica cómo se pierde la carga dentro del sistema

$$\frac{dB}{dz} = \frac{d\left(\frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g}\right)}{dz} = -\frac{fv^2}{d2g}$$

Ecuación 10 Modelo de Heinrich Blasius o pérdida de carga.

$$\frac{dP}{dz} = -\rho\left(\frac{fv^2}{d} + v\frac{dv}{dz}\right)$$

Ecuación 11 Calculo de la presión con respecto a la longitud de la membrana

$$f = 0.316Re^{-0,25}$$

Ecuación 12 Factor de fricción de Blasius.

$$Re = \frac{\rho vd}{\mu}$$

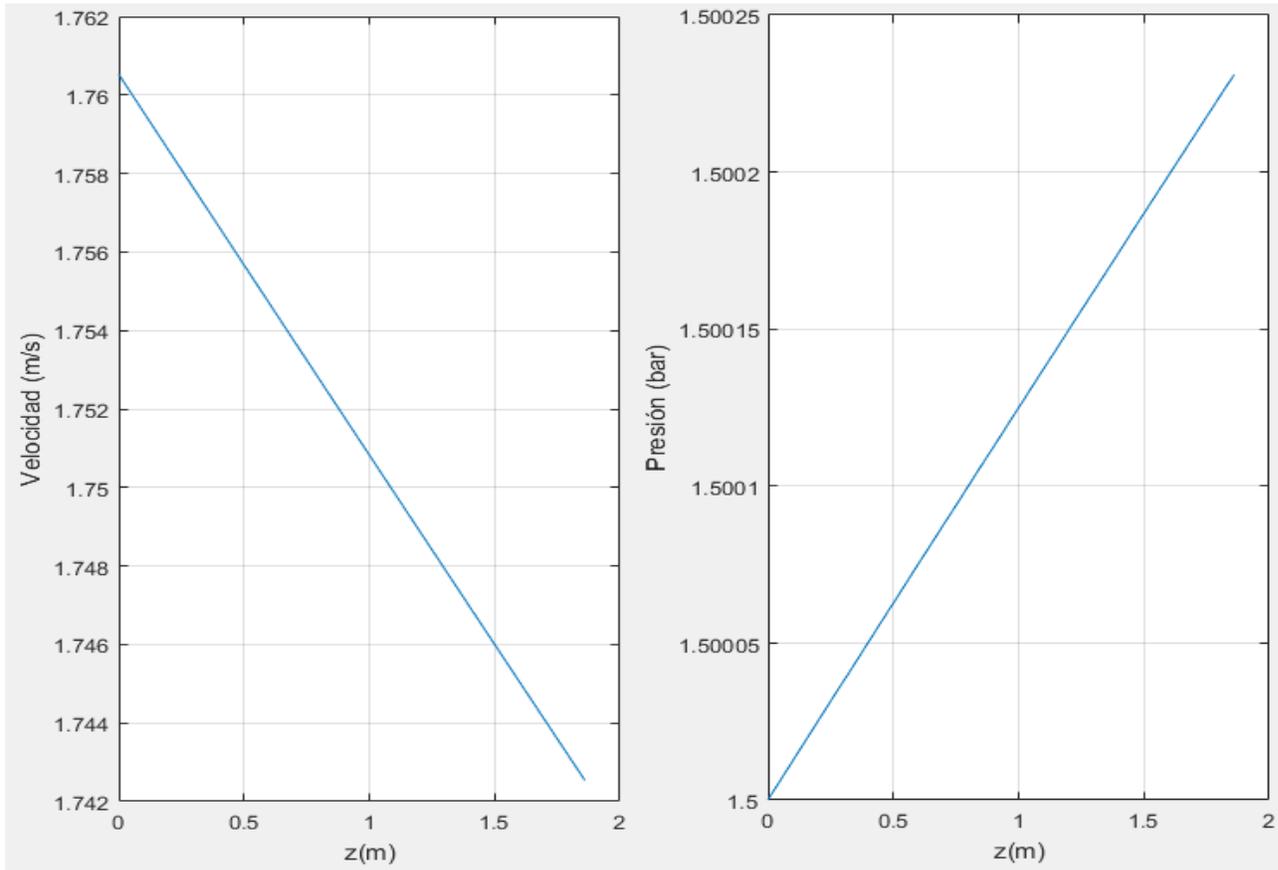
Ecuación 13 Ecuación del número de Reynolds (Mulder, 1991)

El sistema de filtración se modeló con los siguientes datos, algunos datos fueron calculados por métodos de estimación como la viscosidad, se utilizó el método de Kendall y Monroe.

Tabla 7 Datos utilizados para el modelamiento de la membrana (Autor)

Categoría	Descripción	Variable, valor y unidades.
Propiedades de la suspensión	Densidad Viscosidad	$\rho = 733 \text{ Kg/m}^3$ $\mu = 0,01 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
Entrada	Caudal	$Q = 0,0041 \text{ m}^3/\text{s}$
Módulos	Longitud de tubos Diámetro interno de tubos N° de tubos	1,8m 225 mm 6

Cabe mencionar que fueron tomados de diferentes medios bibliográficos para que la simulación sea lo más parecido a la realidad, todo esto se hace con el fin de conocer el comportamiento del flujo de aceite-solvente circulado en la ultrafiltración, el programa utilizado es MATLAB 2016A.



Gráfica 16 Simulación de la membrana de ultrafiltración. (Autor)

Al ingresar el fluido a la membrana, este por cuestiones de resistencias físicas impide el paso dentro de la membrana es decir se ve un cambio muy grande en la velocidad del fluido, esto se debe mucho por las características del material de la membrana y del fluido por su viscosidad y densidad. Se espera que la velocidad con el tiempo permanezca constante. Por otro lado, la presión dentro de la membrana no tiene un cambio significativo, es decir va a permanecer constante en toda la longitud de la membrana.

## **CAPÍTULO V**

### **5. EVALUACIÓN ECONÓMICA.**

En esta sección del documento se determina un estudio de tipo financiero donde están los costos de inversión inicial, los costos de producción que representan un punto muy importante dentro de la evaluación y la modificación de un proyecto ya establecido, por lo que es necesario realizar un análisis sobre los procesos y las materias primas utilizadas, considerado en los siguientes ítems: costo de compra de equipos y capital inmovilizado (incluye los costos asociados con la operación diaria del sistema ultrafiltración proyectado). Al obtener estos gastos, el siguiente paso fue realizar un análisis de rentabilidad y viabilidad del proyecto considerando la depreciación. Para esto se emplearon métodos estimativos en ingeniería económica para el cálculo de los costos, para el cálculo de los costos de algunos equipos, se empleó el método desarrollado por Guthrie establecida en el año 1969. El método tiene en cuenta los índices de actualización (CEPCI), (Seider, Seader, Lewin, & Widagdo) se estimarán por este método los costos de tanques de almacenamiento, bombas, membrana. Se excluye costos de válvulas, tuberías y accesorios.

El objetivo es estimar el presupuesto para el diseño, construcción y montaje para la operación del sistema de ultrafiltración.

#### **5.1 ESTIMACIÓN DE COSTOS DE INVERSIÓN.**

##### **5.1.1 Inversión inicial.**

La inversión inicial para el sistema de filtración, debe contener todos los equipos para el desgomado. A partir de estos equipos, se calcularon los costos de compra que proviene de una metodología estimativa desarrollada por Guthrie, tomando como referencia especificaciones de los equipos involucrados a sus condiciones de operación y el índice de actualización.

La siguiente tabla muestra la estimación de los costos de equipo a considerar para el sistema de ultrafiltración.

*Tabla 8 Estimación de costos de equipo (Autor)*

<b>Ítem</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Concepto</b>	<b>Costo unitario (US)</b>	<b>Costo Total (US)</b>
TK-001	1	Tanque mezclador con chaqueta de calentamiento 20m <sup>3</sup>	51.744,41	51.744,41
TK-002	1	Tanque de almacenamiento de 10m <sup>3</sup>	9.983,79	9.983,79
TK-003	1	Tanque de almacenamiento de 25m <sup>3</sup>	14.558,98	14.558,98
P-001	1	Bomba de alimentación	9.183,81	9.183,81
UF-001	6	Membrana PVDF de ultrafiltración 51m <sup>2</sup>	1.538,6	9228,0

Para el tanque de alimentación se consideró los costos de agitación y calentamiento.

### **5.1.2 Costos directos adicionales y generales.**

El costo inmovilizado se refiere a una instalación completamente nueva en la cual la construcción se inicia en terrenos esencialmente sin desarrollar, un campo de hierba. El término costo total del módulo se refiere al costo de realizar expansiones o modificaciones de pequeñas a moderadas en una instalación existente, en este proyecto se trabaja como una modificación de una planta debido a que se puede aplicar para ambos casos, es decir que el costo total del módulo es que se tendrá en cuenta para hacer los respectivos calculos de rentabilidad. En la tabla 9 se pueden encontrar los costos mencionados anteriormente.

Tabla 9 Costos asociados al costo inmovilizado para el sistema de ultrafiltración. (Autor)

<b>Concepto</b>	<b>[US]</b>	<b>[COP]</b>
Costo modular [C <sub>MB</sub> ]	138.161,88	479.490.815,91
Costo total del módulo [C <sub>TM</sub> ]	163.031,02	565.799.162,77
Costo de inmovilizado [C <sub>GR</sub> ]	232.111,96	805.544.570,73

### 5.1.3 Costos de manufactura.

Los costos asociados con la operación diaria de un proceso químico deben estimarse antes de que se pueda evaluar la viabilidad económica de un proceso propuesto. Los componentes principales del costo de manufactura son las materias primas, servicios, costo de mano de obra operativa y el tratamiento de residuos. En este caso por tratarse de una membrana es necesario hacer un proceso de limpieza rutinario, este costo se suma dentro de esta categoría.

Al realizar evaluaciones económicas para plantas nuevas, existentes o futuras, se recomienda establecer el precio real de venta o compra para todas las materias primas y productos. Debido a que el mayor costo operativo es casi siempre el costo de las materias primas, es importante obtener precios precisos si se desean obtener evaluaciones económicas realistas. A continuación, se explica la información necesaria para estimar cada componente que conforma el costo de manufactura y finalmente, se estima el costo de producción de aceite desgomado.

#### 5.1.3.1. Costos de mano de obra operativa.

Para estimar el costo de la mano de obra operativa, se requiere el salario promedio por hora de un operador. El costo de la mano de obra depende considerablemente de la ubicación de la planta, y se pueden esperar variaciones significativas, pero como el objetivo es solo realizar un cambio a una planta ya establecida se deberían trabajar los mismos costos.

### 5.1.3.2. Costos de materia prima.

El costo de las materias primas se puede estimar utilizando el precio actual en el mercado. Para ciertos productos químicos pueden existir grandes fluctuaciones de precios estacionales, y puede ser aconsejable observar el precio promedio durante un período de varios meses. Los costos del aceite crudo fueron investigados teniendo en cuenta los precios que manejan en el departamento del Meta, uno de los principales productores del país.

Tabla 10 Costo de materia prima anual (Autor)

Materia prima	Aceite	Hexano
Flujo másico [kg/lote]	100.000	212.000
Factor [\$/kg]	0,58	0,7635
Costo [\$/año]	21.170.000,00	46.652.904,00
Costo de materia prima $C_{RM}$ [\$/año]	67.822.904,00	

Se agrega el hexano con el que se hace la limpieza de la membrana, en todo proceso de ultrafiltración esta se debe hacer cuando esta la requiera, es decir cuando los flujos de filtrado sean bajos, ya que provoca mucho desgaste físico en la membrana.

### 5.1.3.3. Costos de servicio.

El proceso de desgomado requiere de muy pocos equipos que consumen energía, considerando las especificaciones de estos equipos, se estimó la energía requerida y posteriormente, los costos relacionados a dicha energía requerida estos.

Tabla 11. Costos de servicios y asociados. (Autor)

	Energía [kW]	Eficiencia	Costo [\$/kW]	Costo anual [\$/año]
Bomba	13,5	0,85	0,06	8.347,76
Resistencia	350	0,75	0,06	245.280,00
Agitador	59,25	0,7	0,06	44.488,29

Costos de servicios $C_{UT}$ [\$/año]	543.396,05
---------------------------------------	------------

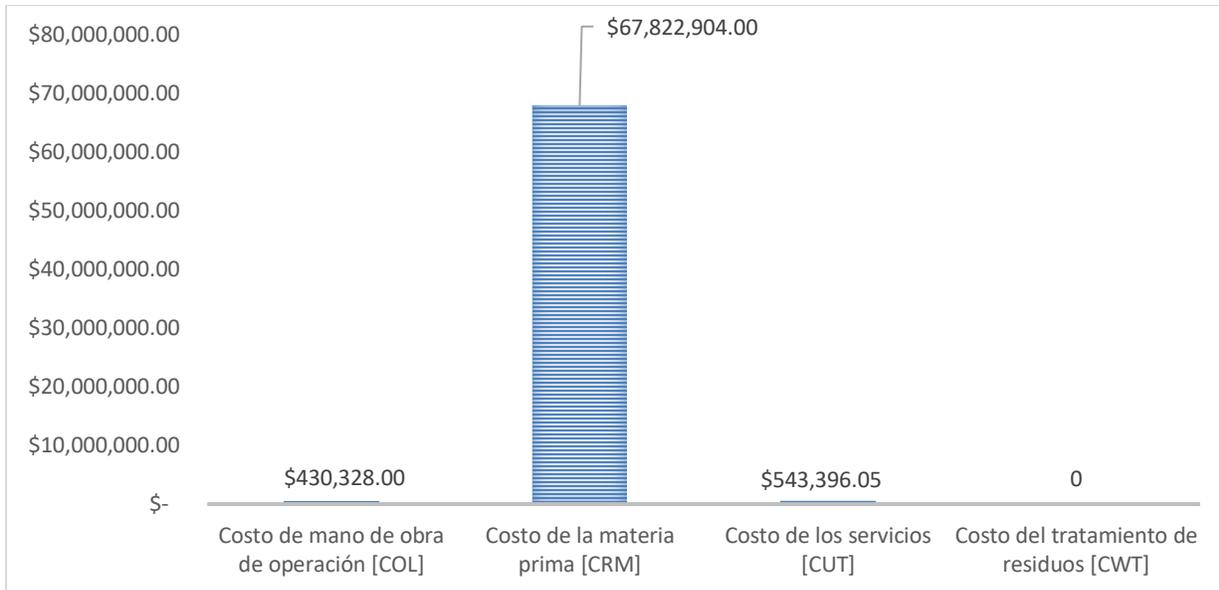
#### 5.1.3.4. Costos de tratamientos de residuos líquidos y sólidos.

Como en esta fase del proyecto no se entró en detalle sobre el sistema de recolección y tratamiento de fluidos; por tal razón, se supuso que no hay costos para este rubro al no conocer los flujos de residuo a tratar. Con los costos anteriores se estimó el costo de manufactura que se requiere en el proyecto, tal como lo indica la siguiente tabla:

*Tabla 12 Costo de manufactura y sus componentes principales (Autor)*

Rubro	Costos [\$/año]
<b>Costo de mano de obra de operación [<math>C_{OL}</math>]</b>	430.328,00
<b>Costo de la materia prima [<math>C_{RM}</math>]</b>	67.822.904,00
<b>Costo de los servicios [<math>C_{UT}</math>]</b>	543.396,05
<b>Costo del tratamiento de residuos [<math>C_{WT}</math>]</b>	0
<b>Manufactura [<math>COM_d</math>]</b>	68.796.628,05

De acuerdo a la ilustración 17, el costo de la materia prima representa un gran porcentaje en el costo total de manufactura, como sucede en la mayoría de los casos. (Turton, Baillie, B, & A., 2008)



Gráfica 17 Distribución del costo de manufactura. (Autor)

## 5.2 ANÁLISIS DE RENTABILIDAD Y VIABILIDAD.

El proyecto para el cambio de desgomado de aceite de palma, está basado en una necesidad de poder utilizar e incorporar la tecnología de membrana que proporcionan mejoras en la eficiencia del proceso. En el análisis económico del proyecto, se supone que el costo de compra de tierra es nulo al inicio del proyecto debido a que la empresa que desea implementarlo ya cuenta con el terreno disponible para la modificación de la planta.

Durante la fase de construcción, hay un importante desembolso de capital distribuido en partes iguales. Esto representa los gastos fijos de capital para comprar e instalar el equipo y las instalaciones auxiliares requeridas para ejecutar la planta., se termina la construcción y se inicia la planta. Este es un gasto de una sola vez en la puesta en marcha de la planta y se recuperará al final del proyecto. Ya que el capital de trabajo es totalmente recuperable, no puede depreciarse. Los valores típicos para el capital de trabajo están entre el 15% y el 20% de la inversión de capital fijo. Después de la puesta en marcha, el proceso comienza a generar productos terminados para la venta, y los flujos de efectivo anuales se vuelven positivos. (Turton, Baillie, B, & A., 2008)

El tiempo utilizado para la depreciación es de cinco años. El tiempo durante el cual se permite la depreciación depende de las regulaciones del IRS y del método de depreciación utilizado, en este caso se aplicó el método de depreciación de MARCS.

Para evaluar la rentabilidad del proyecto, se asumió un período de 5 años. Esta no suele ser la vida útil del equipo, ni es el tiempo durante el cual se permite la depreciación. Es un período específico durante el cual se comparará la rentabilidad de diferentes proyectos que son la modificación a una planta ya establecida.

Existen tres bases utilizadas para la evaluación de la rentabilidad: tiempo, efectivo y tasa de interés; para cada una de estas bases, se pueden considerar técnicas descontadas o no descontadas. Las técnicas no descontadas no tienen en cuenta el valor temporal del dinero y no se recomiendan para evaluar proyectos grandes y nuevos.

*Tabla 13 Datos de entrada para el análisis de rentabilidad. (Autor)*

<b>Inversión total de capital fijo [US]</b>	<b>Costo de manufactura [US/año]</b>	<b>Capital de trabajo [US]</b>	<b>Ingreso por ventas [US/año]</b>	<b>Tasa de impuesto [%]</b>	<b>Tasa de interés de referencia [%]</b>
554.515,58	68.796.628,05	99.812,80	\$58.600.000	45	15

Para el ingreso por ventas anuales, se consideró la producción utilizada en el flujo segundo el diseño trabajado, estimada para un esquema de producción con intervalos de descanso de 3 días y el costo del aceite refinado vendido en el departamento del Meta, aproximadamente 2,2 US/Kg. Seguidamente, se explica brevemente el significado del criterio descontado del análisis de rentabilidad para un mayor entendimiento.

### **5.2.1 Valor actual neto (VAN)**

Es un indicador financiero que sirve para determinar la viabilidad de un proyecto y consiste en actualizar los cobros y pagos de un proyecto o inversión para conocer cuánto se va a ganar o perder con esa inversión. Este método hace una comparación de proyectos, en este caso el proyecto convencional vs tecnología de membrana

$$VAN = -I_o + \sum_{t=1}^n \frac{Ft}{(1+k)^t} = -I_o + \frac{F1}{(1+k)} + \frac{F2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{Fn}{(1+k)^n}$$

*Ecuación 14 Indicador financiero VAN.*

Ft= Flujo de dinero en cada periodo t

lo= Inversión inicial (t=0).

n= Numero de periodos.

k= tipo de interés.

El VAN que sea mayor es el proyecto más rentable, en este caso gana el proyecto de membrana con un VAN de \$141.846 y el VAN del convencional es de \$134.152. En este proyecto no se puede hacer una estimación de periodo de reembolso debido a que la modificación es en una sola etapa del proceso de refinación, es decir que los gastos que se tienen son muy pocos comparados con los ingresos que se obtiene anualmente y se obtendrá el reembolso en menos de un año, además de esto la modificación del proceso no le da todo el valor agregado al producto final.

## **CONCLUSIONES**

La implementación de la tecnología de membranas surge como una importante alternativa a los métodos convencionales de procesamiento de aceites vegetales, ya que se puede aplicar en todas las etapas de la refinación y posee una amplia variedad de procesos. Menor producción de efluentes, brinda versatilidad en su tratamiento, reducción en el consumo energético y de productos químicos, y la ventaja más prometedora, es la preservación de los compuestos nutricionales en el aceite.

La presente revisión de los esfuerzos de investigación estudiados en las diferentes fuentes bibliográficas en que se basa el proyecto, dan a entender que han proporcionado un estado consolidado de esta tecnología, de igual modo obstáculos, que impiden el acogimiento de la tecnología de membranas en el procesamiento de aceite comestible esta relacionado con la selectividad, la productividad, y la longevidad de las membranas. Algunas presentan baja tasa de permeación a través de membranas con aceites sin diluir que requiere un área de membrana más grande para el rendimiento de la planta requerida, por este motivo es necesario trabajar con solvente, pero si este se agrega, el reflujo mejora y en consecuencia disminuye la estabilidad a largo plazo de las membranas se espera que este conocimiento mejorará nuestros esfuerzos hacia la industrialización de la tecnología de membranas y para la producción de aceites comestibles de buena calidad.

## **RECOMENDACIONES**

Se debe realizar un estudio más profundo de esta tecnología para obtener nuevas aplicaciones, además de lo que ya en la industria este implementado se pueda optimizar para obtener mejores resultados tecnológicamente y económicamente. Los buenos resultados obtenidos en las fuentes bibliográficas estudiadas para el desgomado de la micela en una escala de laboratorio y piloto, como en la reducción efectiva del contenido de fósforo y el buen flujo de permeado, son una clara evidencia de la importancia a las aplicaciones en el sector industrial alimenticio.

Se propone realizar un segundo escalonamiento semi-industrial, teniendo en cuenta el requerimiento de la producción manejada en el proyecto, para la separación de ácidos grasos libres del aceite crudo de palma, combinando la separación por extracción líquido/líquido y la tecnología de membranas.

## REFERENCIAS

- Aider, M. D. (2008). Potential of continuous electrophoresis without and with porous membranes (CEPM) in the bio-food industry . *Trends in Food Science and Technology*.
- Ana Paula Badan Ribeiro, J. C. (2008). *La optimización del desgomado del aceite de soja a escala de planta piloto utilizando una membrana cerámica* .
- Bazinet, L. L. (1998). Bipolar membrane electrodialysis: Applications of electrodialysis in the food industry. . *Trends in Food Science and Technology*, 77-87.
- C. Pagliero, N. O. (2001). Desgomado de aceite de soja crudo por ultrafiltración usando membranas poliméricas .
- Célio Cordeiro de Carvalho, M. P. (2006). Desgomado de miscelas de aceite de soja crudo utilizando membranas cerámicas .
- Cheryan, M. (1998). *Ultrafiltration and Microfiltration Handbook*.
- Cheryan, M. (2009). Ultrafiltration and microfiltration handbook. *Technomic Publ.*
- Cheryan, M. (2013). MEMBRANE SEPARATIONS | Ultrafiltration. *Elsevier Inc.* .
- Coutinho, C. d., Chiu, M. C., & Basso, R. C. (2009). State of art of the application of membrane technology to vegetable oils: A review. *Food Research International*, 2-3.
- Cuperus, F. P. (2008). Applications of membrane technology to food processing. *Trends in Food Science and Technology*.
- Cuperus, F. P. (2008). Applications of membrane technology to food. *Trends in Food Science and Technology*.
- GG Pique, R. T. (2005). *Manual práctico de Osmosis inversas, conceptos y experiencias basadas en 25 años de innovación* .
- Gonzalez M, G. (2015). *Propiedades del agua. Biomoléculas*.
- GYIMESY, L. F. (2010). *DESARROLLO POR ULTRAFILTRACIÓN DE UN CONCENTRADO PROTEICO A PARTIR DE LACTOSUERO*. Bogota.
- Hui, Y. H. (1996). *Edible oil and fat products: General applications* . New York: John Wiley and Sons.

- José Marcial Gozávez Zafrilla, M. A. (2015). *Análisis y simulación de procesos con mathcad*.
- Juliana de Moura, J. C. (2005). *Desgomado de aceite vegetal por membrana microporosa*.
- Koseoglu, S. S. (2002). *Advantages of membrane degumming – Real or imagined?* European Journal Lipid Science Technology.
- L. Lin, K. R. (1996). Bench-scale membrane degumming of crude vegetable oil process optimization . *Elsevier*.
- L. Lin, K. R. (1996). *Desgomado de membrana a escala de banco de aceite vegetal crudo: Optimización de procesos*.
- Ma´rcia Pereira de Souza, J. C. (s.f.). Desgomado de aceite de maiz/hexano miscelas usando una membrana ceramica .
- Macián, R. S. (2007). *Cualificación y Validación*.
- Maclellan, M. (2001). *Palm oil*. Estados Unidos: American Oil Chemist's Society. Journal.
- Marshall, A. D. (2008). *Physico-chemical aspects of membrane fouling by dairy fluids*. In *IDF Special Issue 9504*. Fouling and cleaning in pressure driven membranes process .
- Moura, J. M. (2007). *Reator de membrana enzimático e fluidos supercríticos: . Associação de processos*. Química.
- Moura, J. M., Gonç,alves, L. A., & Petrus, J. C. (2005). Degumming of vegetable oil by microporous membrane. *Journal of food engineering*.
- Mulder, M. (1991). *Basic principles of Membrane Technology* . Holanda: Kluwer Academic Press.
- N. Ochoa, C. P. (2001). *Ultrafiltración de aceite vegetal. Desgomado por membranas poliméticas* .
- Ooi, C., CHOO, Y., YAP, S., & MA, A. (1996). Refining of red palm oil . *Tonudo de: Elaeis* .
- Pagliari, C. M. (2007). *Fouling of polymeric membranes during degumming of crude sunflower and soybean oil* . Journal of Food Engineering, .
- Paulson, D., Wilson, R., & Spatz, D. (2003). Crossflow membrane technology and its applications. *Food Technology*.

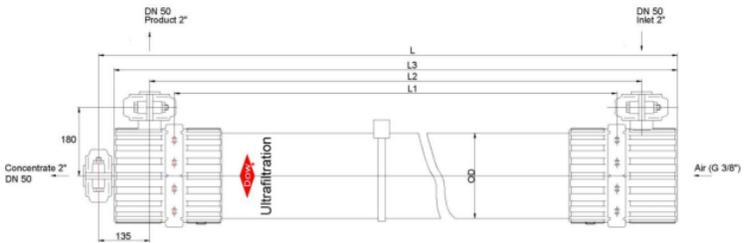
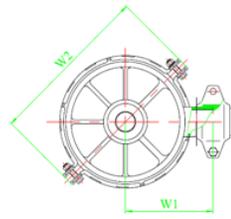
- Ribeiro, A. P. (2006). *Solvent recovery from soybean oil/hexane miscella by polymeric*.  
Journal of Membrane Science, .
- Rydberg, J. M. (1992). *Principles and practices of solvent extraction* . New York .
- Sarita Arora, S. M. (2005). *Procesamiento de membranas de aceite de palma crudo*.
- Scott, K. (2003). Handbook of industrial membranes. *Elsevier*.
- Seider, Seader, Lewin, & Widagdo. (s.f.). *Product and process design principles*. John  
Wiley & Sons, Inc.
- SJ., C. (2003). *El analisis multicriterio para la gestión sustentable de los recurso hidricos*.
- Turton, R., Baillie, R. C., B, W., & A., J. (2008). *Analysis, Sinthesis, and DDesign of  
Chemical Processes*. Prentice Hall.

## Diseño de desgomado de aceite con tecnología de membrana

Anexo A 1 Diagrama isométrico de la membrana.

Unidades	Longitud				Diametro D	Ancho	
	L	L1	L2	L3		W1	W2
SI(mm)	1860	1500	1630	1820	225	180	342
US(inch)	73,2	59,1	64,2	71,7	8,9	7,1	13,5

Area de la membrana		Peso vacio		Volumen del modulo	
m2	ft2	Kg	Lbs	Litros	Galones
51	549	48	106	35	9,2

Parametros de operación		
	SI Unidades	US Unidades
Flux	40-120 l/m <sup>2</sup> /h	24-70 gfd
Rango de flujo	2-6,1 m <sup>3</sup> /h	9,2-26,7 gpm
Temperatura	1-50 °C	34-136 °F
Max. Presión en el modulo	6,25 bar	93,75 psi
Max. operación PTM	2,1 bar	30 psi
Max. presión de salida.	2,5 bar	36 psi
pH	2 a 11	
Tamaño de poro	300 μ	

**Descripción**

Diagrama de tuberías e instrumentación de filtración con sistema de control

**Diseñado por:**

Julián Andrés Hernández Mahecha

**Título**

**Membrana de Ultrafiltración**

**Notas**

Modulo de ultrafiltración para el desgomado de aceite de palma

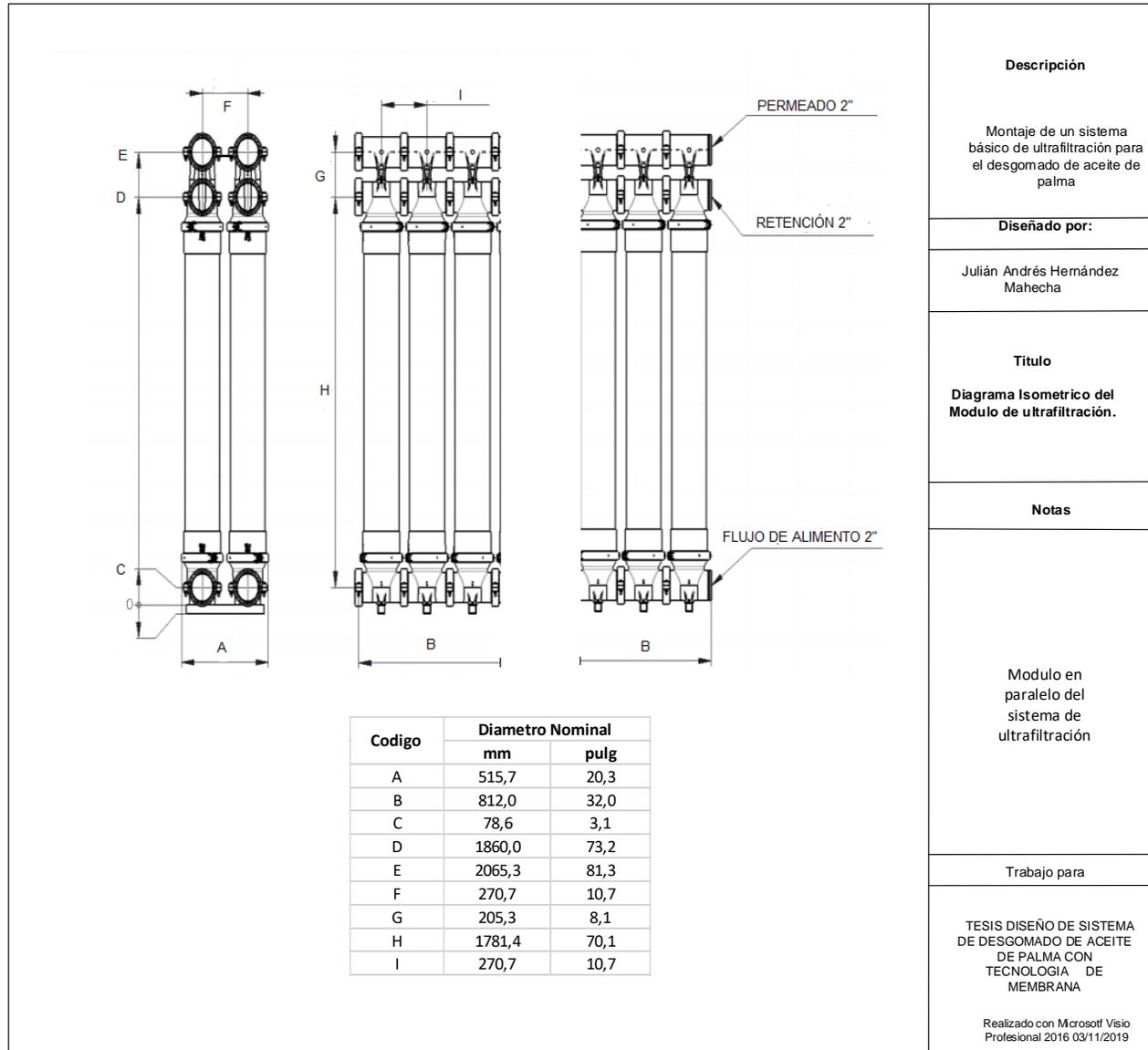
**Trabajo para**

TESIS DISEÑO DE SISTEMA DE DESGOMADO DE ACEITE DE PALMA CON TECNOLOGIA DE MEMBRANA

Realizado con Microsoft Visio Profesional 2016 03/11/2019

## Diseño de desgomado de aceite con tecnología de membrana

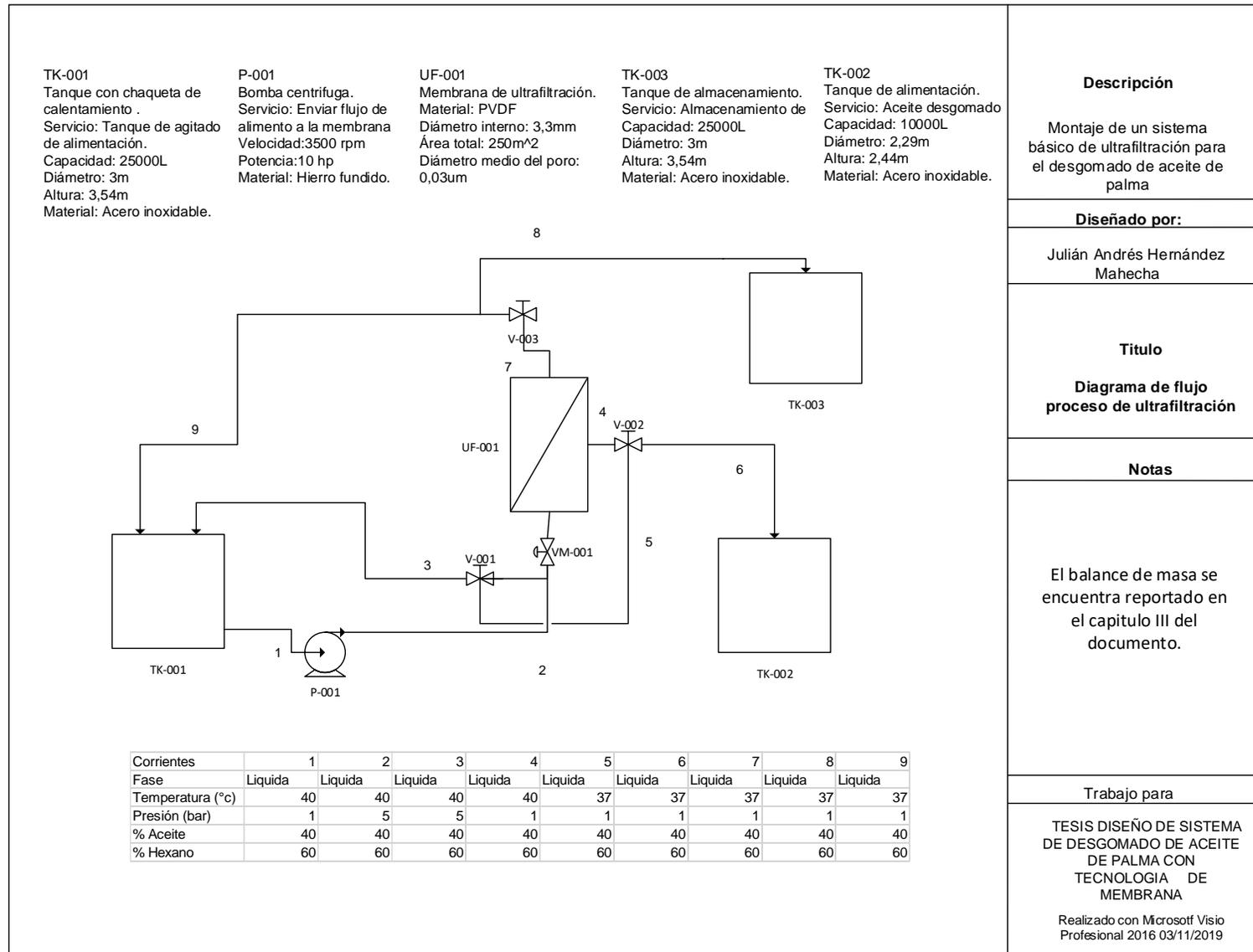
### Anexo A 2 Diagrama del dimensionamiento del módulo de ultrafiltración



<b>Descripción</b>
Montaje de un sistema básico de ultrafiltración para el desgomado de aceite de palma
<b>Diseñado por:</b>
Julián Andrés Hernández Mahecha
<b>Título</b>
Diagrama Isométrico del Módulo de ultrafiltración.
<b>Notas</b>
Modulo en paralelo del sistema de ultrafiltración
<b>Trabajo para</b>
TESIS DISEÑO DE SISTEMA DE DESGOMADO DE ACEITE DE PALMA CON TECNOLOGIA DE MEMBRANA
Realizado con Microsoft Visio Profesional 2016 03/11/2019

## Diseño de desgomado de aceite con tecnología de membrana

Anexo A 3. Diagrama PFD del proceso de la ultrafiltración.



**Descripción**

Montaje de un sistema básico de ultrafiltración para el desgomado de aceite de palma

**Diseñado por:**

Julián Andrés Hernández Mahecha

**Título**

Diagrama de flujo proceso de ultrafiltración

**Notas**

El balance de masa se encuentra reportado en el capítulo III del documento.

**Trabajo para**

TESIS DISEÑO DE SISTEMA DE DESGOMADO DE ACEITE DE PALMA CON TECNOLOGIA DE MEMBRANA

Realizado con Microsoft Visio Profesional 2016 03/11/2019

## Diseño de desgomado de aceite con tecnología de membrana

Anexo A 4 Diagrama P&ID del proceso de ultrafiltración.

