



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

EVALUACIÓN DEL PROCESO DE MICROFILTRACIÓN DE UN MÓDULO DE PLATO Y MARCO CONFORMADO POR MEMBRANAS DE ACETATO DE CELULOSA OBTENIDAS POR MÉTODO DE SÍNTESIS DE INVERSIÓN DE FASE, UTILIZANDO COMO MATERIA PRIMA BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum officinarum* L.)

Luis Alfonso Noriega Búrbano

Asesorado por el Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus

Guatemala, octubre de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

EVALUACIÓN DEL PROCESO DE MICROFILTRACIÓN DE UN MÓDULO DE PLATO Y MARCO CONFORMADO POR MEMBRANAS DE ACETATO DE CELULOSA OBTENIDAS POR MÉTODO DE SÍNTESIS DE INVERSIÓN DE FASE, UTILIZANDO COMO MATERIA PRIMA BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum officinarum* L.)

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LUIS ALFONZO NORIEGA BÚRBANO
ASESORADO POR EL ING. JORGE EMILIO GODÍNEZ LEMUS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Córdoba Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

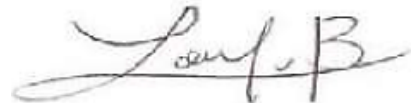
DECANA	Inga. Aurelia Anabela Córdoba Estrada
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Wong David
EXAMINADOR	Ing. Jaime Domingo Carranza González
EXAMINADOR	Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

EVALUACIÓN DEL PROCESO DE MICROFILTRACIÓN DE UN MÓDULO DE PLATO Y MARCO CONFORMADO POR MEMBRANAS DE ACETATO DE CELULOSA OBTENIDAS POR MÉTODO DE SÍNTESIS DE INVERSIÓN DE FASE, UTILIZANDO COMO MATERIA PRIMA BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum officinarum* L.)

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 25 de julio del 2018.



Luis Alfonzo Noriega Búrbano

Guatemala, 28 de febrero de 2020

Ingeniero
Williams Guillermo Alvarez Mejia
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Ingeniero Williams:

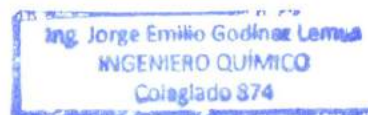
Por medio de la presente HAGO CONSTAR que he revisado y dado mi aprobación al trabajo de graduación titulado **“EVALUACIÓN DEL PROCESO DE MICROFILTRACIÓN DE UN MÓDULO DE PLATO Y MARCO CONFORMADO POR MEMBRANAS DE ACETATO DE CELULOSA OBTENIDAS POR MÉTODO DE SÍNTESIS DE INVERSIÓN DE FASE, UTILIZANDO COMO MATERIA PRIMA BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum officinarum L.*)”** del estudiante de Ingeniería Química Luis Alfonzo Noriega Búrbaro quien se identifica número de CUI 2636 73022 0101 y con el carné estudiantil 2013-18580.

Sin otro particular me suscribo de usted.

Atentamente,



Ing. Qco. Jorge Emilio Godínez Lemus
Colegiado No. 874
ASESOR





Guatemala, 25 de julio de 2018.
Ref. EIQ.TG-DI.032.2018.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el Registro de Evaluación del diseño de investigación EIQ-REG-TG-002, correlativo 017-2018, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
-Modalidad Seminario de Investigación-

Solicitado por el estudiante universitario: **Luis Alfonso Noriega Búrbano**.
Identificado con número de carné: **2636 73022 0101**.
Identificado con registro académico: **2013-18580**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

EVALUACIÓN DEL PROCESO DE MICROFILTRACIÓN DE UN MÓDULO DE PLATO Y MARCO CONFORMADO POR MEMBRANAS DE ACETATO DE CELULOSA OBTENIDAS POR MÉTODO DE SÍNTESIS DE INVERSIÓN DE FASE, UTILIZANDO COMO MATERIA PRIMA BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR (Saccharum officinarum L.)

El Trabajo de Graduación es asesorado por el Ingeniero Químico: **Jorge Emilio Godínez Lemus**.

Se autoriza al estudiante, proceder con la fase de ejecución del proyecto de investigación, del trabajo de graduación de acuerdo al cronograma aprobado.



"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

[Signature]
Ing. Ana Gloria Montes Peña
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Guatemala, 13 de octubre de 2020 .

Ref. EIQ 254.

Aprobación del informe final del trabajo de graduación

Ingeniera
Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Revisado el INFORME FINAL DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN (TESIS), DENOMINADO EVALUACIÓN DEL PROCESO DE MICROFILTRACIÓN DE UN MÓDULO DE PLATO Y MARCO CONFORMADO POR MEMBRANAS DE ACETATO DE CELULOSA OBTENIDAS POR MÉTODO DE SÍNTESIS DE INVERSIÓN DE FASE, UTILIZANDO COMO MATERIA PRIMA BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum officinarum* L.) del(la) estudiante Luis Alfonso Noriega Búrbano, se conceptúa que el documento presentado, reúne todas las condiciones de calidad en materia administrativa y académica (rigor, pertinencia, secuencia y coherencia metodológica), por lo tanto, se procede a la autorización del mismo, para que el(la) estudiante pueda optar al título de Ingeniería Química.

"Id y Enseñad a Todos"

Williams G. Álvarez Mejía
Ing. Williams G. Álvarez Mejía, MSc.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Cc. Archivo
WGAM/wgam



Formando Ingenieros Químicos en Guatemala desde 1939

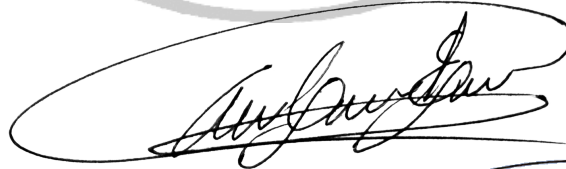


NO SALGAS
QUÉDATE EN
CASA

DTG. 307.2020.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DEL PROCESO DE MICROFILTRACIÓN DE UN MÓDULO DE PLATO Y MARCO CONFORMADO POR MEMBRANAS DE ACETATO DE CELULOSA OBTENIDAS POR MÉTODO DE SÍNTESIS DE INVERSIÓN DE FASE, UTILIZANDO COMO MATERIA PRIMA BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum officinarum L.*)**, presentado por el estudiante universitario: **Luis Alfonso Noriega Búrbano**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, octubre de 2020

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por darme el don de la vida, salud y sabiduría para lograr mis metas, además de su infinita bondad y amor.
Mis padres	Noé Noriega e Ingrid Búrbano, por su apoyo incondicional y esfuerzo a lo largo de mi vida.
Mis abuelas	María López (q. e. p. d) y Adela Rodas, por su amor, cuidado y consejos.
Mi abuelo	Víctor Búrbano, por su ejemplo, cariño y apoyo.
Mi hermano	Víctor Noriega, por ser un gran ejemplo en mi vida, su amistad y su cariño.
Mis tíos	Víctor Hugo, Ana María, Francisco Javier (q. e. p. d) y Josué Osmundo Noriega Rodas, Sandra Nohemí apellido y Edgar Antonio Búrbano López, por su ejemplo y apoyo.
Mis primos	Abraham, Hugo, Amada, Katherine, Francisco Adela y Josué Noriega, Daniela, Mario, Ana y Carlos Búrbano, por el cariño y los momentos compartidos.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	La cual me abrió sus puertas para formarme profesionalmente.
Facultad de Ingeniería	Por darme todas las herramientas para ser un excelente profesional.
Uniser S.A.	Por las donaciones de reactivos y permitirme usar sus instalaciones para el desarrollo de esta investigación.
Mis amigos	Por ser una importante influencia en mi carrera, entre otras cosas.
Asesor	Al Ingeniero Jorge Godínez Lemus por el apoyo y colaboración a lo largo del desarrollo de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

INDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SIMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
HIPÓTESIS	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Estructura y propiedades fisicoquímicas de la celulosa.....	5
2.2. Métodos de obtención de la celulosa.	6
2.2.1. Obtención de celulosa mediante método químico.	6
2.2.2. Obtención de celulosa mediante método mecánico.....	6
2.2.3. Obtención de celulosa mediante método quimio- termo mecánico.	7
2.3. Obtención del acetato de celulosa.....	7
2.3.1. Acetilación bajo condiciones de soluciones homogéneas.	8
2.3.2. Acetilación bajo condiciones de soluciones heterogéneas.	9

2.4.	Estructura y propiedades del acetato de celulosa.....	9
2.5.	Fuentes del acetato de celulosa.....	9
2.6.	Método de inversión de fase.	10
2.7.	Aspectos generales de las técnicas de inversión de fase.	11
2.8.	Fisicoquímica de proceso de separación.	12
2.8.1.	Difusión simple	12
2.8.2.	Descripción de la separación de fases polímero / disolvente / no-disolvente.	13
2.9.	Membranas	14
2.9.1.	Estructura de las membranas.....	15
2.10.	Procesos de separación por membranas.....	16
2.10.1.	Osmosis inversa	17
2.10.2.	Nanofiltración.....	17
2.10.3.	Ultrafiltración.....	17
2.10.4.	Microfiltración	18
2.11.	Definición del coeficiente de permeabilidad	21
2.12.	Porcentaje de recuperación	21
2.13.	Retención	21
2.14.	Aplicaciones de las membranas.....	22
2.15.	Estado actual de la tecnología de membranas	25
2.15.1.	Tecnologías maduras	25
2.15.2.	Tecnologías en desarrollo	25
2.15.3.	Poco aplicables	25
2.16.	Módulos de membrana.....	26
2.16.1.	Módulos de plato y marco.....	27

3.	DISEÑO METODOLÓGICO	29
3.1.	Variables.....	29
3.1.1.	Variables de control	29
3.1.2.	Variables independientes.....	33
3.1.3.	Variables dependientes.	34
3.2.	Delimitación de campo de estudio.....	34
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	35
3.4.	Recursos materiales disponibles (equipo, cristalería, reactivos).....	35
3.4.1.	Equipo y materiales	36
3.4.2.	Instrumentos de medición.....	37
3.4.3.	Equipo de protección personal.....	38
3.4.4.	Cristalería.....	39
3.4.5.	Reactivos y materia prima.....	39
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa.	40
3.5.1.	Recepción de la materia prima	40
3.5.2.	Pre tratamiento de la materia prima	41
3.5.3.	Extracción de celulosa.	44
3.5.4.	Acetilación de la celulosa.....	47
3.5.5.	Síntesis por método de inversión de fase por inmersión - precipitación.	51
3.5.6.	Preparación de membranas.....	51
3.6.	Diseño experimental del proceso de microfiltración.	53
3.6.1.	Preparación de las soluciones	58
3.6.2.	Evaluación de la membrana.....	59
3.7.	Recolección y ordenamiento de la información.	61

3.8.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la Información.	62
3.9.	Análisis estadístico.....	63
3.9.1.	Evaluación de hipótesis 1.....	63
3.9.2.	Evaluación de hipótesis 2.....	64
3.9.3.	Evaluación de hipótesis 3.....	65
3.9.4.	Evaluación de hipótesis 4.....	66
4.	RESULTADOS.....	67
4.1.	Evaluación del proceso de microfiltración.	67
4.2.	Evaluación del flujo de permeato en función de la presión transmembrana.	69
4.3.	Evaluación de la retención en función del flujo de alimentación.	73
4.4.	Evaluación del porcentaje de recuperación en función del flujo de permeato.	77
4.5.	Coeficientes de permeabilidad.	81
4.6.	Modelos de saturación de los procesos de filtrado.	81
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	83
	CONCLUSIONES.....	87
	RECOMENDACIONES.....	89
	BIBLIOGRAFÍA.....	91
	APÉNDICES.....	95
	ANEXOS.....	113

INDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Mecanismo de reacción del acetato de celulosa.....	8
2.	Difusión simple en procesos de membranas.....	12
3.	Diagrama ternario.....	14
4.	Proceso de difusión en una membrana.....	15
5.	Tipos de estructuras de las membranas	16
6.	Módulo de plato y marco.....	28
7.	Molienda de bagazo de caña de azúcar.....	41
8.	Lavado de azúcares con agua suavizada.....	42
9.	Diagrama de proceso de pre-tratamiento del bagazo de caña de azúcar.	43
10.	Etapas del proceso de extracción alcalina.....	45
11.	Análisis granulométrico.....	45
12.	Diagrama del proceso de la extracción de celulosa.....	46
13.	Proceso de acetilación de celulosa.....	47
14.	Separación de la fase coloidal de la mezcla ácida.....	48
15.	Secado del acetato de celulosa.....	49
16.	Diagrama de proceso de la acetilación de celulosa.....	50
17.	Preparación de las membranas.....	52
18.	Carcasa de accesorios de PVC.....	54
19.	Sistema sustituible de plato y marco.....	54
20.	Modelado del módulo, vista frontal.....	55
21.	Modelado del módulo, vista isométrica.....	55
22.	Árbol de variables	57

23.	Preparación de soluciones.....	58
24.	Colocación de membranas para proceso de filtración.	59
25.	Equipo de cuantificación de concentración de hierro.....	60
26.	Flujo de permeato en función de la presión transmembrana a 1 ppm.	69
27.	Flujo de permeato en función de la presión transmembrana a 3 ppm.	70
28.	Flujo de permeato en función de la presión transmembrana a 5 ppm.	71
29.	Curvas de flujo.....	72
30.	Retención en función del flujo de alimentación a 1 ppm.....	73
31.	Retención en función del flujo de alimentación a 3 ppm.....	74
32.	Retención en función del flujo de alimentación a 5 ppm.....	75
33.	Curvas de retención.....	76
34.	Porcentaje de recuperación en función del flujo de permeato a 1 ppm.	77
35.	Porcentaje de recuperación en función del flujo de permeato a 3 ppm.	78
36.	Porcentaje de recuperación en función del flujo de permeato a 5 ppm.	79
37.	Curvas de recuperación.....	80

TABLAS

I.	Comparación entre los procesos de separación.	19
II.	Características de las membranas utilizadas en procesos de separación.....	20
III.	Aplicaciones de las membranas.....	23
IV.	Definición de variables de control en pre-tratamiento de la muestra....	29
V.	Definición de variables de control en extracción de celulosa.	30
VI.	Definición de variables de control en acetilación de celulosa.....	31
VII.	Definición de variables de control en coagulación del polímero.	31
VIII.	Definición de variables de control en preparación de la membrana.	32
IX.	Definición operacional de variables independientes.	33
X.	Definición operacional de las variables dependientes.....	34
XI.	Recolección de datos experimentales.....	61
XII.	Toma de resultados del proceso de microfiltración.	62
XIII.	ANOVA hipótesis 1	63
XIV.	ANOVA hipótesis 2.....	64
XV.	ANOVA hipótesis 3.....	65
XVI.	ANOVA hipótesis 4.....	66
XVII.	Resultados con flujo de alimentación de concentración de alimentación de 1 ppm de hierro.	67
XVIII.	Resultados con flujo de alimentación de concentración de alimentación de 3 ppm de hierro.	68
XIX.	Resultados con flujo de alimentación de concentración de alimentación de 5 ppm de hierro.	68
XX.	Valores de los coeficientes de permeabilidad.	81
XXI.	Modelos de saturación obtenidos del análisis lineal del flujo de permeato en función de la presión transmembrana.	81

XXII.	Modelos de saturación obtenidos del análisis lineal del porcentaje de retención en función del flujo de alimentación.	82
XXIII.	Modelos de saturación obtenidos mediante regresiones lineales.....	82

LISTA DE SIMBOLOS

Símbolo	Significado
[Fe]_p	Concentración en el permeato
[Fe]_a	Concentración en la alimentación
C	Corrida
s²	Desviación estándar
Q_a	Flujo de alimentación
Q_p	Flujo de permeato
h	Hora
m³	Metro cúbico
n	Número de mediciones
ppm	Partes por millón
Pa	Pascal
%Rechazo	Porcentaje de rechazo
%Recuperación	Porcentaje de recuperación
P_{in}	Presión de alimentación
P_{out}	Presión de permeato
PTM	Presión transmembrana
R_t	Retención
s	Segundo
T	Tiempo
X_i	Valor de cada una de las mediciones
\bar{x}	Valor promedio de las mediciones

GLOSARIO

Acetato de celulosa	Éster orgánico obtenido a través de la celulosa de las plantas tras acetilarla con anhídrido acético, se utiliza para la fabricación de plásticos.
Aglutinante	Sustancia que provoca una formación entrelazada, adherencia y de soporte en una mezcla.
Analito	Componente químico de interés cuya presencia o contenido se desea conocer, identificar y cuantificar, mediante un proceso de medición química.
Celulosa	Polímero natural compuesto únicamente de moléculas de glucosa, es rígido, insoluble en agua y compuesto de moléculas de β -glucosa.
Coefficiente de permeabilidad	Capacidad de un cuerpo poroso de permitir el flujo de cierto fluido a través de cierta área.
Colodión	Solución de nitrocelulosa en una mezcla de éter y alcohol.
Electrolitos	Sustancia que contiene en su composición iones libres permitiendo que se comporte como un conductor eléctrico.

Ertalon	Polímero que contiene enlaces de tipo amida, sin porosidades y de alta resistencia mecánica.
Esterificación	Proceso por el cual se sintetiza un éster, mediante la reacción entre ácidos carboxílicos y alcoholes.
Flujo	Volumen por unidad de tiempo que atraviesa una membrana.
Fraccionamiento	Proceso de separación donde varias especies son de interés.
Glucosa	Compuesto orgánico monosacárido con fórmula molecular $C_6H_{12}O_6$, es un tipo de azúcar que se encuentra libre en las frutas y en la miel.
Gradiente de presión	Diferencia de presión entre dos puntos en el seno de un fluido.
Hemicelulosa	Polisacárido orgánico compuesto por más de un tipo de monómeros que forman una cadena lineal ramificada y forman parte de las paredes de las células vegetales.
Hexosa	Compuestos orgánico monosacárido con fórmula molecular $C_6H_{12}O_6$, su principal función es producir energía.

Ligninas	Polímeros orgánicos complejos que componen materiales estructurales importantes en los tejidos de soporte de plantas vasculares y de algunas algas.
Membrana	En procesos de separación, es una barrera semipermeable que permite el paso selectivo de algunas especies, estos se realizan bajo la acción de una fuerza motriz.
Mesh	Barrera hecha por hebras entrelazadas de metal, fibras u otros materiales maleables. Puede ser utilizado para separar sólidos pulverizados de diferentes tamaños.
Módulos de membranas	Equipo concebido para colocar membranas en procesos de separación.
Monosacáridos	Glúcidos más simples, poseen de tres hasta siete átomos de carbono.
Operación unitaria	En ingeniería química y sus campos relacionados, una operación unitaria es un paso básico en un proceso que implica un cambio físico o transformación química.
Pentosa	Compuestos orgánicos monosacáridos con fórmula molecular $C_5H_{10}O_5$, pueden llevar grupos cetónicos o aldehídicos.

Permeato	Fracción del flujo de alimentación que atraviesa la membrana.
Polisacárido	Biomoléculas formadas por la unión de una gran cantidad de monosacáridos, cumplen funciones de reservas energéticas y estructurales.
Porcentaje de recuperación	Conversión del caudal de alimentación que filtra la membrana al caudal de permeado.
Presión transmembrana	Diferencia de presiones que hay que crear entre ambos lados de la membrana para conseguir un determinado flujo de permeato.
Proceso de microfiltración	Proceso de separación física en el cual el tamaño de el poro de una membrana oscila desde 0,1 hasta 1 micras, reteniendo elementos monovalentes, materia orgánica disuelta, pequeños coloides, bacterias y virus.
Retención	En procesos de separación, es la fracción del flujo de alimentación que no atraviesa la membrana, se le denomina concentrado o retentato.
Sulfato de aluminio	Sal de fórmula molecular $Al_2(SO_4)_3$ que en condiciones ambientales estándar se presenta como un sólido granulado y de color blanco. Es ampliamente usado en la industria como coagulante.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación demuestra la evaluación de una separación mediante un proceso de microfiltración, el cual se llevó a cabo mediante un módulo de plato y marco conformado por una configuración en serie de membranas de acetato de celulosa obtenidas a partir de bagazo de caña de azúcar, dicha evaluación se llevó a cabo en un soporte de accesorios de PVC adaptable a la estación experimental para membranas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Para este análisis se utilizó en la alimentación una solución acuosa de dos especies con afinidad fisicoquímica entre sí, las cuales fueron sulfato ferroso heptahidratado (FeSO_4) con sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), como aglutinante, esto con el fin de mantener el tamaño de la partícula en el rango de la microfiltración y que la solución fuese apta para la selectividad del análisis. Se varió tres veces la concentración del flujo de alimentación para regular la alimentación cuatro veces mediante la apertura de una válvula reguladora de globo. Con esto se obtuvieron los datos experimentales del flujo de alimentación, el flujo de permeato y la concentración de hierro en ambos casos, esto mediante el uso de un equipo de medición específico para la determinación de ion hierro (Fe^{+3}) en soluciones (IRONMR TESTKIT H138040 - HANNA INSTRUMENTS®).

Los datos obtenidos permitieron evaluar la capacidad de retención, el porcentaje de rechazo, el gradiente de presión transmembrana producida en el permeato y el porcentaje de recuperación.

OBJETIVOS

General

Evaluar el proceso de microfiltración de un módulo de plato y marco conformado por una configuración de membranas colocadas en serie obtenidas por medio del método de síntesis de inversión de fase, utilizando bagazo de caña de azúcar como materia prima.

Específicos

1. Evaluar el flujo de permeato en función de la presión transmembrana, a diferentes concentraciones de una solución de sulfato ferroso heptahidratado.
2. Obtener modelos de saturación del proceso de filtrado a diferentes concentraciones de una solución de sulfato ferroso heptahidratado.
3. Analizar la retención en función del flujo de alimentación, a diferentes concentraciones de una solución de sulfato de hierro heptahidratado.
4. Analizar el porcentaje de recuperación en función del flujo de permeato, a diferentes concentraciones de una solución de sulfato de hierro heptahidratado.

5. Generar las curvas de operación con una solución de sulfato de hierro heptahidratado para el efecto de las membranas de acetato de celulosa obtenidas a partir de bagazo de caña de azúcar.

6. Determinar el coeficiente de permeabilidad a diferentes concentraciones de una solución de sulfato de hierro heptahidratado.

HIPÓTESIS

¿Es posible cuantificar experimentalmente y determinar el comportamiento del proceso de filtración de un conjunto de membranas de acetato de celulosa fabricadas a partir de bagazo de caña de azúcar, soportadas en un módulo de plato y marco adaptable a la estación experimental para membranas del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala?

Hipótesis nula:

H_{0,1}: no existe diferencia significativa en la concentración del permeato al variar el flujo de alimentación.

H_{0,2}: no existe diferencia significativa en la presión transmembrana al variar el flujo de alimentación.

H_{0,3}: no existe diferencia significativa en la capacidad de retención de la membrana al variar la concentración del flujo de alimentación.

H_{0,4}: no existe diferencia significativa en el porcentaje de recuperación al variar la concentración del flujo de alimentación.

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

Hipótesis alternativa:

H_{0,1}: si existe diferencia significativa en la concentración del permeato al variar el flujo de alimentación.

H_{0,2}: si existe diferencia significativa en la presión transmembrana al variar el flujo de alimentación.

H_{0,3}: si existe diferencia significativa en la capacidad de retención de la membrana al variar la concentración del flujo de alimentación.

H_{0,4}: si existe diferencia significativa en el porcentaje de recuperación al variar la concentración del flujo de alimentación.

$$\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$$

INTRODUCCIÓN

Una membrana es una barrera permosselectiva entre dos fases generalmente flexible y resistente, esta restringe o favorece el paso de determinados iones o moléculas de los fluidos que se someten a procesos de filtración, para un análisis de separación o fraccionamiento, esto se realiza bajo la acción de una fuerza impulsora o gradiente.

Actualmente por su efecto ambiental positivo se ha incrementado el uso de fibras naturales en las que predomina la celulosa, porque poseen la ventaja de ser biodegradables y que requieren un bajo consumo energético para su obtención. Los materiales celulósicos post tratados como el bagazo de caña de azúcar tienen un uso limitado, debido a esto las membranas a partir de desechos agroindustriales constituyen un campo escasamente desarrollado en el país a pesar de la gran versatilidad de aplicaciones que éstas pueden aportar a la industria guatemalteca.

Según métodos estandarizados, para la preparación de las membranas aptas para microfiltración, el bagazo de caña de azúcar se debe de someter a un pre tratamiento de lavado y secado para molerlo y tamizarlo al tamaño de la partícula en el rango de la filtración que se desea desarrollar.

Para la extracción de celulosa existen diferentes métodos ya desarrollados para fines de obtención de celulosa vegetal, estos se realizan mediante tratamientos termoquímicos ácidos o alcalinos.

La acetilación o etanoilación de la celulosa se lleva a cabo por medio de reacciones de esterificación en fase homogénea, para ello se utilizan agentes reductores y catalizadores. La síntesis para fines de esta investigación se realizó por el método de inversión de fase por inmersión – precipitación y con ello se obtuvieron membranas mediante una secuencia de etapas: evaporación, coagulación y tratamiento de conservación.

Con las membranas ya sintetizadas, se evaluó la capacidad filtrante mediante un módulo de plato y marco fabricado para la investigación, este permite contener una mayor área de la membrana y así mejorar el proceso de separación.

Mediante la evaluación de las membranas se realizaron pruebas de retención, recuperación y flujo; y con ello se obtuvieron modelos de saturación y curvas de operación de los procesos de filtración.

Actualmente Guatemala carece de investigaciones profundas o detalladas acerca de los procesos de separación por medio de membranas selectivas. Además, el reciclaje y reutilización del bagazo de caña de azúcar en el país es muy viable al ser una potencia azucarera a nivel mundial.

Con esta investigación se espera obtener un método de separación de bajo costo favoreciendo así al tratado de los desechos producidos por la gran demanda de caña de la industria azucarera en Guatemala.

1. ANTECEDENTES

Bajo la necesidad de obtener agua potable a partir de agua de mar, en el año de 1953 Charles E. Reid propone un método novedoso de purificación de agua al cuál llama osmosis inversa, proceso que consistía en la utilización de una membrana semipermeable para eliminar iones, moléculas y partículas del agua con extrema dureza.

Sin embargo, existía el problema que para que dicho proceso de separación se llevara a cabo se carecía de una membrana que resistiera químicamente las soluciones salinas y que el tamaño de poro permitiera una correcta filtración, esta problemática fue resuelta en el año 1959 gracias al descubrimiento de la membrana de acetato de celulosa por el mismo Charles E. Reid y bajo la ayuda del investigador E. J. Breton.

A partir de los años 1970 la demanda de energía y productos químicos provenientes del petróleo se incrementaron notablemente, por lo cual se comenzaron a incorporar procesos para convertir productos agrícolas y residuos locales en fuentes de energía y en valiosos productos con valor agregado.

Durante los años de 1960 a 1970 se realizó el estudio, la formulación y la comercialización de membranas aptas para retención por parte de Loeb y Sourirajan, permitiendo comenzar con el desarrollo de membranas sintéticas adaptables a procesos industriales a gran escala.

No se han encontrado estudios que abarquen a profundidad la preparación y el estudio de la capacidad de retención de una membrana obtenida a partir de bagazo de caña de azúcar, sin embargo, existen algunos estudios acerca de membranas a base de residuos en las que se mencionan algunas variables importantes a ser medidas y controladas mediante su preparación y evaluación.

En el año 2016 en la Universidad de San Carlos de Guatemala, Robin Isael Fuentes González presentó en la Escuela de Ingeniería Química el estudio de pregrado Preparación de una membrana compuesta para el proceso de microfiltración con base porosa y estrato selectivo denso (pet).

En este estudio se realizaron diferentes pruebas para obtener las condiciones óptimas para la preparación de una membrana apta para el proceso de microfiltración con base porosa y estrato selectivo denso, donde se obtuvo como resultado que la mejor combinación y las mejores características se obtuvieron a una temperatura de 280 °C, porcentaje en peso 2:1 (PET:NaCl), y tiempo de preparación 15 min, obteniendo así el mayor porcentaje de poros en el rango de 0 a 20 micras con un valor de 21,1 % del total contabilizado, y por último se concluyó que el método utilizado no era factible para preparar membranas de microfiltración que se caracterizan por tener poros con diámetro promedio en el rango de 0,2 a 10 micras.

En la Universidad de Chile Santiago de Chile en el año 2015, en el Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología, Natalia Fernanda Vicencio Ovalle desarrolló el estudio Síntesis y caracterización de membranas para osmosis inversa con capacidad anti-bioincrustante, por incorporación de nano partículas de dióxido de titanio.

Investigación en la cual se desarrollaron membranas para osmosis inversa con capacidad anti-bioincrustante por la incorporación de nanopartículas de dióxido de titanio simple y modificado con dodecilsulfato sódico, luego fueron caracterizadas por Difracción de Rayos X (XRD), Espectroscopia infrarroja por Transformada de Fourier, Microscopía electrónica de barrido (SEM), Espectroscopia de energía dispersa por rayos X (EDX) y Microscopía de fuerza atómica (AFM).

En el año 2015 en la Universidad de San Carlos de Guatemala, Ana Gloria Montes Peña desarrolló el estudio Preparación de una membrana polimérica a partir de polietileno tereftalato (PET), a diferentes tiempos y temperaturas de sinterización.

La investigación presenta las condiciones óptimas (temperatura y tiempo de sinterización) donde se obtuvieron las mejores características de las membranas sintetizadas. Mediante un análisis estadístico de histogramas de frecuencia y curtosis se determinó que las condiciones donde la membrana poseía mayor uniformidad en el tamaño de poro, distribución y diámetro fueron a 240 grados Celsius durante 20 minutos en el proceso de sinterización

En la Universidad de San Carlos de Guatemala en el año 2011, en la Escuela de Ingeniería Química, Wendy Susana García Vásquez desarrolló el estudio de investigación Separación de propano y propileno por medio de la membrana de polióxido de etilenoco-epiclorhidrina) facilitada por ión plata.

En este estudio se analizó la forma de construcción de la membrana y las características finales de esta, tal como las propiedades de permeación de gases a 25 y 35 °C. También se determinó la eficacia y eficiencia del transporte.

En el año 1998 en la Universidad Politécnica de Valencia, en el departamento de Ingeniería Química y Nuclear José Marcial González Zafrilla desarrolló el estudio de Post-Grado Fabricación de membranas de acetato de celulosa aptas para ósmosis inversa y nanofiltración mediante el método de inversión de fase.

Los resultados obtenidos de este estudio permitieron evaluar los efectos de la variación de las condiciones de fabricación sobre el comportamiento y las características de las membranas, se evaluó el comportamiento de nanofiltración frente a diferentes sales como lo fueron NaCl, Mg²⁺ y Ca²⁺ obteniendo un porcentaje de filtración alto para cada uno de los tratamientos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Estructura y propiedades fisicoquímicas de la celulosa

La celulosa (biomolécula más importante para los fines de esta investigación) es el biopolímero principal de las paredes celulares vegetales, es un carbohidrato de la clase homopolisacáridos es decir que está formada por una sola clase de monosacáridos y lleva por nombre glucosa. La glucosa es una hexosa incolora, inodora e insoluble en agua y en la mayoría de solventes orgánicos, es un polímero estructuralmente rígido formado por millones de unidades β -glucosa. “La fórmula empírica de la celulosa se expresa como $(C_6H_{10}O_5)_n$.”¹ Donde el valor mínimo que n puede tomar es igual a doscientos, mientras mayor sea el número de n, mayor es la longitud de la fibra.

En toda ocasión, la celulosa presenta una organización estructural lineal, sus unidades se enlazan mediante enlaces de hidrógeno entre los grupos hidroxilos lo cual lo hace insoluble en agua, se sabe que esta forma una cadena extendida que permite la relación con otras cadenas paralelas, de este modo se construye una red muy resistente originando estructuras muy compactas. “La sintetización de la celulosa se debe a la reacción de las enzimas GDP y la UDP, estas adicionan moléculas de glucosa para formar cadenas de celulosa.”²

¹ FRÍAS, Teresa. *XVI Verano de la Investigación Científica 2006*. p. 75.

² Instituto Suizo de Bioinformática. *Descripción de moléculas orgánicas*. <https://enzyme.expasy.org/EC/2.4.1.12>.

La lignina y las hemicelulosas que acompañan a la celulosa en las células vegetales engloban las pentosas y las hexosas, las cuales son los principales componentes de la biomasa del bagazo de caña de azúcar.

2.2. Métodos de obtención de la celulosa

Se puede obtener celulosa a partir de biomasa mediante diversos métodos dependiendo del material de partida y el proceso químico a emplearse, entre estos se pueden mencionar: método químico, método mecánico y método químio-termo mecánico.

2.2.1. Obtención de celulosa mediante método químico

Se obtiene únicamente mediante tratamientos de la biomasa con diferentes reactivos químicos a elevadas condiciones de temperatura y presión. Esta celulosa se caracteriza por dar un producto más resistente y compacto, debido a que en el proceso no se producen modificaciones en su estructura mecánica.

2.2.2. Obtención de celulosa mediante método mecánico

Se obtiene desfibrando la materia prima a elevadas condiciones de temperatura y presión. Se caracteriza por ser menos resistente que la celulosa obtenida mediante tratamientos químicos, porque sufren un importante cambio en su estructura interna durante su proceso de manufactura.

2.2.3. Obtención de celulosa mediante método químio-termo mecánico

Utiliza operaciones de los dos procesos anteriores, tal como es el caso de esta investigación, la celulosa resultante de estos procesos tiene una forma pastosa con un alto contenido de humedad y tiene aún una gran proporción de lignina, ésta le da un tono color café, similar al color natural de la madera.

2.3. Obtención del acetato de celulosa

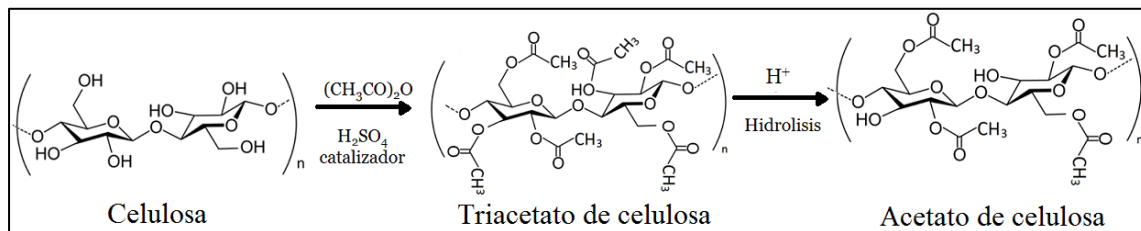
En la segunda fase de la investigación se busca la obtención de acetato de celulosa mediante distintos métodos y tratamientos de la celulosa obtenida, en la mayoría de los tratamientos se llevan a cabo reacciones con mezclas de ácidos y anhídridos, en presencia de catalizadores, es decir con diversos electrolitos que permitan obtener compuestos de adición.

De la esterificación de la celulosa obtenida a partir de bagazo de caña de azúcar se obtendrá el triacetato de celulosa, este tiene pocos usos y aplicaciones en el ámbito técnico e industrial por su baja solubilidad en solventes orgánicos.

“Por hidrolisis parcial del triacetato de celulosa se obtiene acetato de celulosa el cual tiene gran importancia técnica, ya que ningún otro derivado de la celulosa da tantos productos de alta calidad y aplicaciones como este.”³

³ CARREÑO, Solly. *Obtención de acetato de celulosa a partir de residuos celulósicos post consumo*. p. 22.

Figura 1. Mecanismo de reacción del acetato de celulosa



Fuente: elaboración propia, empleando ChemSketch 2020.

“La acetilación de celulosa puede realizarse mediante diferentes enfoques según condiciones: bajo condiciones de soluciones heterogéneas y bajo condiciones de soluciones homogéneas.”⁴, este último es el utilizado en dicha investigación.

2.3.1. Acetilación bajo condiciones de soluciones homogéneas

Este proceso tiene la ventaja de un control más elevado del grado de sustitución de la muestra trabajada, produciendo derivados sustituidos a lo largo de la cadena del polímero, con la limitante que los productos obtenidos de estas reacciones no tienen posibilidad de competir comercialmente con los polímeros celulósicos convencionales, debido a que los procesos implicados en su obtención son mucho más costosos que los tradicionales, sin contar con que no cumplen con todas las exigencias toxicológicas y ecológicas exigidas actualmente.

⁴ HENINRICH, Jürgen. *Determination of the substitution pattern in the polymer chain of the cellulose acetate*. p. 30.

2.3.2. Acetilación bajo condiciones de soluciones heterogéneas

Este proceso no siempre incluye un pretratamiento de la materia prima orgánica o biomasa, lo cual lo hace mucho más barato respecto al anterior. Lo única desventaja de este tipo de acetilación es la irregularidad de la sustitución, esta se debe a que los derivados uniformemente sustituidos de la celulosa obtenida presentan mayor resistencia a la degradación enzimática respecto del tiempo, esto varía en función de la materia prima utilizada y las condiciones de donde se obtuvo está.

2.4. Estructura y propiedades del acetato de celulosa

La celulosa al estar esterificada, cerca del sesenta y cinco por ciento se calcula como ácido acético (CH_3COOH), debido a que los tres grupos hidroxilos que lo constituyen reaccionan en su totalidad con este, las fuerzas que estabilizan la estructura cuaternaria en las cadenas disminuyen, aunque el material puede ser aun altamente cristalino y sólido.

2.5. Fuentes del acetato de celulosa

Primordialmente el acetato de celulosa se obtiene de pulpas de maderas procesadas, es decir, de la industria papelera en su mayoría. La pulpa o sobrante se procesa usando anhídrido acético para formar hojuelas de acetato muy finas de las cuales se fabrican una cantidad inmensa de productos derivados.

También se puede obtener acetato de celulosa mediante el método de inversión de fibras textiles vegetal con ácido acético (CH_3COOH), usando ácido sulfúrico (H_2SO_4), como catalizador de la reacción, a presión atmosférica.

Debido a que la celulosa utilizada en la producción del acetato proviene de biomasa orgánica, como lo será en el caso de esta investigación, significa que su producción proviene de una fuente renovable, natural y biodegradable; cualidades sumamente importantes en la industria actual, manteniendo parámetros de producción más limpia y sostenibilidad.

2.6. Método de inversión de fase

“En una inversión de fase, una disolución de polímero en un disolvente orgánico y/o inorgánico, depositada sobre un soporte o decantador, sufre una precipitación para dar lugar a dos fases (una sólida y una líquida).”⁵

La fase sólida constituye el cuerpo o soporte de la membrana, con cada uno de los poros rellenos por la fase líquida del solvente en donde está sumergida. Actualmente la inversión de fase es el proceso más empleado en la fabricación de membranas a partir de biomasa y también el más versátil, permitiendo la obtención de membranas de diferentes morfologías, estructuras y características aplicables a diferentes fines, dicho proceso se lleva a cabo en una de las etapas de la preparación de las membranas para esta investigación.

Es importante recalcar que la elección del material que compondrá la membrana es muy importante, porque condiciona las propiedades de transporte que se darán en la misma, además de los procedimientos preparativos que se emplearán las morfologías posibles de alcanzar con estos. El método de

⁵ BARRANCA, Antonio. *Diseño de un sistema de filtrado de sangre para su análisis mediante membranas de mf/uf*. p. 14-15.

fabricación influirá directamente en las propiedades mecánicas, termo-resistentes y quimio-resistentes del material obtenido.

2.7. Aspectos generales de las técnicas de inversión de fase

Los distintos procesos de inversión de fase tienen en común que en ellos una disolución de dos o más componentes se separa en dos fases después de un equilibrio másico. Esta disolución llamada colodión tiene generalmente como componente principal uno o varios polímeros y uno o varios disolventes los cuales deben de separarse mediante métodos físicos o mecánicos.

La separación de fases se produce al hacerse termodinámicamente inestable la composición del colodión mediante uno de los dos siguientes mecanismos:

- Inducción de separación por difusión de componente

En este mecanismo se produce por una variación de la composición del colodión producida por la difusión de un componente desde otra fase ajena al colodión, por pérdida de un componente del colodión, o bien por una combinación de ambos mecanismos.

- Inducción de separación por descenso de la temperatura

La disolución inicialmente estable a una temperatura alta se desestabiliza al disminuir la temperatura por el cambio de propiedades fisicoquímicas del sistema.

2.8. Físicoquímica de proceso de separación

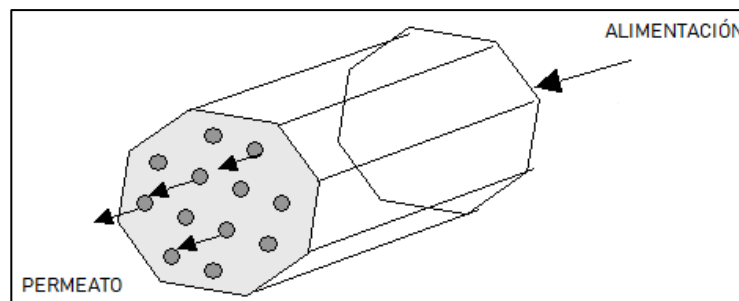
A continuación, se describe el proceso de separación de la físicoquímica.

2.8.1. Difusión simple

Proceso por el cual se produce un flujo de moléculas a través de una membrana permeable (con poros), sin que exista un aporte externo de energía, se encuentra determinado por una diferencia de concentración molecular entre los dos medios separados por la membrana, su principal fuerza impulsora es el aumento de entropía total del sistema.

“En este proceso el flujo de las moléculas se produce siguiendo un alto gradiente de concentración, las moléculas traspasan la membrana desde el medio donde se encuentran una mayor concentración, hacia el medio donde se encuentran en menor concentración.”⁶

Figura 2. **Difusión simple en procesos de membranas**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2017.

⁶ ESCOBAR, Luis. *Revista Actualidades Biológicas*. p. 42.

2.8.2. Descripción de la separación de fases polímero / disolvente / no-disolvente

En la separación de fases que se llevó a cabo en una de las etapas de esta investigación intervinieron al menos tres componentes:

- Disolvente, que es la sustancia en la que se disuelve el polímero, usualmente orgánico.
- No disolvente, que es la sustancia que no disuelve al polímero pero que es miscible con el disolvente.
- Polímero, que es el objetivo para obtener para fines de esta investigación.

El sistema más sencillo que se puede estudiar es pues un sistema ternario, entiéndase un sistema de tres fases. Para representar la composición en sistemas ternarios se suele utilizar el diagrama triangular equilátero (con sus tres ángulos y lados iguales), donde cada punto se corresponde biunívocamente con una composición en fracciones de cada uno de los tres componentes. Las composiciones representadas en un diagrama siempre deben ser para la misma presión y temperatura, es decir para condiciones externas constantes.

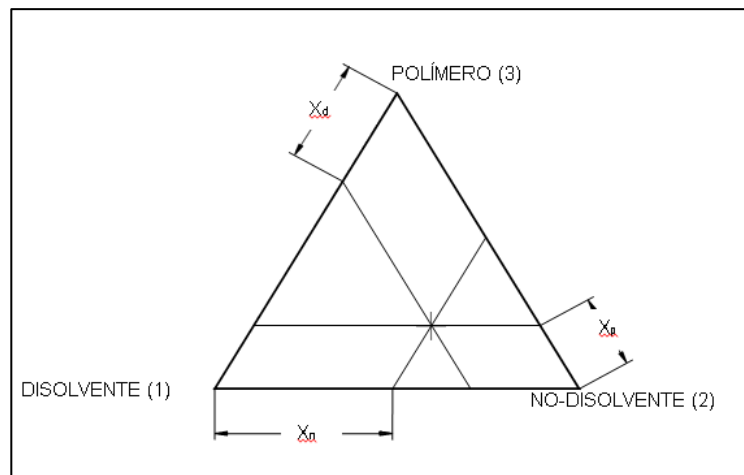
En la figura 3 queda reflejado como se sitúa una composición correspondiente a fracciones x_p (polímero), x_d (disolvente), x_n (no-disolvente), cuando los lados del triángulo valen la unidad.

Los vértices del triángulo se corresponden con composiciones puras de los componentes y los lados con composiciones bifásicas o compuestas. Normalmente se utilizan diagramas que consideran fracciones en peso de cada

componente expresadas como (x_d, x_n, x_p) , o bien bajo la notación equivalente (x_1, x_2, x_3) .

La presencia de más componentes (aditivos), haría que las fracciones reales no sumaran la unidad. No obstante, las cantidades de éstos suelen ser bastante más pequeñas que el resto de los componentes.

Figura 3. **Diagrama ternario**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2017.

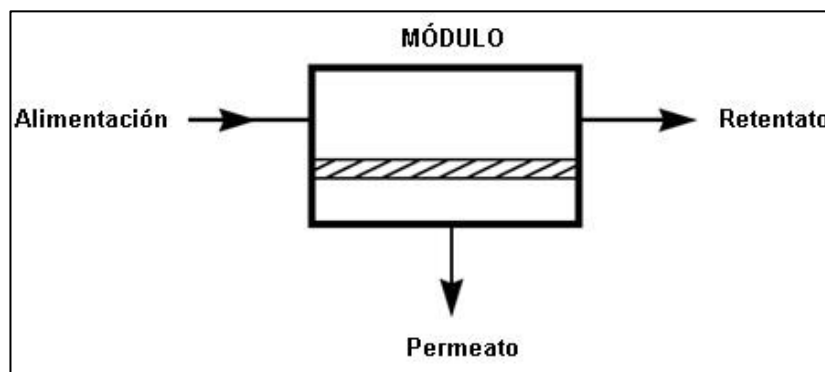
2.9. Membranas

Una membrana es una pared con poros permeo selectiva entre dos medios en cualquier estado físico, es decir, es una barrera que permite la transferencia de masa, desde un medio a otro y a través de ella, de ciertos componentes objetivo, mientras que restringe el paso de otros componentes no deseados en el retentato.

Para que la separación de materia se pueda llevar a cabo, el transporte a través de la membrana debe ser sensible a una o varias propiedades moleculares o fisicoquímicas de los componentes de la solución que se está filtrando.

Para que esta interacción se dé, la membrana deberá tener determinadas propiedades físicas, químicas y estructurales que faciliten la difusión de los componentes.

Figura 4. **Proceso de difusión en una membrana**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2017.

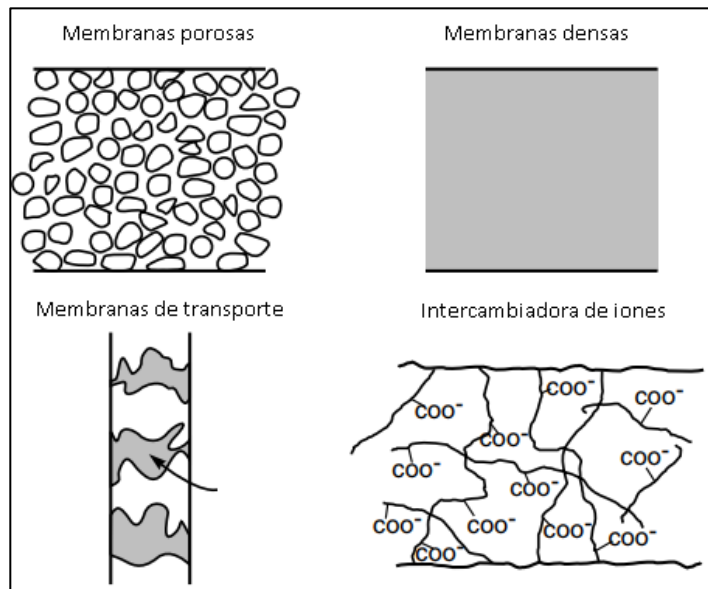
2.9.1. **Estructura de las membranas**

La estructura de la membrana tiene una influencia determinante en el proceso de separación o filtración, a grandes rasgos se pueden distinguir los siguientes tipos generales:

- Membranas porosas (estructura simétrica)
- Membranas no porosas o densas (estructura simétrica)
- Membranas de transporte (membranas líquidas y de transportador fijo)

- Membranas intercambiadoras de iones (estructura asimétrica)

Figura 5. Tipos de estructuras de las membranas



Fuente: elaboración propia, empleando TinkerCAD 2019.

2.10. Procesos de separación por membranas

Actualmente los procesos de separación o filtración que se pueden llevar a cabo mediante un gradiente de concentración, cantidad de movimiento o grandes gradientes de presión, utilizando membranas como barreras permeables son los siguientes cuatro:

- Hiperfiltración (ósmosis inversa)
- Nanofiltración
- Ultrafiltración
- Microfiltración

2.10.1. Osmosis inversa

También conocida como hiperfiltración, el mecanismo de separación en este caso es el de disolución-difusión. Los componentes que constituyen el permeato deben tener cierta afinidad ya sea química o mecánica con el material de la membrana para disolverse en su estructura y que esta permita el paso del o los componentes. De ahí que en este tipo de proceso cobra más importancia el material del cual está elaborada la membrana que en todos los otros procesos.

2.10.2. Nanofiltración

Es el proceso intermedio entre la ósmosis inversa y la ultrafiltración en este tanto la separación por tamaño como los mecanismos de disolución-difusión adquieren importancia. Este proceso es capaz de separar sales y solutos de bajo peso y tamaño molecular.

En ambos procesos no resulta tan decisivo como en los anteriores el efecto de la velocidad tangencial respecto al área de las membranas; sin embargo, cobra importancia la presión osmótica y las membranas son menos permeables, debiéndose operar a presiones altas para lograr que exista un flujo razonable de fluido desde la fase concentrada de alimentación al permeato.

2.10.3 Ultrafiltración

El proceso de ultrafiltración es usado en la industria, en la medicina y en procesos de investigación para purificar y concentrar soluciones macromoleculares. Este tipo de proceso no es fundamentalmente diferente a otros procesos como microfiltración, nanofiltración o separación de gases,

excepto en los tamaños de las moléculas que retienen y en la escala del estudio.

2.10.4 Microfiltración

La microfiltración utiliza básicamente un mecanismo de separación por diferencia de tamaño, siendo está capaz de separar partículas relativamente pequeñas de la naturaleza; y la ultrafiltración, macromoléculas, ya que se ven influenciados por el tamaño y distribución de poros de la membrana.

En este tipo de proceso la velocidad tangencial de las partículas es lo más importante porque tiene un efecto importante sobre el flujo de permeato obtenido (aumenta con la velocidad tangencial), especialmente en este proceso donde el objetivo es hacer pasar las partículas de un regular tamaño en la porosidad de la membrana.

“En la mayoría de los casos es este tipo de filtración las membranas son orgánicas, el diámetro promedio de los poros está comprendido entre 0,2 a 10 μm .”⁷

Los filtros pueden estar diseñados para operar a presión atmosférica o con un recipiente a una mínima presión (máximo 25 psi), pero usualmente trabajan a bajas presiones como es el caso de esta investigación.

⁷ GEANKOPLIS, John. *Procesos de transporte y principios de separación*. p. 906.

Tabla I. **Comparación entre los procesos de separación**

	Hiperfiltración	Nanofiltración	Ultrafiltración	Microfiltración
Nivel de separación	Sales monovalentes y solutos de bajo peso molecular.	Solutos de baja masa molar y sales multivalentes.	Macro - moléculas y coloides.	Partículas y agentes patógenos.
Principio de separación	Diferencia de solubilidad y difusividad.	Diferencia de solubilidad y difusividad, tamaño de partícula y carga.	Tamaño de partícula.	Tamaño de partícula.
Mecanismo de transferencia	Disolución-difusión.	Disolución-difusión Capilaridad.	Capilaridad.	Capilaridad.
Influencia de la presión osmótica	Alta (5-25 bar).	Moderada.	Despreciable.	Despreciable.
Presión aplicada (bar)	15 - 25 (agua salobre) 40 - 80 (agua de mar).	10 - 40	2 - 10	0,2 – 2

Fuente: GONZALVEZ, José. Tesis doctoral: *Fabricación de membranas de acetato de celulosa aptas para ósmosis inversa y nanofiltración mediante el método de inversión de fase.* p. 19.

Las características de las membranas, empleadas en procesos de separación, gobernados por presión, se presentan en la tabla II.

Tabla II. **Características de las membranas utilizadas en procesos de separación**

	Hiperfiltración	Nanofiltración	Ultrafiltración	Microfiltración
Estructura de la membrana	Asimétrica	Asimétrica	Asimétrica	Simétrica, asimétrica y porosa.
Tamaño del poro (nm)	<0,5	≈1	1-100	100 – 10 000
Espesor (μm)	150	150	150	10 - 50
Espesor de la capa activa (μm)	1,0	0,1 – 1,0	0,1 – 1,0	10 -150
Material de la membrana	Acetatos de celulosa. Poliámidas aromáticas.	Acetatos de celulosa. Poliámidas aromáticas. Polivinil alcohol.	Polímeros: Polisulfona Poliacrilonitrilo. Cerámicos: Óxidos de Zr Óxidos de Al.	Materiales poliméricos cerámicos.

Fuente: GONZALVEZ, José. Tesis doctoral: *Fabricación de membranas de acetato de celulosa aptas para ósmosis inversa y nanofiltración mediante el método de inversión de fase*. p. 20.

2.11. Definición del coeficiente de permeabilidad

El coeficiente de permeabilidad es una característica de las membranas que esta específicamente ligado a la Ley de Darcy que se refiere al flujo de fluidos a través de membranas. El coeficiente de permeabilidad, generalmente representado por la letra k , es extremadamente variable, según el tipo de área superficial o el poro de membrana analizada.

El coeficiente de permeabilidad se expresa en función, entre otras cosas de la viscosidad del agua, que es función a su vez de la temperatura (normalmente se establece la permeabilidad para 20 °C; del tamaño y continuidad de los poros y de la presencia de poros y discontinuidades).

2.12. Porcentaje de recuperación

Este porcentaje expresa el caudal de alimentación que se transforma en producto, es decir, una tasa de recuperación como un factor de conversión entre el caudal de permeado y el caudal de aportación que llega a la membrana. En la industria se utiliza como un claro indicador de contaminación o de sobresaturación de la membrana.

2.13. Retención

La retención expresa la cantidad de soluto retenida por la membrana. Industrialmente si la retención de una membrana es alta es un buen indicador de que la captación de los sólidos disueltos en el flujo de entrada se está dando de una manera correcta.

2.14. Aplicaciones de las membranas

Las aplicaciones de los procesos de membrana son sumamente amplias y variadas, por ejemplo, los procesos que tienen como fuerza impulsora un gradiente de presión como lo son el caso de la microfiltración, ultrafiltración, nano filtración y ósmosis inversa, están ampliamente extendidos, desarrollados y pueden ser usados para concentrar un agente contaminante en el retentato o para producir agua purificada a partir de aguas residuales.

También tienen aplicaciones importantes en la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica, donde juegan un papel vital en el desarrollo de estos procesos.

Las membranas de los procesos como la pervaporación, permeación por vapor, separación de gases y membranas líquidas compiten con otros procesos separadores de menor costo, porque son procesos que pueden ser usados para extraer de forma selectiva un componente el cual puede ser valioso desde el punto de vista industrial o componentes con carácter contaminante que se pretenden eliminar de alguna emisión o de algún caudal de fluido.

Tabla III. **Aplicaciones de las membranas**

	Hiperfiltración	Nanofiltración	Ultrafiltración	Microfiltración
Agua potable y medio ambiente	Desalación de aguas salobres y marinas. Concentración de lixiviados y de efluentes químicos.	Potabilización. Desmineralización.	Efluentes de la industria papelera. Separación de emulsiones aceite- agua en metalurgia.	Eliminación de bacterias.
Alimentación	Concentración de zumos de frutas, azúcares y leche. Eliminación de alcohol.	Concentrado y desmineralización de suero. Reducción de sales.	Industria láctea (leche, suero, queso). Concentración de proteínas. Eliminación de azúcar.	Esterilización de alimentos. Clarificación de bebidas.
Industria	Concentración de sustancias. Agua ultra pura (Industria Electrónica).	Concentración y desalación de productos químicos.	Electro pintado textil (índigo). Farmacéuticas (enzimas, antibióticos, pirógenos).	Agua ultra pura (semiconductores). Esterilización de productos farmacéuticos. Análisis. Cultivo de células.

Fuente: GONZALVEZ, José. Tesis doctoral: *Fabricación de membranas de acetato de celulosa aptas para ósmosis inversa y nanofiltración mediante el método de inversión de fase*. p. 22.

Las membranas a base de acetato de celulosa pueden llegar a poseer buenas características para la desalinización debido a su alta afinidad y permeabilidad al agua acompañada de una baja solubilidad para cualquier sal. Sin embargo, su resistencia química frente a los microorganismos y su estabilidad frente a la temperatura no son buenas, porque el acetato de celulosa es un material muy sensible al cambio de condiciones como la temperatura y la presión, y suele descomponerse velozmente si no es correctamente tratada.

En contraparte se trata de polímeros de obtención bastante barata gracias a que se encuentra naturalmente en la biomasa, versus las poliamidas que presentan altas selectividades hacia sales con un flujo menor que el acetato de celulosa, tienen sin embargo mayor resistencia química y bacteriana, salvo su gran sensibilidad hacia el cloro libre que degrada los grupos amino y esto hace que las membranas no sean aptas.

Por otra parte, la selectividad de las membranas de acetato de celulosa hacia las moléculas orgánicas es bastante alta, salvo hacia algunos carbohidratos y algunas proteínas. Estas membranas demandan bajos requerimientos de energía puesto que no involucran un cambio de fase en función de la temperatura, la mayoría operan en un proceso continuo que permite un control automático de flujo y una operación estable en los procesos de filtración.

También requieren de un escaso mantenimiento, porque la mayoría de módulos tiene un mínimo de partes móviles, y es fácil de operar. Tienen gran resistencia a ensuciarse, admiten cloro y presentan una micro-textura lisa.

El acetato de celulosa también optimiza el comportamiento frente a la hidrólisis, que se transforma en la posibilidad para trabajar con un rango amplio

de acidez o alcalinidad; su flujo por unidad de superficie es más bajo, por lo que hay fabricantes que lo utilizan en membranas de fibra hueca para contrarrestar caídas de presión y con ello caídas de caudal.

2.15. Estado actual de la tecnología de membranas

Distintos procesos de membrana quedan clasificados como:

2.15.1. Tecnologías maduras

Aquellas que han alcanzado tal nivel que no se espera que sufran un desarrollo espectacular en cuanto a membranas o módulos. Son procesos bastante fiables desde el punto de vista industrial. Sin embargo, es de esperar mejoras y optimización de los sistemas existentes, así como nuevas aplicaciones especiales.

2.15.2. Tecnologías en desarrollo

Son las nuevas tendencias en las que pueden aparecer aplicaciones modernas y experimentarse avances importantes en el ámbito de las membranas obtenidas de otro tipo de fuentes. Algunos ejemplos que se pueden citar son: Membranas líquidas, Electrodialisis con membranas bipolares, entre otros.

2.15.3. Poco aplicables

Por sus características, las membranas de acetato de celulosa no tienen muchas aplicaciones actuales, y no parecen experimentar desarrollo a corto plazo por la alta demanda que tienen los polímeros sintéticos, limitándose su

interés al campo de investigación y teórico, sin embargo, su desarrollo futuro no se puede descartar, porque la tendencia de los mercados así lo exige.

En los últimos años los procesos de membrana han alcanzado una amplia aceptación dentro de diversos campos de la ingeniería química, la ingeniería ambiental y en áreas relacionadas como la ingeniería bioingeniería y la tecnología de alimentos, esto a pesar de todos los nuevos materiales que se sintetizan día con día para los procesos operaciones de separación.

A pesar de su poca aplicabilidad actual, las membranas de acetato presentan una serie de características muy importantes desde el enfoque económico y su impacto ambiental:

- Consumen muy poca energía en comparación con otros procesos separadores.
- Permiten concentrar disoluciones muy diluidas a muy bajo costo.
- En muchos casos realizan separaciones que serían muy dificultosas bajo otros procesos.
- Se combinan muy fácilmente con otros procesos.
- El paso de escala es sencillo.

2.16. Módulos de membrana

“La unidad de operación en la que se disponen las membranas para su utilización se denomina módulo. Esta unidad de trabajo consta de membranas, estructuras de soporte de la presión, las puertas de entrada de alimentación y salida de concentrado y de puntos de extracción del permeato.”⁸

⁸ American Water Works Association, Lyonnaise des Eaux, & Water Research Commission of South Africa, Eds. *Water Treatment Membrane Processes*. Vol. 8. p. 323.

Los diseños de módulos que se utilizan en la industria actualmente son los siguientes:

- Módulos de plato y marco
- Módulos tubulares
- Módulos enrollados en espiral
- Módulos de fibras huecas

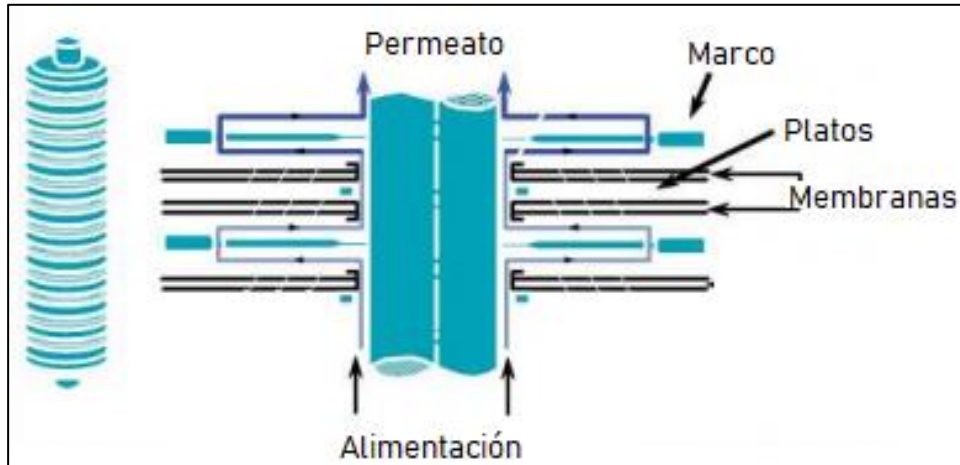
2.16.1 Módulos de plato y marco

En los módulos de plato y marco las membranas se colocan en los espaciadores de los platos que reciben un gran flujo de alimentación. La solución de alimentación es forzada a pasar por medio del área superficial de la membrana. El flujo de alimentación pasa a través de la membrana y llega ya filtrado a un tanque colector de permeato.

Actualmente estos módulos son utilizados en aplicaciones a pequeña escala como la eliminación de pesticidas de las aguas subterráneas, eliminación de metales pesados de las aguas residuales, Reciclaje de aguas residuales en lavanderías y eliminación de nitratos.

Los módulos de plato y marco proveen un buen manejo del flujo tanto en la alimentación y como en el permeado, aunque el gran número platos espaciadores y empaques provocan una gran caída de carga dinámica. En este tipo de módulos cada lámina plana de membrana debe de encajar perfectamente en el plato, esto tiene repercusiones económicas favorables ya que el reemplazo de las membranas es muy sencillo y no se necesita mayor experiencia técnica para realizarlo.

Figura 6. **Módulo de plato y marco**



Fuente: RUIZ, Fernando. *Introducción a la osmosis inversa*. <https://docplayer.es/81786629-Introduccion-a-la-osmosis-inversa.html>. Consulta: 27 de abril de 2020.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Para cumplir con los objetivos de la presente investigación se hizo necesario el análisis de las variables dependientes e independientes en cada una de las etapas que comprende la misma.

3.1.1. Variables de control

A continuación, en las siguientes tablas se describe la definición de las variables de control.

Tabla IV. **Definición de variables de control en pretratamiento de la muestra**

No.	Variable	Dimensional	Factor potencial de diseño		Descripción
			Constante	Variable	
1	Concentración de NaOH	Porcentaje en volumen (V/V)	X		Eliminación de ceras, pectincas y resinas.
2	Tiempo	Minutos (Min)	X		Tiempo de tratados

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Definición de variables de control en extracción de celulosa**

No.	Variable	Dimensional	Factor potencial de diseño		Descripción
			Constante	Variable	
1	Concentración de H ₂ SO ₄	Porcentaje en volumen (V/V)	X		Hidrólisis acida
2	Concentración de NaOCl	Porcentaje en volumen (V/V)	X		Cloración
3	Concentración de NaOH	Porcentaje en volumen (V/V)	X		Extracción alcalina
4	Potencial de hidrógeno	Potencial de Hidrógeno (pH)	X		Neutralidad
5	Tiempo	Hora (h)	X		Tiempo de tratados.
6	Radio de poro	Micrómetros (µm)	X		Tamaño de partícula.

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Definición de variables de control en acetilación de celulosa**

No.	Variable	Dimensional	Factor potencial de diseño		Descripción
			Constante	Variable	
1	Proporción Celulosa/C ₄ H ₆ O ₃	Gramo por mililitro (g/mL)	X		Proporción masa/volumen.
2	Proporción Celulosa/ H ₂ SO ₄ .	Gramo por mililitro (g/mL)	X		Proporción masa/volumen.
3	Concentración de C ₃ H ₆ O	Porcentaje en volumen (V/V)	X		Concentración acetona.
4	Temperatura	Grados Celsius (°C)	X		Temperatura de tratados.
5	Tiempo	Hora (h)	X		Tiempo de tratados.

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Definición de variables de control en coagulación del polímero**

No.	Variable	Dimensional	Factor potencial de diseño		Descripción
			Constante	Variable	
1	Tiempo	Hora (h)	X		Tiempo de coagulación.
2	Temperatura	Grados Celsius (°C)	X		Tiempo de secado.

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Definición de variables de control en preparación de la membrana**

No.	Variable	Dimensional	Factor potencial de diseño		Descripción
			Constante	Variable	
1	Porcentaje masa-masa	Porcentaje masa-masa (m/m)	X		Composición de la membrana.
2	Tiempo	Minutos (Min)	X		Tiempo de secado.
3	Temperatura	Grados Celsius (°C)	X		Temperatura de evaporación.

Fuente: elaboración propia.

3.1.2. Variables independientes

Las variables independientes que se manipularon durante el desarrollo de la investigación se presentan a continuación:

Tabla IX. Definición operacional de variables independientes

No	Variable	Dimensional	Factor potencial de diseño		Descripción
			Constante	Variable	
1	Concentración inicial	Partes por millón (ppm)		X	Concentración del analito.
2	Porcentaje de válvula	Porcentaje (%)		X	Porcentaje de apertura que permite el paso del analito.
3	Flujo Volumétrico	Metros cúbicos por segundo (m^3/s)		X	Volumen de fluido que filtra la membrana por unidad de tiempo.

Fuente: elaboración propia.

3.1.3. Variables dependientes

A continuación, se describen las variables dependientes consideradas en a la investigación.

Tabla X. **Definición operacional de las variables dependientes**

No.	Variable	Dimensional	Descripción
1	Retención	Adimensional	Cantidad de soluto retenido por la membrana
2	Porcentaje de recuperación	Porcentaje (%)	Proporción entre el flujo en el permeato y alimentación.
3	Concentración del permeato	Partes por millón (ppm)	Cantidad de soluto en determinado volumen durante el transcurso de la separación.
4	Velocidad de flujo	Metros por segundo (m/s)	Utilizada para describir el flujo de la solución analizada.
5	Presión transmembrana (PTM)	PSI (lb/pulg ²)	Presión obtenida de las lecturas de los nanómetros mediante la microfiltración.

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación de campo de estudio

La presente investigación se llevó a cabo bajo dos escalas: a escala laboratorio y a escala planta piloto. Se realizó un proceso de síntesis de una

membrana de acetato de celulosa a partir de bagazo de caña de azúcar mediante diversos tratamientos químicos ya establecidos como lo son hidrólisis ácida, cloración, extracción alcalina, acetilación, entre otros. Con la membrana ya obtenida, se cuantifico la capacidad de retención, el flujo y la recuperación mediante un módulo de plato y marco adaptable a la estación experimental de membranas del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador

Luis Alfonzo Noriega Búrbano
Correo electrónico: luis.nbiq@gmail.com
Universidad de San Carlos de Guatemala

- Asesor de investigación

Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
Correo electrónico: iqjgodinez@yahoo.com
Colegiado núm. 874

3.4. Recursos materiales disponibles (equipo, cristalería, reactivos)

Los recursos materiales utilizados en el desarrollo de la investigación se describen a continuación.

3.4.1. Equipo y materiales

- Tamizadora
 - Mesh 2 milímetros
 - Mesh 0,425 milímetros
 - Mesh 180 micrómetros

- Plancha de calentamiento eléctrica
 - Rango de temperatura 0 °C – 100 °C

- Agitador magnético
 - Velocidad de agitación 100 a 1 000 RPM

- Horno de bandejas
 - Motor de $\frac{3}{4}$ HP
 - Control de temperatura de 0 – 300 °C
 - Bandejas de acero inoxidable

- Bolsas con cierre dentados

- Molde para la membrana
 - PET

- Módulo de accesorios para de las membranas.

- Tubo de PVC de 250 PSI con diámetro de 3"
 - Tapón hembra liso de PVC con diámetro de 3"
 - Red Bush de PVC de 4 x 3"
 - Copla de PVC con diámetro de 4"
 - Adaptador de limpieza DWV de PVC con diámetro de 4"
 - Tapón de adaptador de limpieza DWV de PVC con diámetro de 4"
 - Base de madera
- Soporte de membranas
 - Ertalon
 - Tornillos de acero inoxidable
 - Empaques de O-rings
 - Sostenedor de acero inoxidable
 - Rejilla de acero inoxidable

3.4.2. Instrumentos de medición

- Balanza analítica
 - Voltaje 15 V – 30 V
 - Capacidad de lectura 0,001 g
- Termómetro
 - Exactitud de $\pm 0,2$ °C ($\pm 0,5$ °F)
 - Rango de temperatura -10 – 150 °C

- Cronómetro

- Manómetro
 - Rango de presión 0 – 30 PSI

- IRON MR TEST KIT H138040– Colorímetro para hierro
 - Método de 1-10 – fenantrolina
 - Medida más pequeña 0,10 mg/L
 - ± 2% de precisión en la lectura
 - Rango de operación 0,0 – 5,0 mg/L (ppm)

3.4.3. Equipo de protección personal

- Bata de laboratorio
- Botas de seguridad
- Lentes de protección
- Guantes
- Mascarilla
- Filtros de vapores ácidos y orgánicos
- Filtro de sólidos
- Limpiador de tela
- Cofia
- Casco

3.4.4. Cristalería

- Vasos de precipitado
 - 50 mililitros
 - 100 mililitros
 - 200 mililitros

- Embudo de decantación
 - 100 mililitros

- Probetas
 - 20 mililitros
 - 100 mililitros

- Embudo de decantación
- Soportes universales
- Perlas de ebullición

3.4.5. Reactivos y materia prima

Las materias primas y los reactivos utilizados para cada una de las etapas de la preparación de la membrana y la evaluación de la misma eran de tipo comercial y de fácil adquisición; a pesar de esto las mismas fueron donadas por la empresa UNISER S.A. A continuación, se enlistan dichos reactivos:

- Acetona (C₃H₆O)

- Ácido sulfúrico (H₂SO₄)
- Agua destilada (H₂O)
- Aceite acético (CH₃COOH)
- Anhídrido Acético (C₄H₆O₃)
- Bagazo de caña de azúcar (Saccharum officinarum L)
- Hidróxido de Sodio (NaOH)
- Hipoclorito de sodio (NaOCl)
- Tritón X C₁₂H₂₆O(OCH₂CH₂)₁₀
- Sulfato ferroso heptahidratado (FeSO₄)
- Sulfato de aluminio (Al₂(SO₄)₃)
- Solución buffer pH 5

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

A continuación, se describen las técnicas cualitativas y cuantitativas que se emplearon para el desarrollo de esta investigación.

3.5.1. Recepción de la materia prima

El material biológico utilizado fue proporcionado por el Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar, CENGICAÑA ubicada en el kilómetro 92,5 Carretera al Pacífico, Finca Camantulul Santa Lucía Cotzumalguapa. Guatemala.

Figura 7. **Molienda de bagazo de caña de azúcar**



Fuente: elaboración propia, Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar, Guatemala.

3.5.2. Pretratamiento de la materia prima

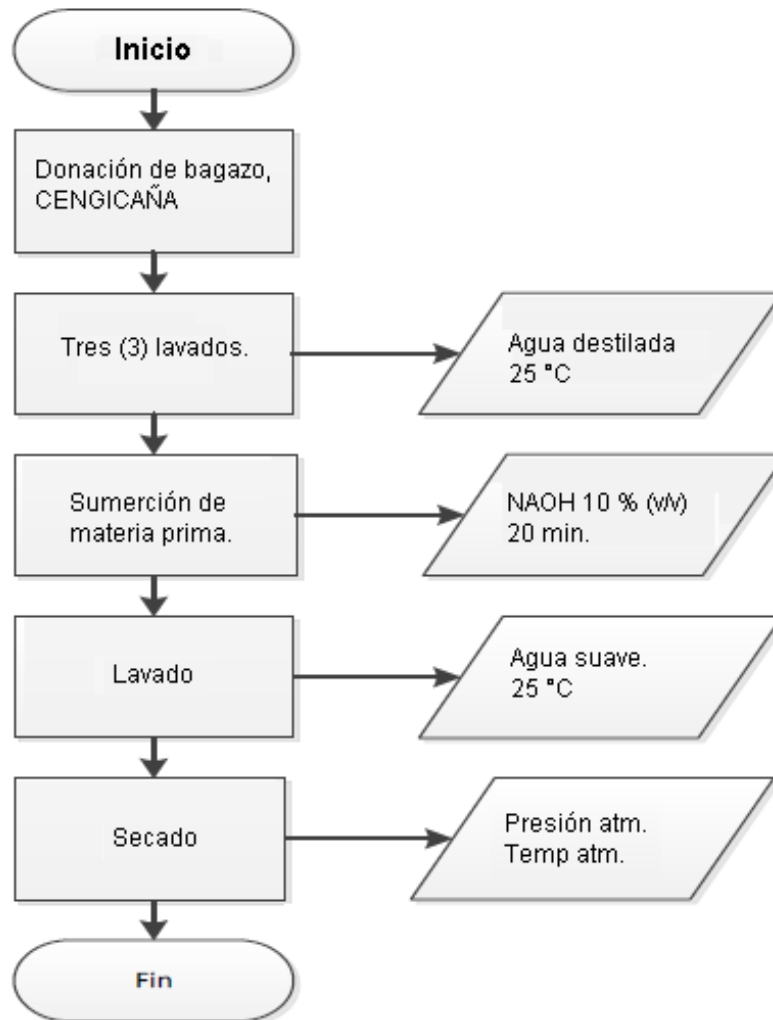
A la materia prima se le realizó un pretratamiento de la siguiente manera: Se realizaron tres diferentes lavados con agua destilada para eliminar la mayor cantidad de jugo contenido en el bagazo, la materia prima fue sumergida en una solución de NaOH al 10 % (v/v), durante 20 minutos con agitación continua, cuidando que penetrara intrínsecamente en el bagazo, esto con el fin de eliminar ceras, pectinas y resinas. Para finalizar se le aplicó otro lavado con agua suave, el bagazo se secó al sol a presión atmosférica, esto para favorecer la evaporación del agua que contenía y con ello evitar la proliferación de microorganismos.

Figura 8. **Lavado de azúcares con agua suavizada**



Fuente: elaboración propia, laboratorio de control de calidad, UNISER S.A., Guatemala.

Figura 9. Diagrama de proceso de pretratamiento del bagazo de caña de azúcar



Fuente: elaboración propia, empleando Visio 2010.

3.5.3. Extracción de celulosa

Teniendo la materia prima ya seca y desfibrada, se pesó y se depositó en un vaso de precipitado donde se llevó a cabo la reacción de hidrólisis ácida suave con H_2SO_4 al 0,4 % (v/v) durante 1 hora a 100 °C con agitación constante, se realizó un lavado posterior para eliminar los residuos del tratamiento y evitar contaminación cruzada en el siguiente tratamiento. Luego se realizó un proceso de cloración con NaOCl al 20 % (v/v), dicha mezcla se agito durante una 1 hora a temperatura ambiente (24 °C) hasta alcanzar un pH entre 9,1 – 9,2, seguido de esto se lavó con agua destilada para alcanzar la neutralidad y evitar reacciones en cadena como la neutralización.

Se realizó una extracción alcalina en una probeta de 500 mililitros con NaOH al 1 % (v/v) con agitación constante durante 20 minutos a temperatura ambiente (24 °C) y se volvió a lavar la muestra.

Se añadió una solución buffer de acetato a pH 5 con agitación por 1 hora en baño de maría a 70 °C, teniendo cuidado que la solución no virara su pH en el proceso. Por último, se realizó un blanqueo con NaOCl al 5 % (v/v) y se agito por 20 minutos a 24 °C, se secó en una plancha eléctrica de calentamiento a 100 °C durante 1 hora.

La celulosa obtenida se pulverizo mediante métodos mecánicos, se realizó un análisis granulométrico por tamizaje utilizando una maquina tamizadora y un juego de tamices desde un rango de mesh de 2 mm hasta 180 μm , se depositó en bolsas de polietileno con sello hermético hasta su uso.

Figura 10. **Etapas del proceso de extracción alcalina**



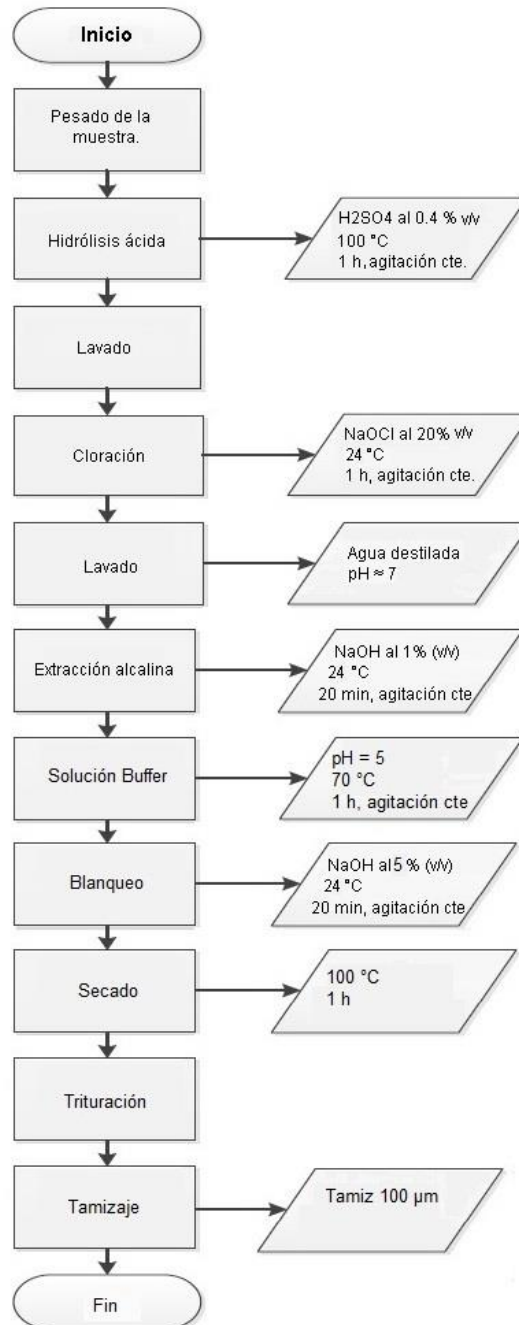
Fuente: elaboración propia, laboratorio de Control de Calidad, UNISER S.A. Guatemala.

Figura 11. **Análisis granulométrico**



Fuente: elaboración propia, Tecnología de la madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII), Facultad de Ingeniería, Guatemala.

Figura 12. Diagrama del proceso de la extracción de celulosa



Fuente: elaboración propia, empleando Visio 2010.

3.5.4. Acetilación de la celulosa

La acetilación de celulosa se realizó con una relación de 1 gramo de celulosa por cada 15 mililitros de anhídrido acético ($C_4H_6O_3$), y 2 mililitros de ácido sulfúrico (H_2SO_4).

Se pesó 10 gramos de celulosa en polvo, en un vaso precipitado de 500 mL se preparó la mezcla de anhídrido acético ($C_4H_6O_3$), y ácido sulfúrico (H_2SO_4), en un baño frío debido al aumento de temperatura provocada por la reacción exotérmica entre estos dos compuestos (relación 150:200 mL); se adicionó la celulosa en polvo al vaso y se agito hasta la humectación completa de la muestra, luego el vaso se sacó del baño frío y se introdujo en un baño maría a 70 °C durante 2 a 2,5 horas con agitación ocasional.

Figura 13. **Proceso de acetilación de celulosa**



Fuente: elaboración propia, laboratorio de Control de Calidad, UNISER S.A. Guatemala.

Al terminar el calentamiento, se dejó enfriar aproximadamente 2 horas y se dejó sedimentar en un embudo de decantación por una semana hasta que se formaran 2 capas, la capa líquida constituida por la mezcla ácida y la coloidal conteniendo el material esterificado; la capa líquida se extrajo lentamente y luego se filtró el coloide con un embudo y papel filtro, luego se procedió a lavar el filtrado, dicho proceso duro aproximadamente 5 días ya que la filtración fue a gravedad, esto se hizo hasta alcanzar un pH de 7. Se secó en su totalidad en un horno a 50 °C, se maceró y se envasó en una porta muestra con tapa de rosca hermético.

Figura 14. **Separación de la fase coloidal de la mezcla ácida**



Fuente: elaboración propia, laboratorio de Control de Calidad, UNISER S.A. Guatemala.

Para terminar este proceso se realizó el proceso de purificación de la muestra, se tomó una cantidad de acetato de celulosa y se disolvió

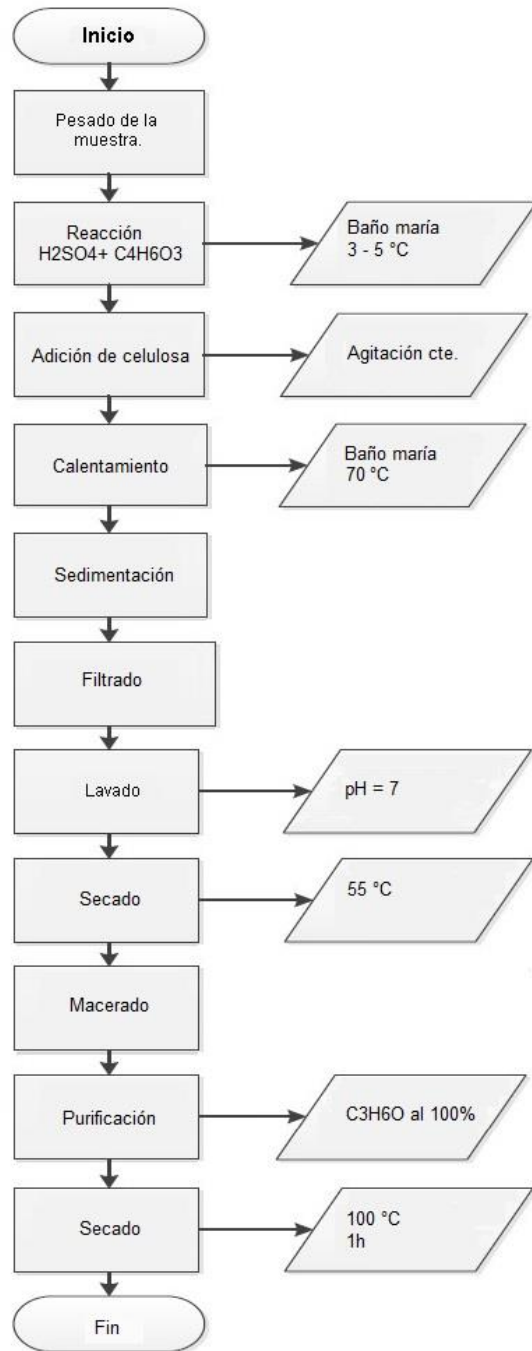
completamente en acetona pura (C_3H_6O), y luego se filtró; el filtrado se depositó en un vaso de precipitado y se dejó evaporar en su totalidad quedando el acetato de celulosa libre de impurezas procedentes de la esterificación, este polvo se llevó al horno por 1 hora a 100 °C, luego se sacó y se dejó enfriar hasta que la bandeja estuviera a temperatura ambiente.

Figura 15. **Secado del acetato de celulosa**



Fuente: elaboración propia, Área de producción, UNISER S.A. Guatemala.

Figura 16. Diagrama de proceso de la acetilación de celulosa



Fuente: elaboración propia, empleando Visio 2010.

3.5.5. Síntesis por método de inversión de fase por inmersión - precipitación

El acetato de celulosa se vertió lentamente sobre un recipiente con agua destilada para que coagulara y adquiriera consistencia, manteniendo una agitación suave para que no se formasen grumos. El coagulado se mantuvo durante 1 a 1,5 horas. Pasado este tiempo se cambió el agua destilada del recipiente y se mantuvo 48 horas para extraer los hilos del disolvente, lavándolos con agua destilada y dejándolos secar sobre papel filtro.

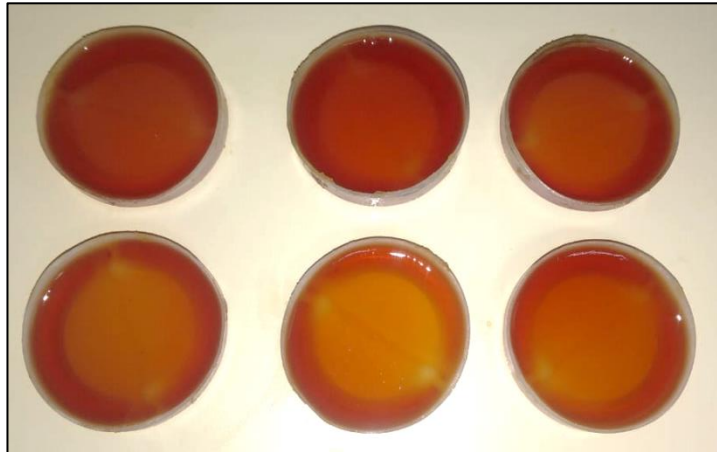
El producto coagulado se mantuvo en el horno a 40 °C durante aproximadamente un día. Ya seco se dejó en un recipiente hermético para su conservación.

3.5.6 Preparación de membranas

La solución de acetato de celulosa empleada para elaboración de las membranas tenía una composición semejante a la siguiente: 25 % m/m de acetato de celulosa, 30 % m/m de formamida y 45 % m/m de acetona

La mezcla se dejó madurar por un periodo de 30 minutos con agitación leve para asegurar una buena o completa disolución de todo el polímero. La mezcla de polímero se guardó debidamente en un recipiente hermético, fuera de la acción de la luz y en un lugar no expuesto a altas temperaturas. La solución se vertió sobre un molde con las dimensiones del módulo a utilizar para su futura evaluación.

Figura 17. **Preparación de las membranas**



Fuente: elaboración propia, Área de producción, UNISER S.A. Guatemala.

En esta etapa se consideró el tiempo de evaporación que comenzó desde el instante en que se terminó de aplicar el polímero sobre el molde; el tiempo de evaporación mínimo fue de 3 a 4 minutos para permitir homogeneidad de la membrana; se dejó secar a la atmósfera manteniendo las condiciones de laboratorio, es decir una temperatura en un rango 25 a 26 °C, evitando corrientes de aire.

Durante 10 minutos se sumergió la membrana en un baño de conservantes cuya composición era de: 5 % m/m de ácido acético (CH_3COOH), 30 % m/m de Tritón X-100 y 65 % m/m de agua destilada (H_2O).

Las membranas se almacenaron en bolsas con cierre hermético con suficiente disolución acuosa de formaldehído al 4 % debido a que son sensibles a la acción bacteriana. Se añadió una pequeña cantidad de glicerina para impedir que las membranas se desecaran en contacto con el aire y así facilitar su manipulación de esta manera se mantendrán elásticas durante más tiempo.

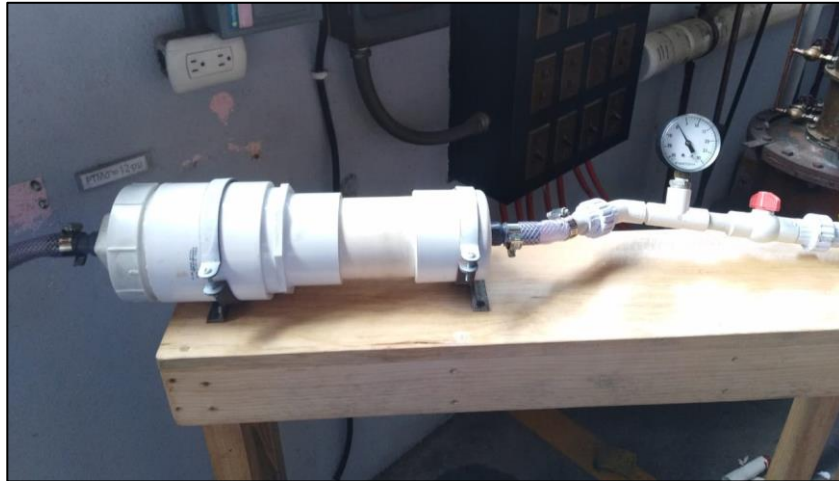
Cada una de las membranas fue sintetizada bajo métodos ya desarrollados y con las mismas condiciones químicas y físicas, por lo que no representa una variable en el proceso de análisis.

3.6. Diseño experimental del proceso de microfiltración

El módulo utilizado para llevar a cabo el proceso de microfiltración se diseñó para que fuera adaptable a la estación experimental de membranas del Laboratorio de Operaciones Unitarias, también se consideró que este tenía que ser versátil para contener un número variable de membranas y que la sustitución de las mismas fuera de manera rápida y sencilla.

Está formado por una base de madera tratada, una carcasa de uniones de accesorios de PVC, un manómetro que indica la presión en el permeato, una válvula de bola que restringe o permite el paso del permeato y un sistema sustituible de plato y marco elaborado de ertalon que consta de: 4 unidades de placas paralelas para membranas planas con orificios (esto para que el flujo de alimentación atravesase las membranas), empaques *oring* para evitar filtraciones, 3 tornillos, 3 tuercas y un sostenedor o jalador. Es importante recalcar que todas las piezas metálicas que conforman el módulo son de acero inoxidable para evitar corrosiones en el sistema y así la alteración de la concentración del hierro en el flujo de permeato.

Figura 18. **Carcasa de accesorios de PVC**



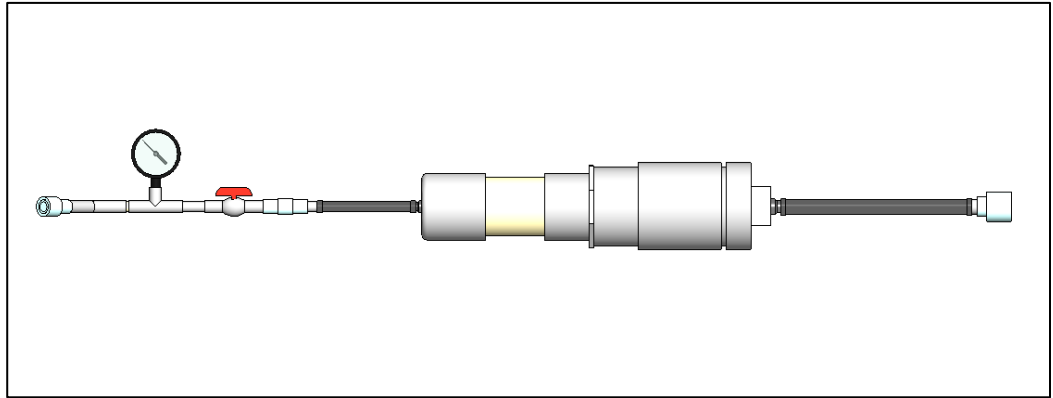
Fuente: elaboración propia, laboratorio de Operaciones Unitarias (LOPU), Facultad de Ingeniería, Edificio T5. Guatemala.

Figura 19. **Sistema sustituible de plato y marco**



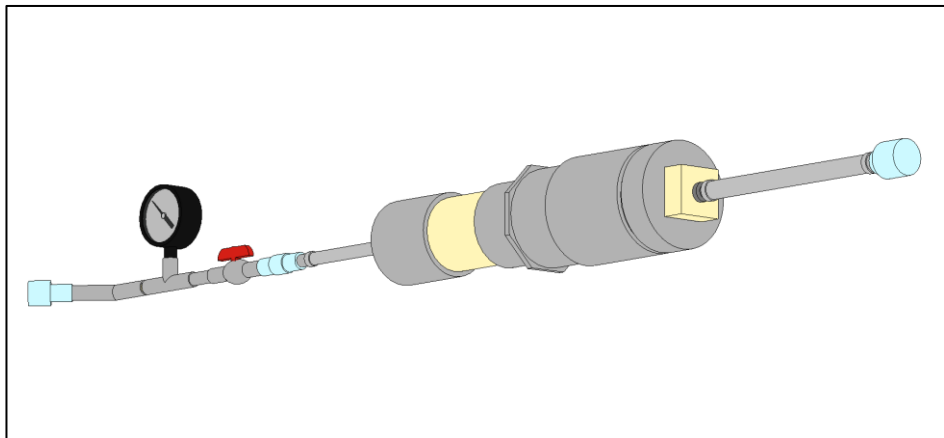
Fuente: elaboración propia, laboratorio de Operaciones Unitarias (LOPU), Facultad de Ingeniería, Edificio T5. Guatemala.

Figura 20. **Modelado del módulo, vista frontal**



Fuente: elaboración propia, empleando en Autodesk Revit.

Figura 21. **Modelado del módulo, vista isométrica**



Fuente: elaboración propia, empleando en Autodesk Revit.

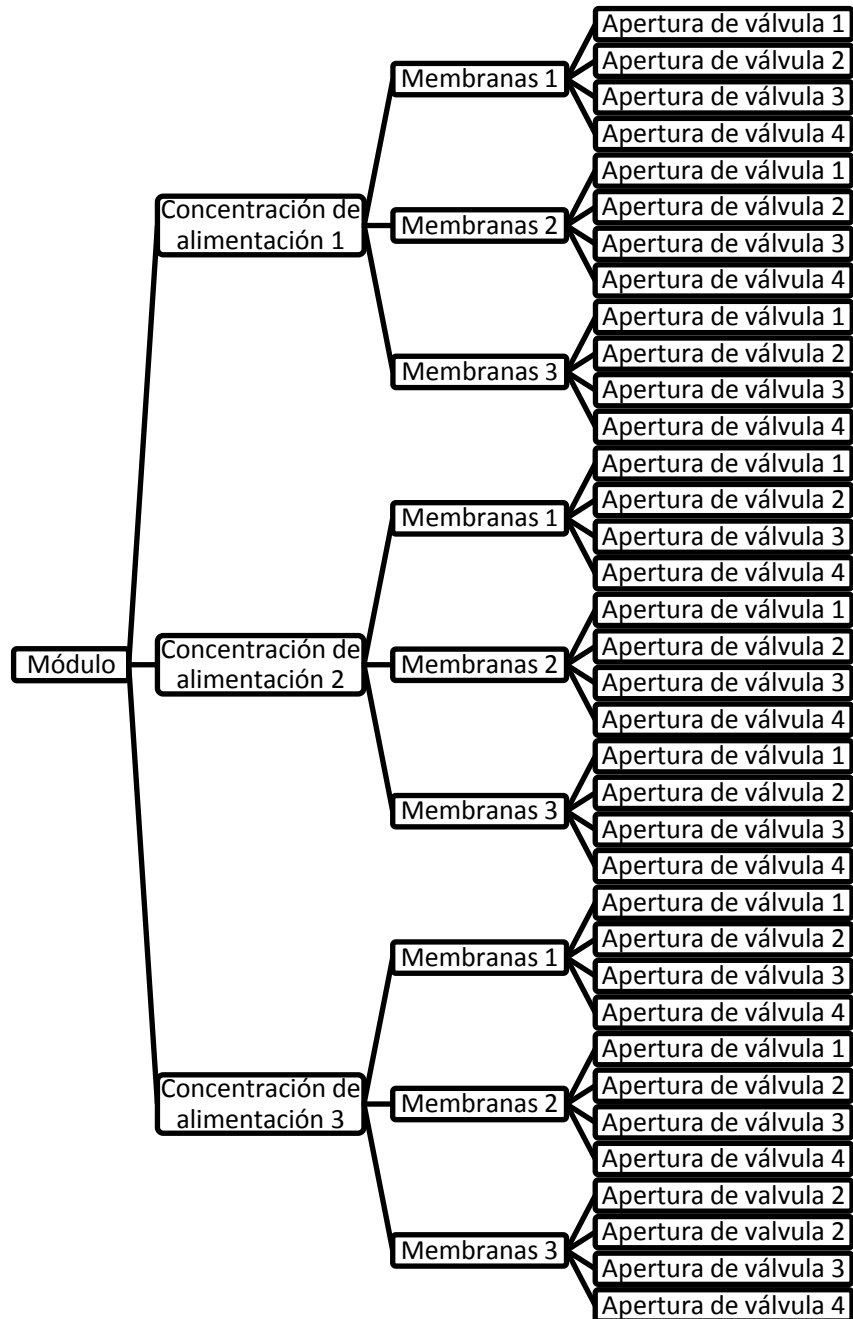
En el proceso de filtración se varió tres veces la concentración inicial de sulfato ferroso heptahidratado (FeSO_4), en la alimentación, por cada variación de concentración se varió cuatro veces la apertura de la válvula de globo del sistema de alimentación. La variación de esta concentración tuvo como consecuencia un cambio en el caudal de alimentación y de permeato, datos que influyeron directamente en la obtención de los resultados.

Para fines de esta investigación, se utilizaron 3 membranas por cada corrida esto para evitar el ensuciamiento provocado en el proceso de filtración y como soporte mecánico adicional se utilizó una rejilla de acero inoxidable entre cada placa con el fin de evitar la ruptura de las mismas.

En el desarrollo de la filtración se tomó lectura de la presión del flujo de alimentación, la presión del flujo de permeato, la concentración de hierro del flujo de alimentación y se tomó muestras para analizar la concentración de hierro del flujo de permeato a diferentes caudales, esto con el fin de determinar las propiedades de la membrana.

Los caudales se determinaron midiendo un flujo de volumen estandarizado en un intervalo de tiempo, para fines de esta investigación se utilizó un volumen estandarizado de 6 litros de solución de sulfato ferroso heptahidratado (FeSO_4), por cada tratamiento.

Figura 22. **Árbol de variables**



Fuente: elaboración propia, empleando Visio 2010.

3.6.1. Preparación de las soluciones

Las soluciones de sulfato ferroso heptahidratado (FeSO_4), se prepararon en la empresa UNISER S.A.; se agregó la cantidad estipulada de analito a un tonel con agua destilada donde se procedió a mezclar en un equipo de homogenización y mediante un bulbo electrónico sumergible Hanna HI98129 (anexo 2), se corroboró que la concentración de las mismas fueran las correctas. Se agregó $\frac{1}{2}$ litro de solución de sulfato de aluminio para que dicha solución fuese para el posterior análisis.

Figura 23. Preparación de soluciones



Fuente: elaboración propia, Área de producción, UNISER S.A. Guatemala.

3.6.2. Evaluación de la membrana

Se llevó a cabo el análisis experimental en la estación para membranas del Laboratorio de Operaciones Unitarias donde se hizo uso del módulo diseñado para contener placas paralelas constituidas de membranas obtenidas para microfiltración a partir de bagazo de caña de azúcar. Por medio de dicho análisis se cuantificó los efectos de la modificación de parámetros operacionales en el funcionamiento de las membranas.

Figura 24. **Colocación de membranas para proceso de filtración**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOPU), Facultad de Ingeniería, Edificio T5. Ciudad de Guatemala.

Se utilizó el IRONMR TESTKIT HI38040 de HANNA INSTRUMENTS® que es un equipo de cuantificación rápida de hierro para determinar concentraciones en la evaluación de la membrana, tanto del flujo de entrada como en el flujo de permeato. El método de medición cuantitativa que se lleva a cabo en este kit es

el método de fenantrolina, el cual se emplea para medir la concentración de hierro total en muestras de agua cruda. El test Kit de Hanna determina los niveles de hierro total en agua mediante un método colorimétrico, todos los iones férricos son reducidos mediante sulfito de sodio a iones ferrosos, la fenantrolina complexa con el ion ferroso hasta formar una solución de color naranja y la intensidad del color de la solución determina la concentración de hierro.

Por último, las mediciones de presión en el sistema se realizaron por medio de los manómetros instalados en la unidad y en el soporte del módulo.

Figura 25. **Equipo de cuantificación de concentración de hierro**



Fuente: elaboración propia, Área de Control de Calidad, UNISER S.A. Ciudad de Guatemala.

3.7. Recolección y ordenamiento de la información

Los datos experimentales en la evaluación de las membranas se recolectaron como lo expresa la siguiente tabla:

Tabla XI. Recolección de datos experimentales

Concentración de ion hierro en la alimentación (ppm)					
Apertura válvula de globo [%]	Presión de entrada (PSI)	Presión de salida (PSI)	Tiempo (s)	Concentración de ion hierro en alimentación (ppm)	Concentración de ion hierro en permeato (ppm)
Apertura 1,1	P_{in} 1,1	P_{out} 1,1	T 1,1	$[Fe]_a$ 1,1	$[Fe]_p$ 1,1
Apertura 1,2	P_{in} 1,2	P_{out} 1,2	T 1,2	$[Fe]_a$ 1,2	$[Fe]_p$ 1,2
Apertura 1,3	P_{in} 1,3	P_{out} 1,3	T 1,3	$[Fe]_a$ 1,3	$[Fe]_p$ 1,3
Apertura 1,4	P_{in} 1,3	P_{out} 1,4	T 1,4	$[Fe]_a$ 1,4	$[Fe]_p$ 1,4

Fuente: elaboración propia.

3.8. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Con los datos obtenidos a partir de la experimentación utilizando un módulo de plato y marco para la evaluación de microfiltración en la estación de estación Experimental de Membranas del Laboratorio de Operaciones Unitarias, se procedió a calcular los diferentes parámetros de operación. Se realizaron las curvas que permitieron el análisis del comportamiento de separación y flujo.

Tabla XII. Toma de resultados del proceso de microfiltración

Flujo de alimentación (m ³ /s)	Flujo de permeato (m ³ /s)	PTM (Pa)	Retención (%)	Porcentaje de recuperación (%)	Porcentaje de rechazo (%)
$\dot{Q}_{in1,1}$	$\dot{Q}_p 1,1$	PTM 1,1	Retención 1,1	R _t 1,1	%R 1,1
$\dot{Q}_{in1,2}$	$\dot{Q}_{in} 1,2$	PTM 1,2	Retención 1,2	R _t 1,2	%R 1,2
$\dot{Q}_{in1,3}$	$\dot{Q}_p 1,3$	PTM 1,3	Retención 1,3	R _t 1,3	%R 1,3
$\dot{Q}_{in1,4}$	$\dot{Q}_p 1,4$	PTM 1,4	Retención 1,4	R _t 1,4	%R 1,4

Fuente: elaboración propia.

3.9. Análisis estadístico

Para el procesamiento y el análisis estadístico de los datos obtenidos a partir de la evaluación de las membranas de acetato de celulosa a partir de bagazo de caña de azúcar, se utilizará la aplicación de hojas de cálculo Excel. El informe final será realizado mediante el procesador de texto Microsoft Word, ambas aplicaciones son pertenecientes del paquete de Microsoft Office 2010. Criterio con base análisis ANOVA (Análisis de varianza de un factor):

- $F < F_c$: Se acepta la hipótesis nula
- $F > F_c$: Se rechaza la hipótesis nula

3.9.1 Evaluación de hipótesis 1

A continuación, se presenta los resultados de la evaluación de la hipótesis 1.

Tabla XIII. ANOVA hipótesis 1

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	P	Valor crítico para F
Entre grupos	187,5833	7	26,7976	11,4846	0,0163	6,0942
Dentro de los grupos	9,3333	4	2,3333			
Total	196,9166	11				

Fuente: elaboración propia.

Conclusión: Dado que $F > F_c$ se rechaza la hipótesis nula, y se evidencia que la concentración del permeato si difiere significativamente en función del flujo de alimentación.

3.9.2. Evaluación de hipótesis 2

A continuación, se presenta los resultados de la evaluación de la hipótesis 2.

Tabla XIV. **ANOVA hipótesis 2**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	P	Valor crítico para F
Entre grupos	395,3333	7	56,4761	13,0329	0,0129	6,09421
Dentro de los grupos	17,33333	4	4,33333			
Total	412,6666	11				

Fuente: elaboración propia.

Conclusión: Dado que $F > F_c$ se rechaza la hipótesis nula, y se evidencia que la presión transmembrana si difiere significativamente en función del flujo de alimentación.

3.9.3. Evaluación de hipótesis 3

A continuación, se presenta los resultados de la evaluación de la hipótesis 3.

Tabla XV. **ANOVA hipótesis 3**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	P	Valor crítico para F
Entre grupos	0,000958697	2	0,000479349	0,0256	0,9747	4,2564
Dentro de los grupos	0,167984543	9	0,018664949			
Total	0,16894324	11				

Fuente: elaboración propia.

Conclusión: Dado que $F < F_c$ se acepta la hipótesis nula, y se evidencia que la retención del sistema de membranas no difiere significativamente en función de la concentración del flujo de alimentación.

3.9.4. Evaluación de hipótesis 4

A continuación, se presenta los resultados de la evaluación de la hipótesis 4.

Tabla XVI. **ANOVA hipótesis 4**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	P	Valor crítico para F
Entre grupos	1,855671845	2	0,927835923	0,0324	0,9681	4,2564
Dentro de los grupos	256,951775	9	28,55019722			
Total	258,8074468	11				

Fuente: elaboración propia.

Conclusión: Dado que $F < F_c$ se acepta la hipótesis nula, y se evidencia que el porcentaje de recuperación del sistema de membranas no difiere significativamente en función de la concentración del flujo de alimentación.

4. RESULTADOS

4.1. Evaluación del proceso de microfiltración

A continuación, se presentan los datos obtenidos a partir de la evaluación del proceso de microfiltración.

Tabla XVII. **Resultados con flujo de alimentación de concentración de alimentación de 1 ppm de hierro**

Apertura de válvula	Q_a (m ³ /s)	Q_p (m ³ /s)	PTM (Pa)	R_t	Porcentaje de recuperación (%)	Porcentaje de rechazo (%)
1/4	2,56E-05	2,10E-05	134447,82	0,61	82,32	17,68
1/2	3,19E-05	2,43E-05	160877,73	0,73	76,29	23,71
3/4	3,48E-05	2,57E-05	196500,66	0,82	73,75	26,25
1	3,69E-05	2,73E-05	221781,45	0,92	74,01	25,99

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Resultados con flujo de alimentación de concentración de alimentación de 3 ppm de hierro**

Apertura de válvula	Q_a (m ³ /s)	Q_p (m ³ /s)	PTM (Pa)	R_t	Porcentaje de recuperación (%)	Porcentaje de rechazo (%)
1/4	2,34E-05	1,96E-05	125254,81	0,57	84,01	15,99
1/2	2,87E-05	2,18E-05	147088,21	0,71	75,82	24,18
3/4	3,16E-05	2,28E-05	174667,25	0,83	72,01	27,99
1	3,31E-05	2,36E-05	203395,42	0,91	71,18	28,82

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Resultados con flujo de alimentación de concentración de alimentación de 5 ppm de hierro**

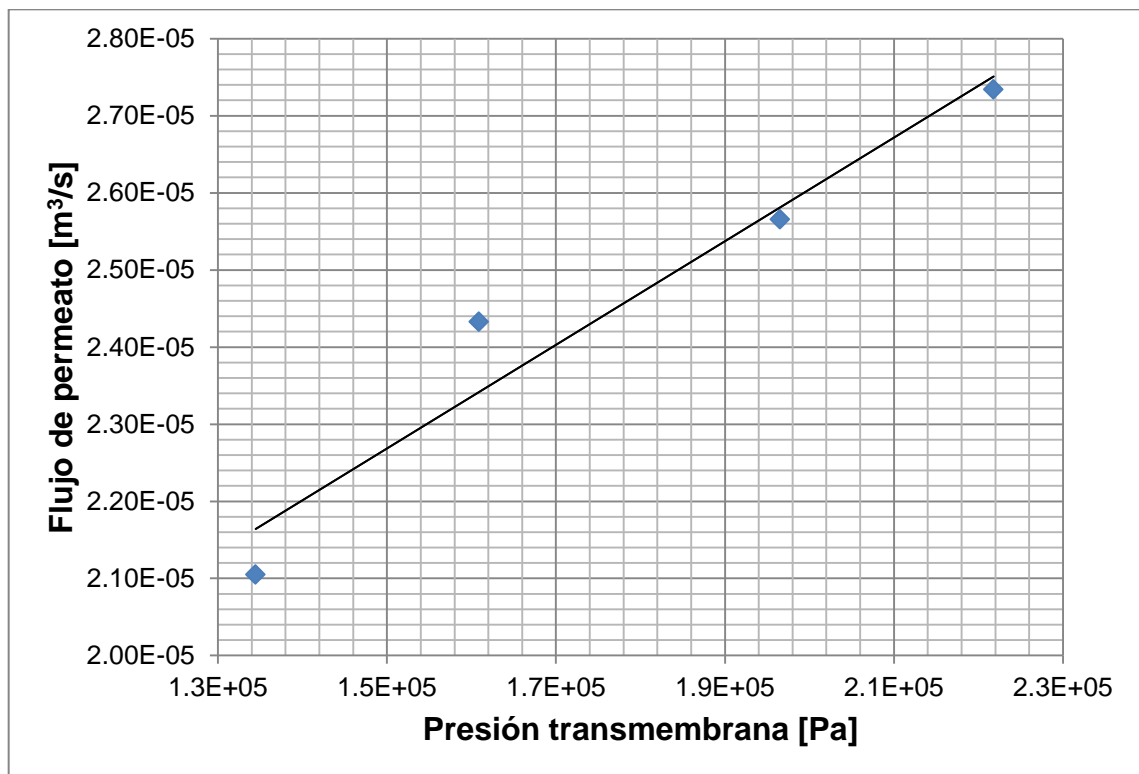
Apertura de válvula	Q_a (m ³ /s)	Q_p (m ³ /s)	PTM (Pa)	R_t	Porcentaje de recuperación (%)	Porcentaje de rechazo (%)
1/4	2,23E-05	1,90E-05	111465,29	0,62	85,01	14,99
1/2	2,74E-05	2,09E-05	140193,45	0,75	76,39	23,61
3/4	3,02E-05	2,21E-05	182711,14	0,83	73,25	26,75
1	3,17E-05	2,27E-05	214886,69	0,92	71,69	28,31

Fuente: elaboración propia.

4.2. Evaluación del flujo de permeato en función de la presión transmembrana

A continuación, se presentan las curvas y los modelos matemáticos obtenidos con las diferentes concentraciones analizadas.

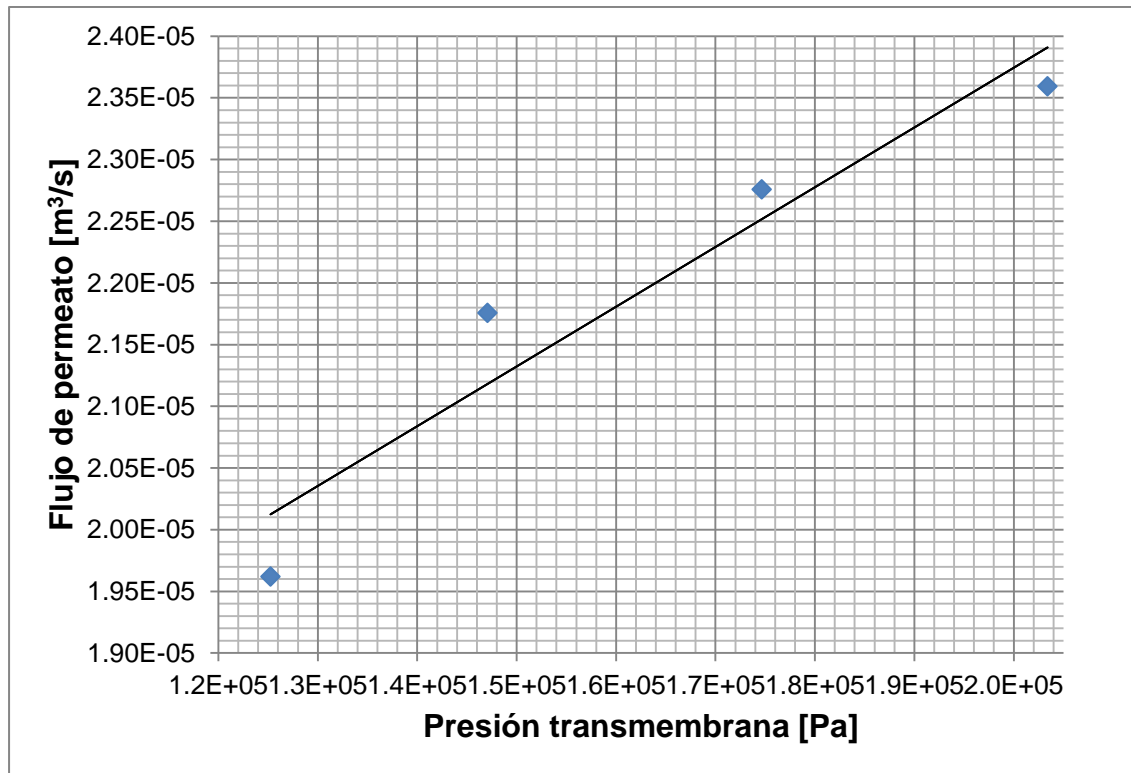
Figura 26. Flujo de permeato en función de la presión transmembrana a 1 ppm



Modelo de saturación	R ²	Rango de validez
$Q_p = 7E-11 [PTM] + 1E-05$	0,9419	[134 447,82,221 781,45] Pa

Fuente: elaboración propia.

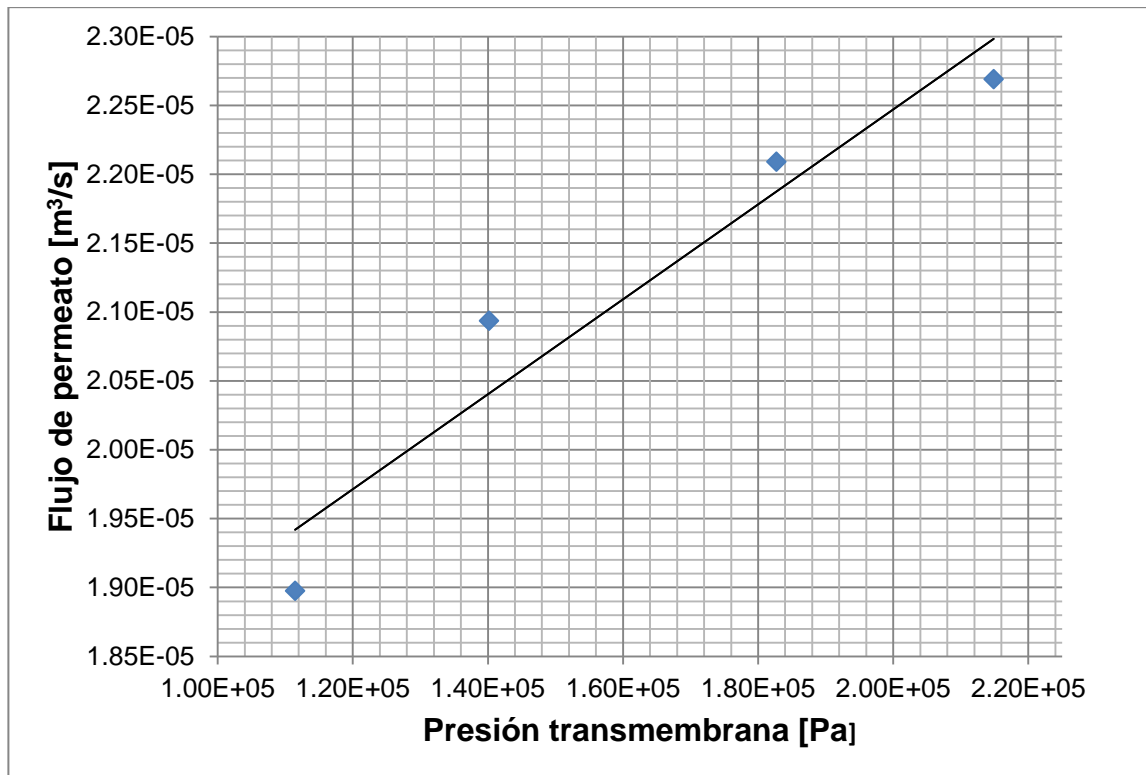
Figura 27. **Flujo de permeato en función de la presión transmembrana a 3 ppm**



Modelo de saturación	R ²	Rango de validez
$Q_p = 5E-11 \text{ PTM} + 1E-05$	0,9158	[125 254,81,203 395,42] Pa

Fuente: elaboración propia.

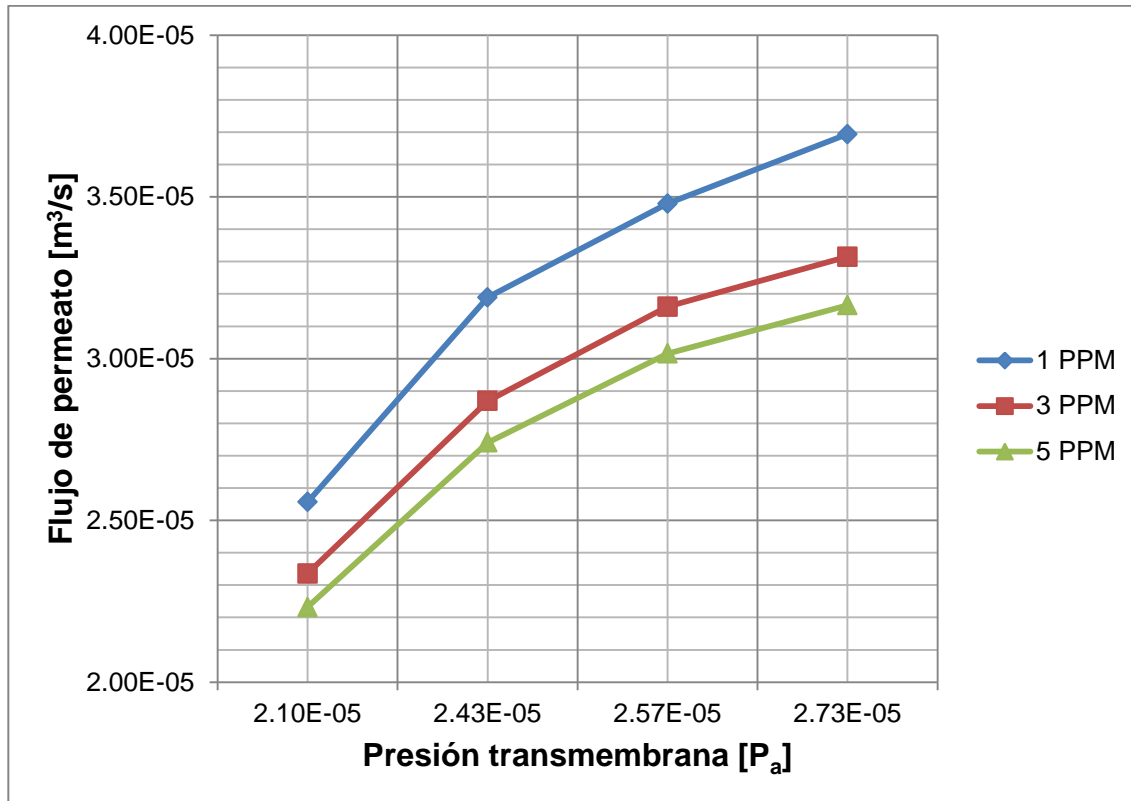
Figura 28. **Flujo de permeato en función de la presión transmembrana a 5 ppm**



Modelo de saturación	R ²	Rango de validez
$Q_p = 3E-11 PTM + 2E-05$	0.9244	[111 465,29,214 886,69] Pa

Fuente: elaboración propia.

Figura 29. Curvas de flujo



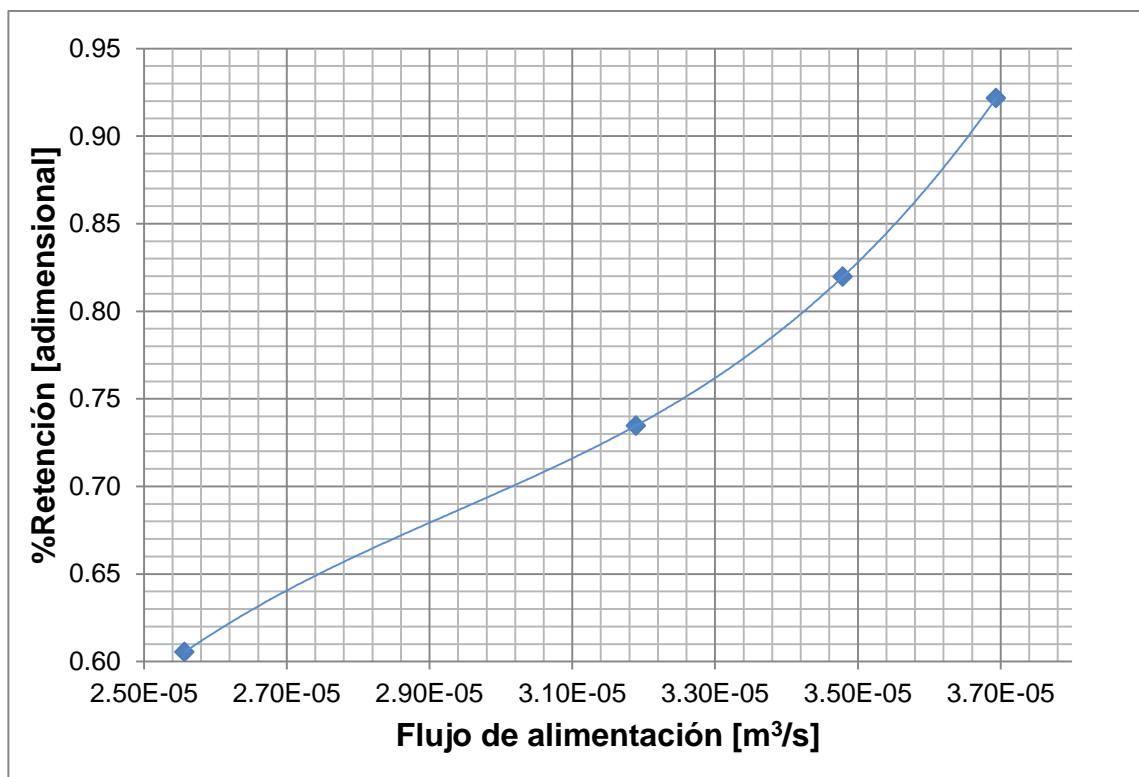
Rango de validez	[2,10E-05, 2,73E-05] Q _a
-------------------------	-------------------------------------

Fuente: elaboración propia.

4.3. Evaluación de la retención en función del flujo de alimentación

A continuación, se presentan las curvas y los modelos matemáticos del proceso de microfiltración a las concentraciones analizadas.

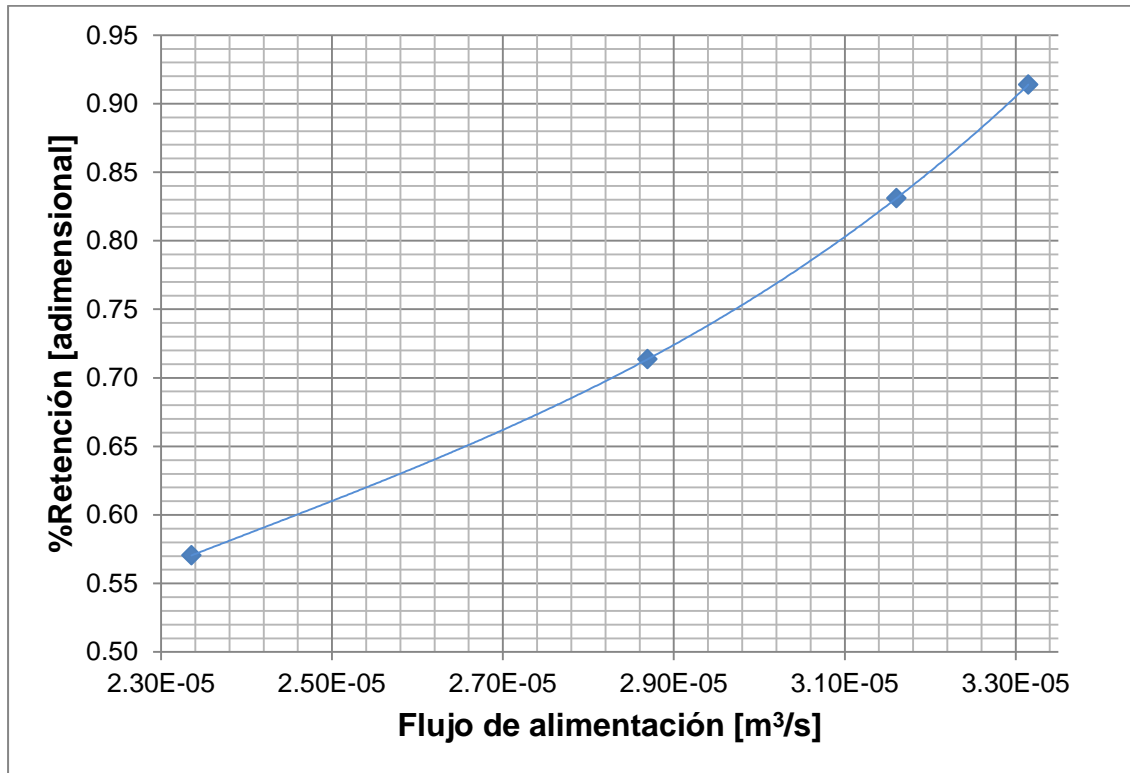
Figura 30. Retención en función del flujo de alimentación a 1 ppm



Modelo de saturación	R ²	Rango de validez
$\% \text{Retención} = 2E+14Q_a^3 - 2E+10Q_a^2 + 615257Q_a - 5,6842$	1	[2,56E-05, 3,69E-05] Q _a

Fuente: elaboración propia.

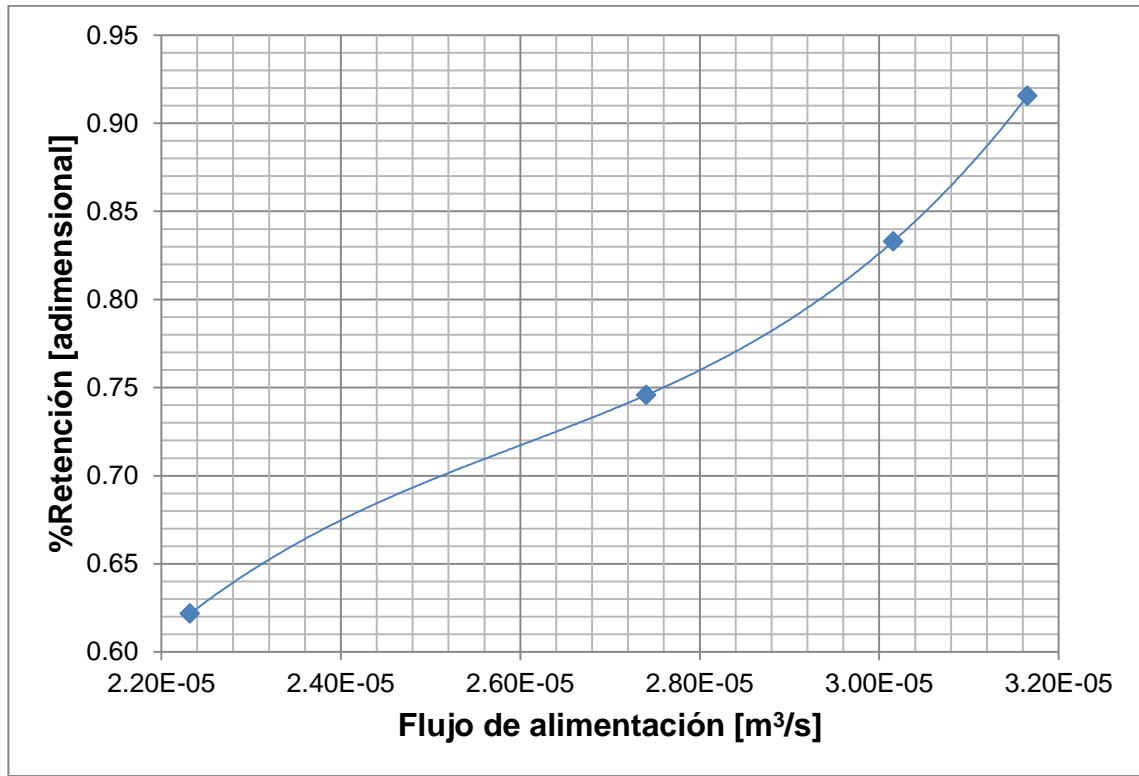
Figura 31. Retención en función del flujo de alimentación a 3 ppm



Modelo de saturación	R ²	Rango de validez
$\% \text{Retención} = 1\text{E}+14 \text{Qa}^3 - 1\text{E}+10 \text{Qa}^2 + 262020 \text{Qa} - 1,8899$	1	[2,30E-05,3,30E-05] Q _a

Fuente: elaboración propia.

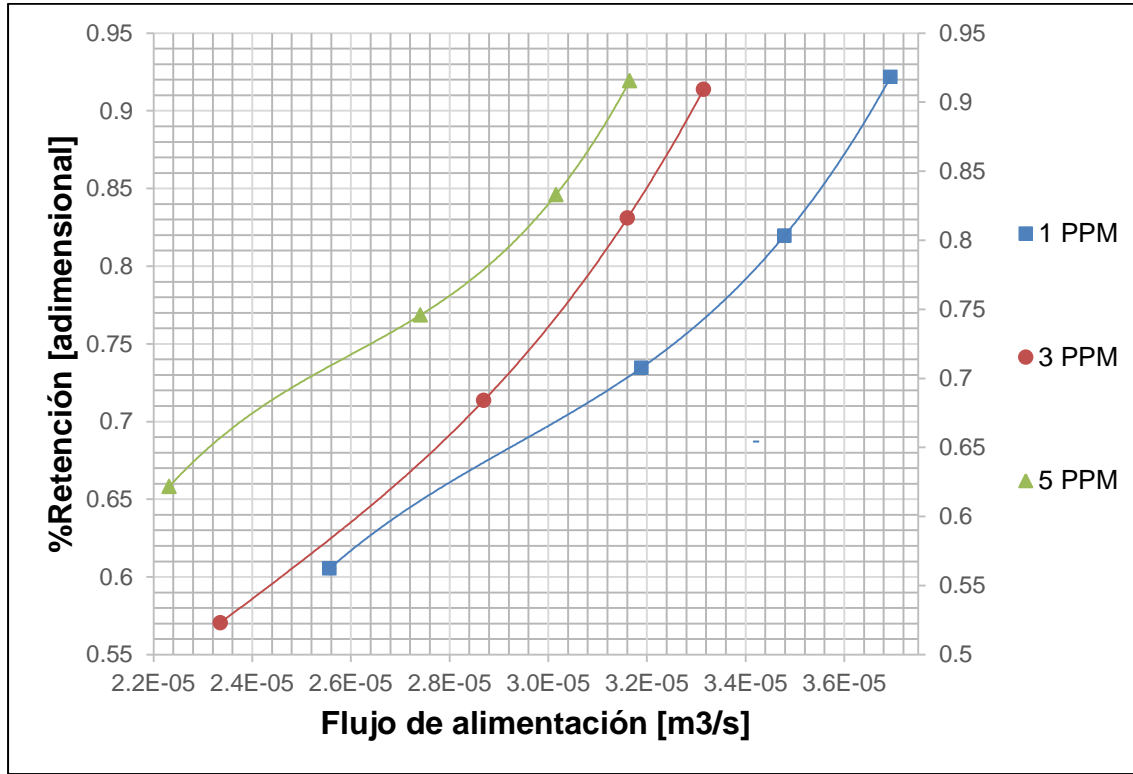
Figura 32. Retención en función del flujo de alimentación a 5 ppm



Modelo de saturación	R ²	Rango de validez
$\% \text{Retención} = 5\text{E}+14 Q_a^3 - 4\text{E}+10 Q_a^2 + 1\text{E}+06 Q_a - 8,4333$	1	[2,23E-05,3,17E-05] Q _a

Fuente: elaboración propia.

Figura 33. **Curvas de retención**



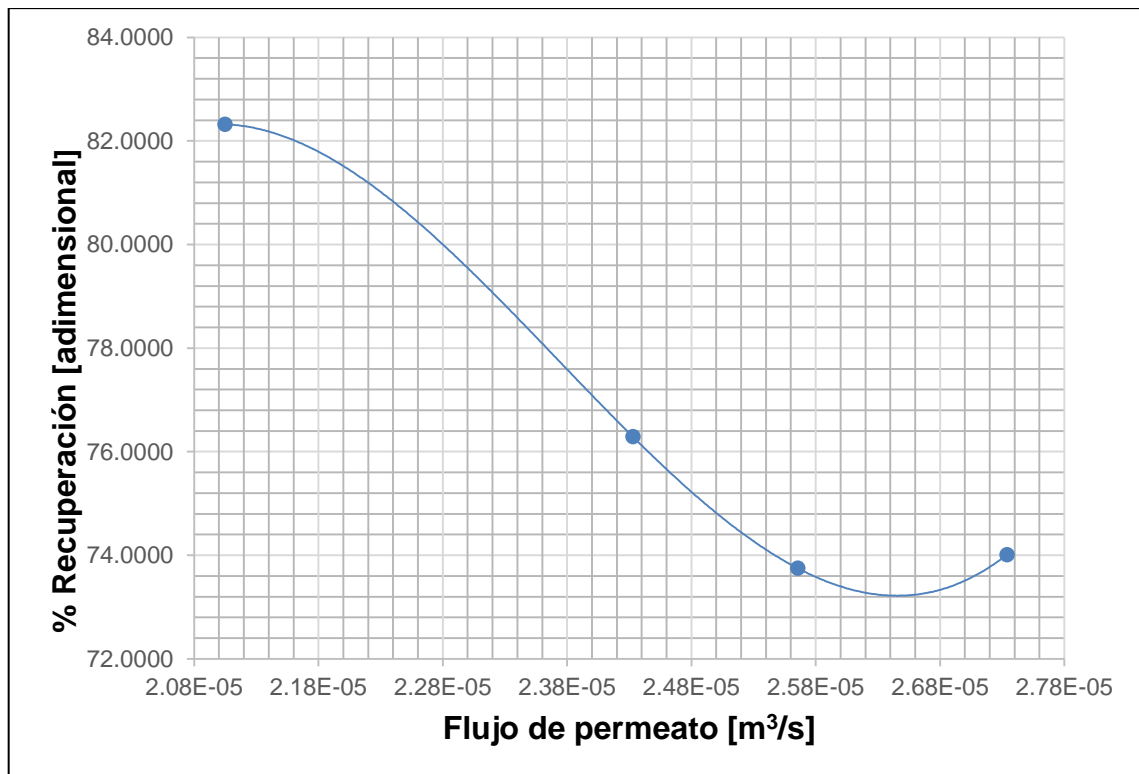
Rango de validez	[2,23E-05,3,69E-05] Q _a
-------------------------	------------------------------------

Fuente: elaboración propia.

4.4. Evaluación del porcentaje de recuperación en función del flujo de permeato

A continuación, se presentan las curvas y los modelos matemáticos de la evaluación del porcentaje de recuperación en función del flujo de permeato.

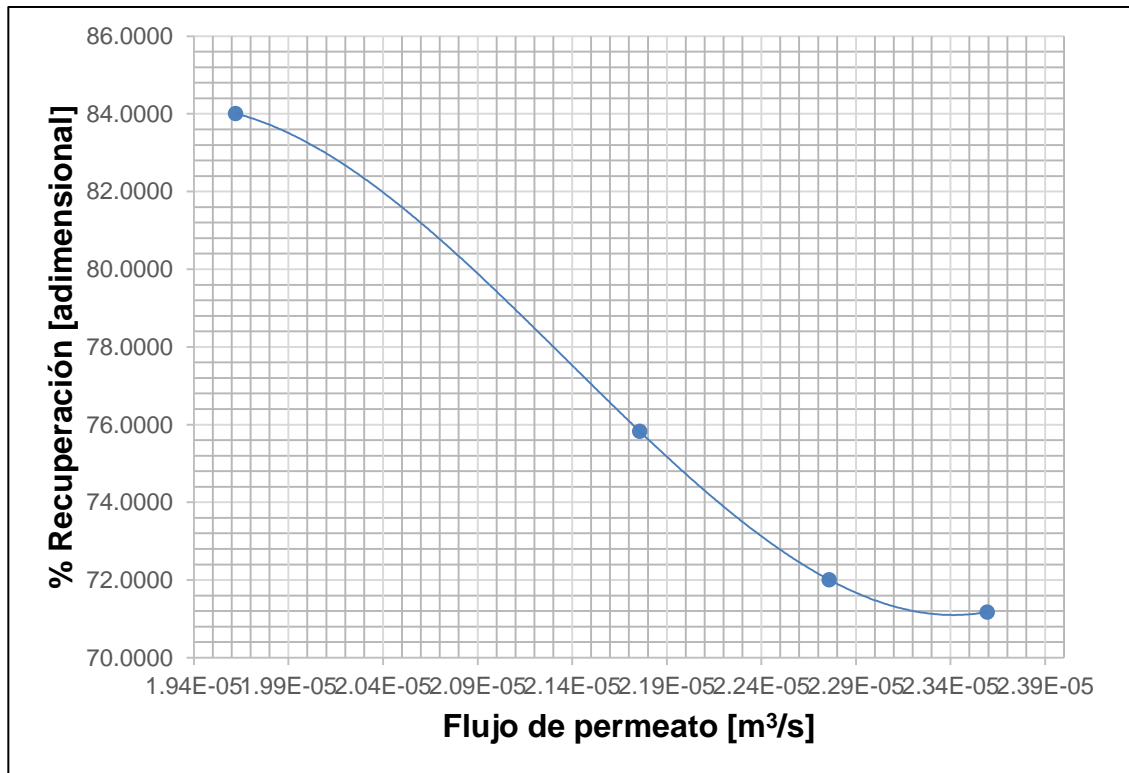
Figura 34. Porcentaje de recuperación en función del flujo de permeato a 1 ppm



Modelo de saturación	R ²	Rango de validez
$\% \text{Recuperación} = 1\text{E}+17\text{Q}_p^3 - 8\text{E}+12\text{Q}_p^2 + 2\text{E}+08 \text{Q}_p - 1360$	1	[2,10E-05,2,73E-05] Q _p

Fuente: elaboración propia.

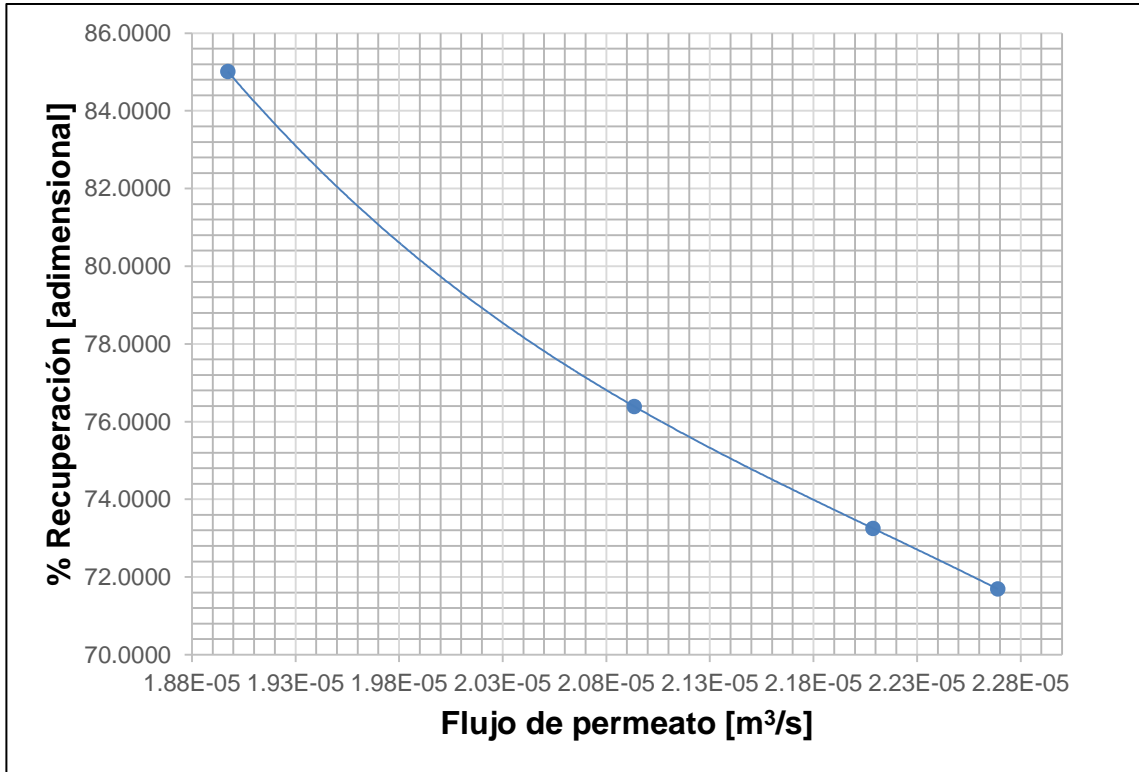
Figura 35. **Porcentaje de recuperación en función del flujo de permeato a 3 ppm**



Modelo de saturación	R ²	Rango de validez
$\% \text{Recuperación} = 4\text{E}+17 Q_p^3 - 2\text{E}+13 Q_p^2 + 5\text{E}+08 Q_p - 3577.8$	1	[1,96E-05,2,36E-05] Q _p

Fuente: elaboración propia.

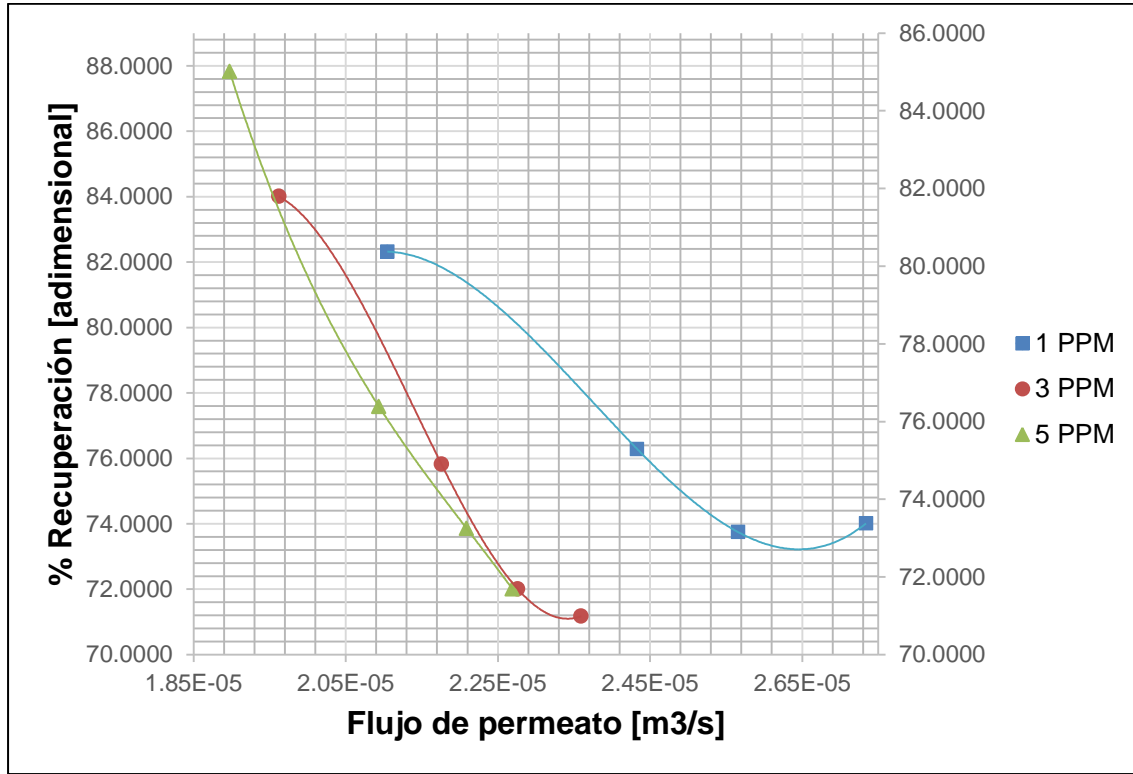
Figura 36. **Porcentaje de recuperación en función del flujo de permeato a 5 ppm**



Modelo de saturación	R ²	Rango de validez
$\% \text{Recuperación} = -1\text{E}+17 Q_p^3 + 8\text{E}+12 Q_p^2 - 2\text{E}+08 Q_p + 1473,2$	1	[1,90E-05,2,27E-05] Q _p

Fuente: elaboración propia.

Figura 37. Curvas de recuperación



Rango de validez	[1,90E-05,2,73E-05] Q _a
-------------------------	------------------------------------

Fuente: elaboración propia.

4.5. Coeficientes de permeabilidad

A continuación, se presentan los coeficientes de permeabilidad obtenidos mediante la evaluación de las membranas.

Tabla XX. Valores de los coeficientes de permeabilidad

Concentración [Fe] ³⁺ ppm	Coefficiente de permeabilidad [m/s *Pa]
1	7E-11
3	5E-11
5	3E-11

Fuente: elaboración propia.

4.6. Modelos de saturación de los procesos de filtrado

A continuación, se presenta un resumen de los modelos matemáticos obtenidos de la evaluación a diferentes concentraciones de alimentación.

Tabla XXI. Modelos de saturación obtenidos mediante análisis lineal del Flujo de permeato en función de la presión transmembrana

Evaluación	Fe ³⁺ [ppm]	Modelo de saturación
Qp vs Pa	1	$Q_p = 7E-11 [PTM] + 1E-05$
Qp vs Pa	3	$Q_p = 5E-11 PTM + 1E-05$
Qp vs Pa	5	$Q_p = 3E-11 PTM + 2E-05$

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Modelos de saturación obtenidos mediante análisis lineal del porcentaje de retención en función del flujo de alimentación.**

Evaluación	Fe⁺³ [ppm]	Modelo de saturación
%Retención vs Qa	1	$\%Retención = 2E+14Qa^3 - 2E+10Qa^2 + 615257Qa - 5,6842$
%Retención vs Qa	3	$\%Retención = 1E+14 Qa^3 - 1E+10 Qa^2 + 262020 Qa - 1,8899$
%Retención vs Qa	5	$\%Retención = 5E+14 Qa^3 - 4E+10 Qa^2 + 1E+06 Qa - 8,4333$

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Modelos de saturación obtenidos mediante regresiones lineales.**

Evaluación	Fe⁺³ [ppm]	Modelo de saturación
% Recuperación vs Q _p	1	$\%Recuperación = 1E+17Q_p^3 - 8E+12Q_p^2 + 2E+08 Q_p - 1360$
% Recuperación vs Q _p	3	$\%Recuperación = 4E+17 Q_p^3 - 2E+13 Q_p^2 + 5E+08 Q_p - 3577,8$
% Recuperación vs Q _p	5	$\%Recuperación = -1E+17 Q_p^3 + 8E+12 Q_p^2 - 2E+08 Q_p + 1473,2$

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Las membranas obtenidas se evaluaron mediante un proceso de primera generación de filtrado como lo es la microfiltración, es decir, que el proceso solo contemplo la operación de un sistema liquido-liquido. Dicho proceso se llevó a cabo por dos razones, la primera fue por la versatilidad del proceso ya que este tipo de evaluación tiene características comerciales y la segunda por su simpleza, ya que únicamente dependió de un gradiente de presión para poder llevarse a cabo.

Para fines de la evaluación, se utilizó una solución de sulfato ferroso heptahidratado (FeSO_4), debido a que es una sal comercial y de fácil de adquisición. Ya que la especie de análisis en el proceso de microfiltración fue el hierro, este tiene un radio atómico más pequeño que el poro de la membrana sintetizada (aproximadamente de $126\text{E}-12$ m), se utilizó sulfato de aluminio como aglutinante y con ello se logró retener este ión para cuantificar los resultados.

Se utilizaron tres diferentes soluciones con concentraciones de hierro de 1 ppm, 3 ppm y 5 ppm en el caudal de alimentación, para cada solución se regulo la válvula de globo a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ y 1 de su apertura, esto con el fin de evaluar parámetros como la productividad y eficiencia de las membranas en el proceso de microfiltración.

En cada uno de los casos, el flujo de permeato fue proporcional al flujo de alimentación, es decir que cuanto más se abría la válvula mayor era el flujo que atravesaba las membranas independientemente de la concentración de

alimentación. El análisis de microfiltración se realizó en un intervalo de apertura valvular de $\frac{1}{4}$ a 1, debido a que a caudales mayores de alimentación generaban ruptura de las membranas y no permitía una correcta evaluación. Las tablas de resultados evidenciaron que a mayores concentraciones de hierro (Fe^{3+}), el flujo de alimentación disminuye para cada apertura, esto se debió a la diferencia de densidad entre las soluciones de 1 ppm, 3 ppm y 5 ppm, siendo la de 5 ppm la más densa y la que menor caudal aportaba en la alimentación.

En la evaluación que se llevó a cabo en el módulo de plato y marco elaborado de ertalon, la fuerza conductora para el transporte del permeado fue la caída de presión a través de la membrana es decir el gradiente generado entre el flujo de alimentación y el flujo de permeado tal como se puede observar en la columna PTM de las tablas XVII, XVIII y XIX; en los resultados de las tablas ya citadas se observa que tanto el flujo de permeado como la presión transmembrana presentan un crecimiento proporcional. Este fenómeno fue representado en las figuras 26, 27 y 29 mediante gráficas de dispersión, con lo cual se obtuvieron los modelos matemáticos que representan la evaluación del flujo de permeado en función de la presión transmembrana. Se puede observar que el ajuste lineal aplicado se ajusta mucho para los tres casos desarrollados de la microfiltración.

Según los resultados obtenidos en la evaluación del proceso de microfiltración, se demostró que todas las configuraciones de membranas de acetato de celulosa de bagazo de caña azúcar evaluadas en el módulo fabricado retienen ión hierro (Fe^{+3}), de las soluciones de sulfato ferroso heptahidratado (FeSO_4). En las figuras 30, 31 y 32 se realizó el análisis de la retención en función del flujo de alimentación donde se evidenció que el porcentaje de retención de las membranas es directamente proporcional al flujo de alimentación independientemente de la concentración, esto se debió a que la

cantidad de soluto retenido por la membrana se incrementa conforme mayor es el paso de la solución de sulfato ferroso heptahidratado (FeSO_4), en las cavidades de la misma. El mayor porcentaje de retención se presentó en la apertura de válvula 1 para las soluciones de 1 ppm y 5 ppm, en ambos casos el porcentaje de retención fue de un 92 %.

Se evidenció que el porcentaje de recuperación es inversamente proporcional al flujo de permeato y que, con la configuración de membranas utilizadas en la evaluación, la conversión del caudal de alimentación al caudal de permeato es muy pobre. En los resultados de la evaluación se puede observar que independientemente de la concentración de alimentación, conforme más se abría la válvula reguladora de globo menor era el porcentaje de recuperación, situación que demostró que las membranas se saturaban y no permitían un alto flujo a través de ella, con altos caudales de alimentación, obteniendo los menores porcentajes de recuperación cuando la apertura de la válvula reguladora de globo era de 1 vuelta completa. El mayor porcentaje de recuperación que se obtuvo fue de 82,32 % para una apertura de válvula reguladora de globo de $\frac{1}{4}$ con una alimentación 1 ppm de hierro tabla XVII, y la menor que se obtuvo fue de 71,18 % para una apertura de la válvula reguladora de globo de 1 vuelta con una alimentación 1 ppm de hierro, tabla XVIII.

Se determinaron los coeficientes de permeabilidad del soluto que tienen las membranas evaluadas en el módulo fabricado a concentraciones de alimentación de hierro de 1 ppm, 3 ppm y 5 ppm. Esto se obtuvo mediante el análisis lineal de las gráficas del caudal volumétrico *versus* presión transmembrana, donde con el dato de la pendiente de las gráficas se obtuvieron los coeficientes de permeabilidad. En la tabla XIX se puede observar que el coeficiente de permeabilidad es inversamente proporcional a la concentración inicial de hierro, es decir, que, a mayor concentración en el flujo de entrada,

menor es el coeficiente de permeabilidad que tiene la estructura de la membrana.

Por último, en las tablas XXI, XXII y XXIII se muestran los modelos matemáticos obtenidos en el proceso de microfiltración a diferentes concentraciones de alimentación, estos modelos se obtuvieron mediante correlaciones lineales y se realizaron con el fin de expresar míticamente las diversas evaluaciones que se realizaron en el módulo fabricado de plato y marco.

CONCLUSIONES

1. Las membranas de acetato de celulosa obtenidas a partir del bagazo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L), presentaron afinidad fisicoquímica con la solución analizada y no generaron ningún tipo de reacción al momento de llevarse a cabo la evaluación.
2. El flujo de permeato analizado en función de la presión transmembrana a diferentes concentraciones presentó una tendencia lineal en cada uno de los casos evaluados. La evaluación que presentó mayor caída de presión fue cuando la concentración de ión hierro (Fe^{+3}), del flujo de alimentación fue de 1 ppm.
3. Todas las membranas sintetizadas de acetato de celulosa a partir de bagazo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L), retuvieron ión hierro de la solución utilizada de sulfato ferroso. El resultado de mayor de retención fue a las condiciones de 1 ppm de concentración de alimentación y apertura de válvula de 1, siendo 92 %.
4. La configuración utilizada de membranas en el módulo de plato y marco provocaron una gran caída de flujo cuando mayor era la apertura de la válvula provocando saturación; el menor porcentaje de recuperación fue 71,68 % y se obtuvo en las condiciones de 5 ppm y una vuelta de apertura de válvula.

5. Las membranas presentaron el mayor coeficiente de permeabilidad en las condiciones de 1 ppm de concentración de hierro en la alimentación siendo ese de $7E-11 \left(\frac{m}{s} * Pa \right)$.

RECOMENDACIONES

1. Tratar el bagazo de caña de azúcar y someterlo al secado lo antes posible, esto con el fin de evitar que la muestra se arruine mediante plagas o fermentación.
2. Emplear un tamiz más pequeño en el análisis granulométrico de la celulosa previo a la acetilación, esto con el objetivo que reducir el tamaño del poro de la membrana para microfiltración.
3. Aplicarle mantenimiento preventivo al sistema de bombeo de la estación experimental de membranas del laboratorio de operaciones unitarias.
4. Definir un rango de operación para evitar rupturas en las membranas al momento de realizar la evaluación de las mismas.
5. Utilizar una configuración de menor número de membranas en el módulo de plato y marco diseñado para la evaluación de la microfiltración y con ello obtener una mejor tasa de recuperación de caudal.

BIBLIOGRAFÍA

1. BARRAGÁN, Blanca. *Utilización de residuos Agroindustriales*. Trabajo de graduación de Ing. en Sistemas Ambientales. Instituto Politécnico Nacional de México, 2008. 45 p.
2. CARREÑO, Solly. *Obtención de acetato de celulosa a partir de residuos celulósicos postconsumo*. Trabajo de graduación de Ciencias Químicas. Facultad de Ciencias, Universidad Industrial de Santander Colombia, 2005. 108 p.
3. CATAÑO, Elkin. *Obtención y caracterización de nanofibras de celulosa a partir de desechos agroindustriales*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Minas, Escuela de Procesos y Energía, Universidad Nacional de Colombia, 2009. 31 p.
4. FRÍAS, Teresa. *XVI verano de la investigación científica*. Academia Mexicana de Ciencias, 2006. 75 p.
5. FUENTES, Robin. *Preparación de una membrana compuesta para el proceso de microfiltración con base porosa y estrato selectivo denso (pet)*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2016. 152 p.

6. GARCIA, Wendy. *Separación de propano y propileno por medio de la membrana de polioxido de etilenoco-epiclorhidrina) facilitada por ión plata*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2011. 106 p.
7. GONZALVEZ, José. *Fabricación de membranas de acetato de celulosa aptas para ósmosis inversa y nanofiltración mediante el método de inversión de fase*. Trabajo de graduación de Doctorado en Ingeniería Química y Nuclear. Facultad de Ingeniería, Universidad Politecnica de Valencia, 1998. 373 p.
8. HENINRICH, Jürgen. *Determination of the substitution pattern in the polymer chain of the cellulose acetate*. Revista Plymer Chemistry Volumen 37. 373 p.
9. MONTES, Ana. *Preparación de una membrana polimérica a partir de polietileno tereftalato (PET) a diferentes tiempos y temperaturas de sinterización*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2015. 243 p.
10. SALDIVAR, Verónikha. *Estudio de tres variables en la obtención de pula celulósica, con proceso de alto rendimiento a partir del tallo de arroz (Oryza Sativa L)*. Trabajo de graduación de Ing. Forestal. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima Perú, 2005. 113 p

11. VALDIVIA, Alma. Natalia. *Los sistemas vivientes., por incorporación de nano partículas de dióxido de titanio.* Trabajo de graduación de Ing. Civil en Biotecnología. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 2015. 80 p.

12. VICENCIO, Natalia. *Síntesis y caracterización de membranas para osmosis inversa con capacidad anti-bioincrustante, por incorporación de nano partículas de dióxido de titanio.* Trabajo de graduación de Ing. Civil en Biotecnología. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 2015. 80 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Secado de materia prima post lavado**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Control de Calidad, UNISER S.A. Ciudad de Guatemala.

Apéndice 2. **Pesado de la muestra**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Control de Calidad, UNISER S.A. Ciudad de Guatemala.

Apéndice 3. **Pruebas preliminares de sintetización**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Control de Calidad, UNISER S.A. Ciudad de Guatemala.

Apéndice 4. **Obtención de acetato de celulosa**



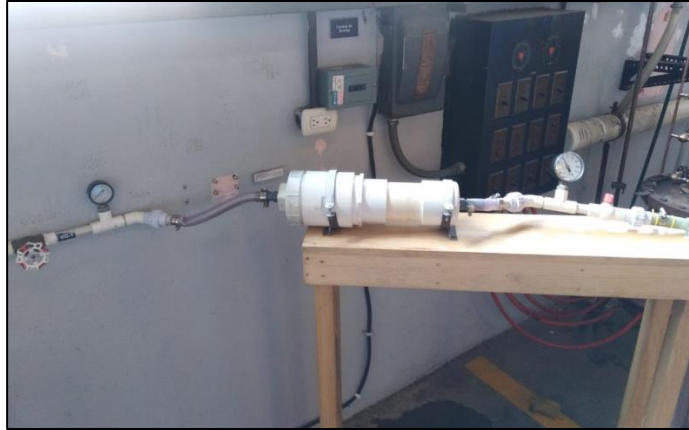
Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Control de Calidad, UNISER S.A. Ciudad de Guatemala.

Apéndice 5. **Pruebas preliminares de filtración**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOPU), Facultad de Ingeniería, Edificio T5. Ciudad de Guatemala.

Apéndice 6. **Conexión del módulo con la estación experimental de membranas**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOPU), Facultad de Ingeniería, Edificio T5. Ciudad de Guatemala.

Apéndice 7. **Muestra de cálculo**

Ecuación No. 1 **Flujo volumétrico**

$$\dot{Q} = \frac{v}{t}$$

Dónde:

\dot{Q} : Caudal volumétrico (m^3/s)

v : Volumen de líquido (m^3)

t : Tiempo (s)

Continuación apéndice 7.

Ejemplo: Calculo del caudal de alimentación cuando se hace fluir en el sistema un volumen de $6E-4 \text{ m}^3$ en un tiempo de 23,45 s, a una concentración de 1 ppm y una apertura de válvula $\frac{1}{4}$.

$$\dot{Q} = \frac{v}{t} = \frac{6E-4 \text{ m}^3}{23,45 \text{ s}} = 2,56E-05 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Nota: De la misma manera se calculó el resto de caudales.

Ecuación No. 2 **Presión transmembrana**

$$PTM = Pa - Pp$$

Dónde:

PTM: Presión transmembrana

Pa: Presión de alimentación (pa)

Pp: Presión de permeato (pa)

Ejemplo: Calculo de la presión transmembrana cuando la presión del flujo de alimentación es de 165474,25 Pa y la presión en el permeato es de 103421,40 Pa, a una concentración de 1 ppm y una apertura de válvula $\frac{1}{4}$.

$$PTM = Pa - Pp = 165474,25 \text{ Pa} - 103421,40 \text{ Pa} = 62052,84 \text{ Pa}$$

Nota: De la misma manera se calculó el resto de presiones.

Continuación apéndice 7.

Ecuación No. 3 Retención en membrana

$$R_t = \frac{[Fe]_{ra} - [Fe]_p}{[Fe]_{ra}}$$

Dónde:

R_t : Retención

$[Fe]_a$: Concentración en la alimentación (ppm)

$[Fe]_p$: Concentración en el permeato (ppm)

Ejemplo: Calculo de la retención en la membrana cuando la concentración de hierro en la alimentación es de 0,98 ppm y la concentración de hierro en el permeato es de 0,387 ppm, a una concentración de 1 ppm y una apertura de válvula $\frac{1}{4}$.

$$R_t = \frac{[Fe]_{ra} - [Fe]_p}{[Fe]_{ra}} = \frac{0,98 \text{ ppm} - 0,387 \text{ ppm}}{0,98 \text{ ppm}} = 0,61$$

Ecuación No. 4 Porcentaje de recuperación

$$\%Recuperación = \frac{Q_a}{Q_p} * 100$$

Dónde:

$\%Recuperación$: Porcentaje de recuperación

Q_a : Flujo de alimentación (m³/s)

Q_p : Flujo de permeato (m³/s)

Continuación apéndice 7.

Ejemplo: Calculo del porcentaje de recuperación cuando el flujo de alimentación es de $2,56E-05 \text{ m}^3/\text{s}$ y el flujo obtenido de permeato es de $2,10E-05 \text{ m}^3/\text{s}$, a una concentración de 1 ppm y una apertura de válvula $\frac{1}{4}$.

$$\%Recuperación = \frac{Q_a}{Q_p} * 100 = \frac{2,56E - 05 \frac{m^3}{s}}{2,10E - 05 \frac{m^3}{s}} * 100 = 82,32$$

Ecuación No. 5 **Porcentaje de rechazo**

$$\%Rechazo = \frac{Q_a - Q_p}{Q_a} * 100$$

Dónde:

$\%Rechazo$: Porcentaje de rechazo

Q_a : Flujo de alimentación (m^3/s)

Q_p : Flujo de permeato (m^3/s)

Ejemplo: Calculo del porcentaje de rechazo cuando el flujo de alimentación es de $2,56E-05 \text{ m}^3/\text{s}$ y el flujo obtenido de permeato es de $2,10E-05 \text{ m}^3/\text{s}$, a una concentración de 1 ppm y una apertura de válvula $\frac{1}{4}$.

$$\begin{aligned}\%Rechazo &= \frac{Q_a - Q_p}{Q_a} * 100 \\ \%Rechazo &= \frac{(2,56E - 05) \frac{m^3}{s} - (2,10E - 05) \frac{m^3}{s}}{(2,56E - 05) \frac{m^3}{s}} * 100 \\ \%Rechazo &= 17,68 \%\end{aligned}$$

Continuación apéndice 7.

Ecuación No. 6 **Coefficiente de permeabilidad**

$$J = K * PTM$$

Dónde:

J : Flujo de permeado $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

K : Coeficiente de Darcy $\left(\frac{m^3}{s} * Pa\right)$

PTM : Presión Transmembrana (Pa)

Se obtuvo mediante el desarrollo de una regresión lineal de las curvas del caudal volumétrico de permeado versus la presión transmembrana (PTM), el dato de la pendiente, obtenido de la gráfica arrojó el coeficiente de permeabilidad.

Ecuación No. 7 **Media aritmética**

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

Dónde:

\bar{X} : Valor promedio de las mediciones

X_i : Valor de cada una de las mediciones

n : Número de mediciones

Continuación apéndice 7.

Ejemplo: Cálculo de la media aritmética de la concentración de hierro en el permeato, a una concentración de 1 ppm y una apertura de válvula ¼.

$$\bar{X} = \left(\frac{0,37 + 0,41 + 0,38}{3} \right) ppm = 0,39 ppm$$

Ecuación No. 8 **Desviación estándar**

$$s^2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

Dónde:

\bar{x} : Valor promedio de las mediciones

x_i : Valor de cada una de las mediciones

n : Número de mediciones

s^2 : Desviación estándar

Ejemplo: Cálculo de la desviación estándar del flujo de alimentación, a una concentración de 1 ppm y una apertura de válvula ¼.

$$s^2 = \sqrt{\frac{(0,37 - 0,39)^2 + (0,41 - 0,39)^2 + (0,38 - 0,39)^2}{3}} = 2,08E - 02$$

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. Datos calculados

Tabla A1. Caudales de alimentación, $[\text{Fe}]_a = 1 \text{ ppm}$

Volumen analizado = $6.00\text{E}-0.4 \text{ m}^3$								
C	1/4 de apertura		1/2 de apertura		3/4 de apertura		1 de apertura	
	t (s)	Qa (m^3/s)	t (s)	Qa (m^3/s)	t (s)	Qa (m^3/s)	t (s)	Qa (m^3/s)
1	23,45	2,56E-05	18,8 2	3,19E-05	17,20	3,49E-05	16,22	3,70E-05
2	23,48	2,56E-05	18,8 5	3,18E-05	17,26	3,48E-05	16,27	3,69E-05
3	23,47	2,56E-05	18,7 7	3,20E-05	17,28	3,47E-05	16,24	3,69E-05
\bar{x}	23,47	2,56E-05	18,8 1	3,2E-05	17,25	3,5E-05	16,24	3,7E-05
s^2	1,5E-2	1,66E-08	4E-2	6,8E-08	4,1E-2	8,4E-08	2,5E-2	5,7E-08

Fuente: elaboración propia.

Tabla A2. Caudales de alimentación, $[\text{Fe}]_a = 3 \text{ ppm}$

Volumen analizado = $6.00\text{E}-0.4 \text{ m}^3$								
C	1/4 de apertura		1/2 de apertura		3/4 de apertura		1 de apertura	
	t (s)	Qa (m^3/s)	t (s)	Qa (m^3/s)	t (s)	Qa (m^3/s)	t (s)	Qa (m^3/s)
1	25,67	2,34E-05	20,96	2,86E-05	18,95	3,17E-05	18,12	3,31E-05
2	25,71	2,33E-05	20,85	2,88E-05	19,02	3,15E-05	18,09	3,32E-05
3	25,69	2,34E-05	20,92	2,87E-05	18,98	3,16E-05	18,09	3,32E-05
\bar{x}	25,69	2,3E-05	20,91	2,9E-05	18,98	3,2E-05	18,10	3,3E-05
s^2	2E-2	1,8E-08	5,6E-2	7,7E-08	3,5E-2	5,9E-08	1,7E-2	3,2E-08

Fuente: elaboración propia.

Continuación del apéndice 8.

Tabla A3. Caudales de alimentación, $[Fe]_a = 5 \text{ ppm}$

Volumen analizado = 6.00E-0.4 m3								
C	1/4 de apertura		1/2 de apertura		3/4 de apertura		1 de apertura	
	t (s)	Qa (m ³ /s)	t (s)	Qa (m ³ /s)	t (s)	Qa (m ³ /s)	t (s)	Qa (m ³ /s)
1	26,8 9	2,23E-05	21,87	2,74E-05	19,94	3,01E-05	18,95	3,17E-05
2	26,8 4	2,24E-05	21,89	2,74E-05	19,88	3,02E-05	18,94	3,17E-05
3	26,9 2	2,23E-05	21,92	2,74E-05	19,87	3,02E-05	18,98	3,16E-05
\bar{x}	26,8 8	2,23E-05	21,89	2,74E-05	19,9	3,02E-05	18,96	3,17E-05
s^2	4E-2	3,36E-08	2,52E-2	3,15E-08	3,79E-2	5,7E-08	2,1E-2	3,47E-08

Fuente: elaboración propia.

Tabla A4. Caudales de permeato, $[Fe]_a = 1 \text{ ppm}$

Volumen analizado = 6.00E-0.4 m3								
C	1/4 de apertura		1/2 de apertura		3/4 de apertura		1 de apertura	
	t (s)	Qa (m ³ /s)	t (s)	Qa (m ³ /s)	t (s)	Qa (m ³ /s)	t (s)	Qa (m ³ /s)
1	28,56	2,10E-05	24,98	2,40E-05	23,21	2,59E-05	21,89	2,74E-05
2	28,45	2,11E-05	25,02	2,40E-05	23,53	2,55E-05	21,92	2,74E-05
3	28,51	2,10E-05	24,01	2,50E-05	23,42	2,56E-05	22,03	2,72E-05
\bar{x}	28,51	2,10E-05	24,67	2,43E-05	23,39	2,57E-05	21,95	2,73E-05
s^2	6E-2	4,07E-08	5,7E-1	5,72E-07	1,6E-1	1,79E-07	7,4E-2	9,17E-08

Fuente: elaboración propia.

Continuación del apéndice 8.

Tabla A5. Caudales de permeato, $[Fe]_a = 3 \text{ ppm}$

Volumen analizado = $6.00E-0.4 \text{ m}^3$								
C	1/4 de apertura		1/2 de apertura		3/4 de apertura		1 de apertura	
	t (s)	Qa (m ³ /s)	t (s)	Qa (m ³ /s)	t (s)	Qa (m ³ /s)	t (s)	Qa (m ³ /s)
1	30,58	1,96E-05	27,54	2,18E-05	26,34	2,28E-05	25,43	2,36E-05
2	30,57	1,96E-05	27,61	2,17E-05	26,38	2,27E-05	25,44	2,36E-05
3	30,59	1,96E-05	27,58	2,18E-05	26,37	2,28E-05	25,42	2,36E-05
\bar{x}	30,58	1,96E-05	27,58	2,18E-05	26,36	2,28E-05	25,43	2,36E-05
s^2	1E-2	6,42E-09	3,51E-2	2,77E-08	2,1E-2	1,80E-08	1,E-02	9,28E-09

Fuente: elaboración propia.

Tabla A6. Caudales de permeato, $[Fe]_a = 5 \text{ ppm}$

Volumen analizado = $6,00E-0,4 \text{ m}^3$								
C	1/4 de apertura		1/2 de apertura		3/4 de apertura		1 de apertura	
	t (s)	Qa (m ³ /s)	t (s)	Qa (m ³ /s)	t (s)	Qa (m ³ /s)	t (s)	Qa (m ³ /s)
1	31,62	1,90E-05	28,64	2,09E-05	27,15	2,21E-05	26,45	2,27E-05
2	31,61	1,90E-05	28,69	2,09E-05	27,16	2,21E-05	26,47	2,27E-05
3	31,64	1,90E-05	28,65	2,09E-05	27,18	2,21E-05	26,41	2,27E-05
\bar{x}	31,62	1,90E-05	28,66	2,09E-05	27,16	2,21E-05	26,44	2,27E-05
s^2	2E-2	9,16E-09	2,6E-2	1,93E-08	1,5E-2	1,24E-08	3,1E-2	2,62E-08

Fuente: elaboración propia.

Continuación del apéndice 8.

Tabla A7. **Concentración de hierro en el permeato, $[Fe]_a = 1$ ppm**

C	1/4 de apertura	1/2 de apertura	3/4 de apertura	1 de apertura
	[Fe]p (ppm)	[Fe]p (ppm)	[Fe]p (ppm)	[Fe]p (ppm)
1	0,37	0,24	0,16	0,08
2	0,41	0,25	0,18	0,09
3	0,38	0,29	0,19	0,06
\bar{x}	0,39	0,26	0,18	0,08
s^2	2,08E-02	2,65E-02	1,53E-02	1,53E-02

Tabla A8. **Concentración de hierro en el permeato, $[Fe]_a = 3$ ppm**

C	1/4 de apertura	1/2 de apertura	3/4 de apertura	1 de apertura
	[Fe]p (ppm)	[Fe]p (ppm)	[Fe]p (ppm)	[Fe]p (ppm)
1	1,25	0,83	0,52	0,25
2	1,28	0,85	0,48	0,23
3	1,31	0,88	0,51	0,29
\bar{x}	1,28	0,85	0,50	0,26
s^2	3,00E-02	2,52E-02	2,08E-02	3,06E-02

Tabla A9. **Concentración de hierro en el permeato, $[Fe]_a = 5$ ppm**

C	1/4 de apertura	1/2 de apertura	3/4 de apertura	1 de apertura
	[Fe]p (ppm)	[Fe]p (ppm)	[Fe]p (ppm)	[Fe]p (ppm)
1	1,88	1,26	0,82	0,39
2	1,91	1,29	0,88	0,45
3	1,85	1,24	0,79	0,42
\bar{x}	1,88	1,26	0,83	0,42
s^2	3,00E-02	2,52E-02	4,58E-02	3,00E-02

Fuente: elaboración propia.

Continuación del apéndice 8.

Tabla A10. Presión generada por el flujo de entrada, $[Fe]_a = 1 \text{ ppm}$

C	1/4 de apertura	1/2 de apertura	3/4 de apertura	1 de apertura
	$P_{in} \text{ (Pa)}$	$P_{in} \text{ (Pa)}$	$P_{in} \text{ (Pa)}$	$P_{in} \text{ (Pa)}$
1	158 579,48	213 737,56	241 316,6	262 000,88
2	172 369	199 948,04	227 527,08	268 895,64
3	165 474,24	186 158,52	241 316,6	282 685,16
\bar{x}	165 474,24	199 948,04	236 720,09	271 193,89
s^2	6894,76	13789,52	7961,38	10531,92

Fuente: elaboración propia.

Tabla A11. Presión generada por el flujo de entrada, $[Fe]_a = 3 \text{ ppm}$

C	1/4 de apertura	1/2 de apertura	3/4 de apertura	1 de apertura
	$P_{in} \text{ (Pa)}$	$P_{in} \text{ (Pa)}$	$P_{in} \text{ (Pa)}$	$P_{in} \text{ (Pa)}$
1	158579,48	193053,28	220632,32	262000,88
2	158579,48	186158,52	227527,08	255106,12
3	172369	193053,28	220632,32	255106,12
\bar{x}	163175,99	190755,03	222930,57	257404,37
s^2	7961,38	3980,69	3980,69	3980,69

Fuente: elaboración propia.

Continuación del apéndice 8.

Tabla A12. **Presión generada por el flujo de entrada, $[Fe]_a = 5$ ppm**

C	1/4 de apertura	1/2 de apertura	3/4 de apertura	1 de apertura
	P_{in} (Pa)	P_{in} (Pa)	P_{in} (Pa)	P_{in} (Pa)
1	151684,72	186158,52	220632,32	268895,64
2	144789,96	172369	234421,84	282685,16
3	165474,24	193053,28	241316,6	268895,64
\bar{x}	153982,97	183860,27	232123,59	273492,15
s^2	10531,92	10531,92	10531,92	7961,38

Fuente: elaboración propia.

Tabla A13. **Presión generada por el flujo de permeato, $[Fe]_a = 1$ ppm**

C	1/4 de apertura	1/2 de apertura	3/4 de apertura	1 de apertura
	P_{in} (Pa)	P_{in} (Pa)	P_{in} (Pa)	P_{in} (Pa)
1	103421,4	124105,68	158579,48	172369
2	110316,16	117210,92	165474,24	179263,76
3	96526,64	124105,68	144789,96	165474,24
\bar{x}	103421,40	121807,43	156281,23	172369,00
s^2	6894,76	3980,69	10531,92	6894,76

Fuente: elaboración propia.

Continuación del apéndice 8.

Tabla A14. **Presión generada por el flujo de permeato, $[Fe]_a = 3$ ppm**

Concentración teórica de flujo de alimentación 3 ppm				
C	1/4 de apertura	1/2 de apertura	3/4 de apertura	1 de apertura
	P_{in} (Pa)	P_{in} (Pa)	P_{in} (Pa)	P_{in} (Pa)
1	82737,12	110316,16	131000,44	151684,72
2	82737,12	103421,4	124105,68	144789,96
3	96526,64	96526,64	124105,68	151684,72
\bar{x}	87333,63	103421,40	126403,93	149386,47
s^2	7961,38	6894,76	3980,69	3980,69

Fuente: elaboración propia.

Tabla A15. **Presión generada por el flujo de permeato, $[Fe]_a = 5$ ppm**

Concentración teórica de flujo de alimentación 5 ppm				
C	1/4 de apertura	1/2 de apertura	3/4 de apertura	1 de apertura
	P_{in} (Pa)	P_{in} (Pa)	P_{in} (Pa)	P_{in} (Pa)
1	62052,84	89631,88	124105,68	144789,96
2	68947,6	103421,4	131000,44	165474,24
3	75842,36	96526,64	144789,96	158579,48
\bar{x}	68947,60	96526,64	133298,69	156281,23
s^2	6894,76	6894,76	10531,92	10531,92

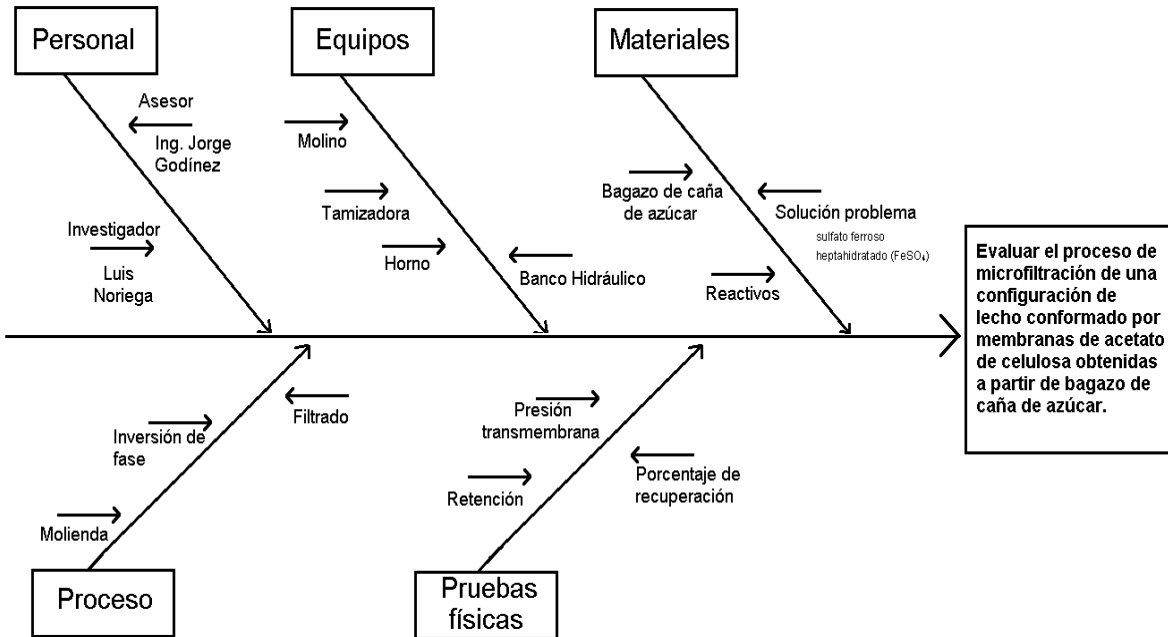
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Tabla de requisitos académicos**

Área	Cursos	Temas
Química	<ul style="list-style-type: none"> • Química 3 • Química 4 • Análisis Cualitativo • Química Orgánica 1 • Química Orgánica 2 	Disoluciones Cambios de estado Soluciones Buffer Hidrolisis Ácida Extracción alcalina Acetilación
Fisicoquímica	<ul style="list-style-type: none"> • Fisicoquímica 2 • Laboratorio de Fisicoquímica 1 • Laboratorio de Fisicoquímica 2 	Equilibrio líquido-líquido Osmosis inversa
Operaciones Unitarias	<ul style="list-style-type: none"> • Balance de masa y energía • Flujo de fluidos • Transferencia de calor • Transferencia de masa • Laboratorio de Ingeniería Química 1 • Separación por medio de membranas selectivas 	Balance de masa Conducción Convección Difusión Flujo Diagramas de flujo Permeabilidad y selectividad
Ciencias básicas y complementarias	<ul style="list-style-type: none"> • Matemática 1 • Estadística 1 	Medidas de dispersión Pruebas de hipótesis Análisis de varianza Diseño factorial
Especialización	Ciencia de los materiales	Tratamientos termo-químicos

Fuente: elaboración propia.

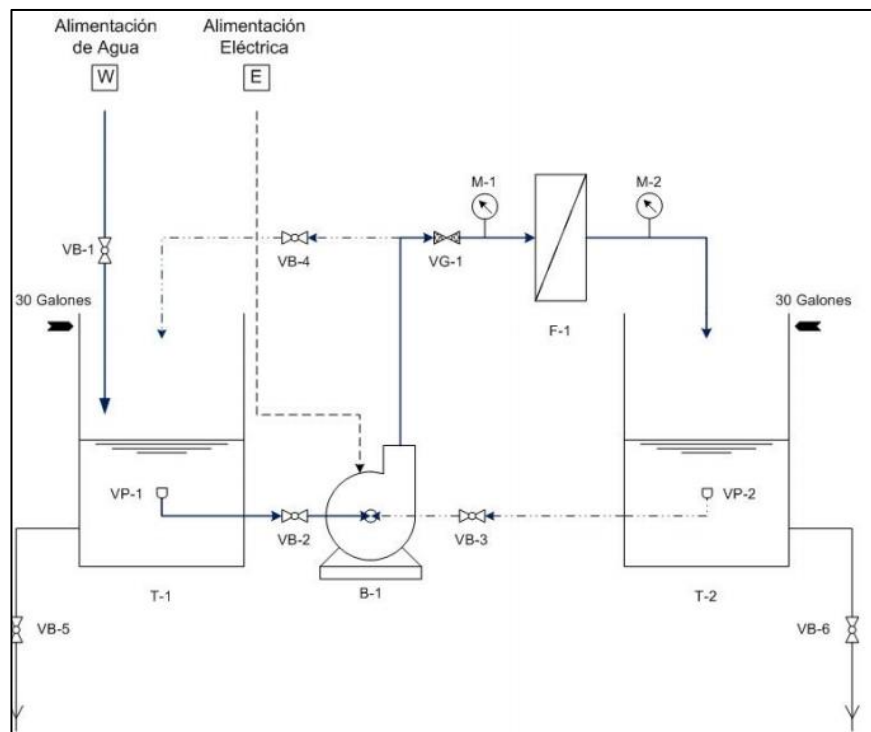
Apéndice 10. Diagrama de ishikawa y/o árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

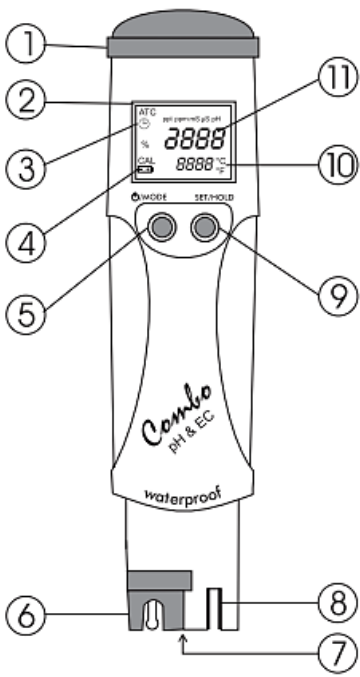
Anexo 1. Diagrama de referencia de la estación experimental



Fuente: ARANA VALENZUELA, Edgar Alejandro. *Instalación de estación experimental e implementación de práctica de laboratorio para el curso de Separación por Membranas Selectivas*. p. 55.

Anexo 2. Medidor de concentración de sales en agua Hanna HI 98129

DESCRIPCIÓN FUNCIONAL



ESPECIFICACIONES

Rango Temperatura:	0,0 a 60,0°C o 32,0 a 140,0°F
HI 98129	pH: 0,00 a 14,00 CE: 0 a 3999 µS/cm TDS: 0 a 2000 ppm
HI 98130	pH: 0,00 a 14,00 CE: 0,00 a 20,00 mS/cm TDS: 0,00 a 10,00 ppt
Resolución	0,1°C o 0,1°F
HI 98129	0,01 pH; 1 µS/cm; 1 ppm
HI 98130	0,01 pH; 0,01 mS/cm; 0,01 ppt
Precisión (@20°C/68°F)	Temperatura ±0,5°C o ±1°F CE/TDS ±2% f.e. pH ±0,01
Desviación EMC Típica	Temperatura ±0,5°C o ±1°F pH ±0,02 pH CE/TDS ±2% f.e.
Compensación Temp.	pH: Automática CE/TDS: con β=0,0 a 2,4%/°C
Entorno	0 a 50°C (32 a 122°F); HR 100%
Factor Conversión CE/TDS	0,45 a 1,00 (CONV)
Calibración	pH: a 1 o 2 puntos con 2 juegos de tampones memorizados (pH 4,01/7,01/10,01 o pH 4,01/6,86/9,18) CE/TDS: automática, a 1 punto
Soluciones de Calibración CE/TDS	
HI 98129	HI7031 (1413 µS/cm) HI7032 (1382 ppm; CONV=0,5) HI70442 (1500 ppm; CONV=0,7)
HI 98130	HI7030 (12,88 mS/cm) HI70038 (6,44 ppt; CONV=0,5 o 9,02 ppt; CONV=0,7)
Electrodo	HI 73127 electrodo de pH (incluido)
Pilas Tipo/Vida	4 x 1,5V con BEPS / normalmente 100 horas
Auto-desconexión	Tras 8 minutos
Dimensiones	163 x 40 x 26 mm
Peso	85 g

1. Compartimiento de las pilas
2. Pantalla de Cristal Líquido (VCL)
3. Indicador de Estabilidad
4. Indicador de Pila baja
5. Botón ON/OFF/MODO
6. **HI 73127** electrodo de pH
7. Sensor de Temperatura
8. Sonda CE/TDS
9. Botón CONFIGURAR/CONGELAR
10. Pantalla VCL Secundaria
11. Pantalla VCL Primaria

Recomendaciones a los Usuarios

Antes de utilizar estos productos, cerciúrese de que son totalmente apropiados para el entorno en el que van a ser utilizados. El funcionamiento de estos instrumentos en zonas residenciales podría causar interferencias inaceptables a equipos de radio y TV. La ampolla de cristal en el extremo del electrodo es sensible a descargas electrostáticas. Evite tocar esta ampolla de cristal en todo momento. Durante su funcionamiento, el operario deberá llevar muñequeras ESD para evitar posibles daños al electrodo por descargas electrostáticas. Toda modificación realizada en el equipo por el usuario puede degradar las características de EMC del mismo.

Para evitar descargas eléctricas, no use estos instrumentos cuando el voltaje en la superficie a medir sobrepase 24 VCA o 60 VCC.

Para evitar daños o quemaduras, nunca efectúe mediciones en hornos microondas.

Fuente: HANNA instruments®. *Manual de producto checker HI928129.*

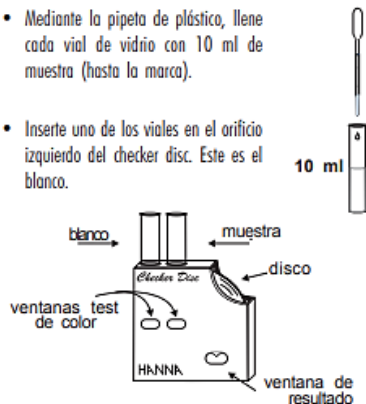
file:///C:/Windows/system32/config/systemprofile/Desktop/JAKELINE%20TARAX%20PEREZ/Ma
n_esp_HI98129_HI98130.pdf. Consulta: 23 de diciembre de 2019.

Anexo 3. Instrucciones de uso del medidor de concentración de hierro IRONMR TESTKIT H138040

INSTRUCCIONES

LEA LAS INSTRUCCIONES COMPLETAS ANTES DE USAR EL KIT

- Mediante la pipeta de plástico, llene cada vial de vidrio con 10 ml de muestra (hasta la marca).
- Inserte uno de los viales en el orificio izquierdo del checker disc. Este es el blanco.



- Añada al otro vial 1 paquete de reactivo HI 3834-0. Coloque la tapa y agítelo para mezclar.

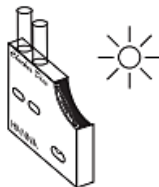


- Espere 3 minutos para permitir que ocurra la reacción. Esta es la muestra tratada.



- Quite la tapa e inserte la muestra tratada en el orificio derecho del checker disc.

- Sujete el checker disc de forma que una fuente de luz ilumine las muestras desde la parte posterior de las ventanas.



- Mantenga el checker disc a una distancia de 30-40 cm de los ojos para comparar el color con un fondo uniforme (p.ej.

un folio blanco). Haga girar el disco mientras mira a las ventanas de test de color y pare cuando encuentre el color coincidente. Lea el valor en la ventana de resultado directamente en mg/l (o ppm) de Hierro.



Para lograr los mejores resultados: Realice la lectura tres veces y coja el valor medio (divida entre 3 la suma de los tres números). Las muestras intensamente coloreadas dificultan la comparación de color y deberán ser tratadas adecuadamente antes de realizar el test. La materia suspendida en grandes cantidades deberá ser eliminada mediante filtrado previo.

Atención: La radiación ultravioleta puede hacer que los colores se ajen. Cuando no lo esté utilizando, mantenga el disco protegido de la luz, en un lugar seco y fresco.

Interferencias: Molibdato y Molibdeno superior a 50 ppm, calcio superior a 10000 ppm (como CaCO₃), magnesio superior a 100000 ppm, cloruro superior a 185000 ppm.

Fuente: HANNA instruments®. *Manual de producto checker HI38040.*

<http://www.blu.com.ve/archivos/userfiles/files/Manual%20Hanna%20para%20hierro%20total%20Orango%20medio.pdf>. Consulta: 23 de diciembre de 2019.