



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

**EVALUACIÓN DE OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE SEPARACIÓN
POR MICROFILTRACIÓN A PARTIR DE UNA MEMBRANA DE
TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET)**

Karen Lucrecia Hurtarte Pineda

Asesorado por el Ing. Ramón Benjamín Piedrasanta Batz

Guatemala, septiembre de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE SEPARACIÓN
POR MICROFILTRACIÓN A PARTIR DE UNA MEMBRANA DE
TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET)**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

KAREN LUCRECIA HURTARTE PINEDA

ASESORADO POR EL ING. RAMÓN BENJAMÍN PIEDRASANTA BATZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Víctor Herbert de León Morales
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
EXAMINADOR	Ing. Jaime Domingo Carranza González
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 DE OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE SEPARACIÓN POR MICROFILTRACIÓN A PARTIR DE UNA MEMBRANA DE TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET)

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 19 de noviembre de 2014


Karen Lucrecia Hurtarte Pineda

Guatemala julio de 2015

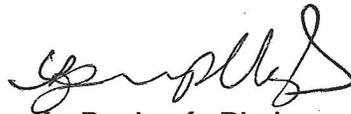
Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Ingeniero Monzón:

Por medio de la presente HAGO CONSTAR que he revisado y dado mi aprobación al trabajo de graduación titulado "EVALUACIÓN DE OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE SEPARACIÓN POR MICROFILTRACIÓN A PARTIR DE UNA MEMBRANA DE TEREFALATO DE POLIETILENO (PET)", de la estudiante de Ingeniería Química Karen Lucrecia Hurtarte Pineda quien se identifica con el carné número 2006-11264.

Sin otro particular, me suscribo a usted.

Atentamente,



Ing. Qco. Ramón Benjamín Piedrasanta Batz

Colegiado No. 715

ASESOR

Ing. Qco. Ramón Benjamín
Piedrasanta Batz
Colegiado No. 715



Guatemala, 12 de agosto de 2015.
Ref. EIQ.TG-IF.049.2015.

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **100-2014** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por la estudiante universitaria: **Karen Lucrecia Hurtarte Pineda**.
Identificada con número de carné: **2006-11264**.
Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.

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 DE OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE SEPARACIÓN POR MICROFILTRACIÓN A PARTIR DE UNA MEMBRANA DE TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET)

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Ramón Benjamín Piedrasanta Batz**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.139.2015

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante, **KAREN LUCRECIA HURTARTE PINEDA** titulado: **"EVALUACIÓN DE OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE SEPARACIÓN POR MICROFILTRACIÓN A PARTIR DE UNA MEMBRANA DE TEREFALATO DE POLIETILENO (PET)"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, septiembre 2015

Cc: Archivo
VMMV/ale



El Decano 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 DE OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE SEPARACIÓN POR MICROFILTRACIÓN A PARTIR DE UNA MEMBRANA DE TERÉFTALATO DE POLIETILENO (PET)**, presentado por la estudiante universitaria: **Karen Lucrecia Hurtarte Pineda**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
DECANO



Guatemala, septiembre de 2015

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por darme la oportunidad de vivir, ser la luz y guía en el andar de mí camino, sobre todo, brindarme múltiples bendiciones a lo largo de mi vida.
- Mis padres** Otto Hurtarte y Ana Lucrecia Pineda, por darme una carrera para mi futuro, su apoyo y esfuerzo.
- Mis hermanos** Emanuel y Francisco Hurtarte, por hacerme la vida más amena con su compañía.
- Mi familia** Especialmente a mi abuela Amparo Castellanos, porque con su espíritu luchador es mi ejemplo de vida.
- Mi novio** Alejandro Velásquez, por toda su comprensión a lo largo de la realización de este trabajo de graduación.
- Mis amigos** Por su compañía a lo largo de mi carrera, especialmente a todos aquellos que me motivaron a seguir adelante.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por su amor y fidelidad, a pesar de mis imperfecciones.
Mi familia	Por su amor, comprensión, consejos y darme el soporte para lograr esta meta.
Mis amigos	Por su influencia positiva en mi vida. Dios sabe a quien nos pone en el camino de la vida.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme las puertas hacia el conocimiento de la ingeniería, especialmente a la Escuela de Ingeniería Química, la cual me entregó las herramientas para ser una mujer profesional y de esta forma contribuir a la sociedad.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Alma máter, por brindarme la oportunidad de estudiar en una universidad estatal.

2.4.	Polímeros	15
2.4.1.	Estructura de los polímeros.....	15
2.4.1.1.	Estructura química	15
2.4.1.1.1.	Tipos de átomos en la cadena principal y sus sustituyentes	16
2.4.1.1.2.	Peso molecular y estado físico	16
2.4.1.1.3.	Uniones entre átomos ...	17
2.4.1.2.	Estructura física.....	17
2.4.1.2.1.	Estado amorfo y cristalino	18
2.4.1.2.2.	Temperatura de transición vítrea y temperatura de fusión ...	19
2.4.1.2.3.	Calor de fusión	21
2.4.2.	Análisis térmico	21
2.4.2.1.	Comportamiento del proceso según la cristalinidad del polímero	22
2.5.	Polietileno tereftalato (PET)	22
2.6.	Sinterización.....	27
2.7.	Preparación de membranas por sinterización	28
2.8.	Técnicas de caracterización de membranas	28
2.9.	Módulos de membrana.....	30
2.9.1.	Módulos de plato y marco	31
2.9.2.	Módulos tubulares	33
2.9.3.	Módulos enrollados en espiral.....	34
2.9.4.	Módulos de fibras huecas.....	35
2.10.	Valoraciones para membranas	38

2.11.	Energía radiante	39
2.11.1.	Transmitancia	40
2.11.2.	Absorbancia.....	40
2.12.	Espectrofotometría	41
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	43
3.1.	Variables.....	43
3.1.1.	Variables de control	43
3.1.2.	Variables independientes	45
3.1.3.	Variables dependientes	45
3.2.	Delimitación de campo de estudio.....	46
3.2.1.	Campo de estudio.....	46
3.2.2.	Material de estudio	46
3.2.3.	Procesos que conforman la investigación	46
3.2.4.	Selección de tamaño y muestra.....	47
3.2.5.	Unidad de análisis y observación	47
3.2.6.	Material que conforma la membrana selectiva	48
3.2.7.	Material que conforma el módulo propuesto.....	48
3.2.8.	Material de control de la investigación.....	48
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	48
3.4.	Recurso material disponible	49
3.4.1.	Recursos físicos disponibles.....	49
3.4.2.	Recursos materiales disponibles	51
3.4.2.1.	Materia prima.....	51
3.4.2.2.	Materiales y equipo.....	51
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa	52
3.6.	Proceso de preparación previa de PET al método de sinterización.....	53
3.6.1.	Descripción de los procesos físicos.....	53

3.7.	Proceso de pruebas preliminares de sinterización	58
3.8.	Sinterización de un juego de membranas de tereftalato de polietileno (PET).....	58
3.9.	Análisis experimental	63
3.10.	Recolección de la información	68
3.11.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	70
3.11.1.	Tamaño del muestreo	71
3.11.2.	Tabulación y ordenamiento de los datos.....	71
3.11.3.	Procesamiento de la información	73
3.12.	Análisis estadístico.....	74
3.12.1.	Medidas de dispersión	74
3.12.2.	Análisis correlacional y regresión	74
4.	RESULTADOS.....	77
4.1.	Sinterización de un juego de membranas de PET reciclado para MF.....	77
4.2.	Diseño e instalación de un módulo para membrana de PET ...	78
4.3.	Cuantificación del flujo, porcentaje de recuperación y retención	81
4.4.	Modelo matemático del proceso de microfiltración	82
4.5.	Curvas de operación de membrana de PET reciclado para MF	84
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	89
	CONCLUSIONES.....	93
	RECOMENDACIONES	95
	BIBLIOGRAFÍA.....	97

APÉNDICES	101
ANEXOS.....	121

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Principales polímeros sintéticos utilizados	13
2.	Estado cristalino y amorfo	18
3.	Volumen específico de polímeros	20
4.	Monómero de PET	23
5.	Reacción de síntesis del PET	24
6.	Primer módulos de plato y marco.....	32
7.	Esquema módulo de plato y marco	32
8.	Módulos tubulares	33
9.	Módulos enrollados en espiral.....	34
10.	Módulos de fibras huecas	35
11.	Módulos enrollados en espiral vista transversal.....	37
12.	Bandejas con PET en secador.....	54
13.	Vista interior de molino de martillos.....	55
14.	Descarga de material de molienda.....	56
15.	Tamiz utilizado en análisis granulométrico por tamizaje de PET	56
16.	Diagrama de proceso de preparación previa de PET	57
17.	Molde utilizado para la sinterización de cada membrana.....	60
18.	Membrana resultado de la sinterización.....	60
19.	Juego de nueve membranas para microfiltración de PET.....	61
20.	Diagrama de proceso de sinterización	62
21.	Árbol de variables	64
22.	Diagrama de estación experimental.....	65
23.	Proceso de análisis experimental.....	67

24.	Equipo de medición de hierro	68
25.	Juego de membranas sinterizadas	77
26.	Módulo de membrana de tereftalato de polietileno	78
27.	Interior de módulo para membrana de PET	78
28.	Esquema vista frontal de módulo.....	79
29.	Esquema vista isométrica de módulo	79
30.	Módulo instalado en la estación experimental	80
31.	Gráfica de dispersión a 2 ppm	82
32.	Gráfica de dispersión a 3,5 ppm	82
33.	Gráfica de dispersión a 5 ppm	83
34.	Curva de retención a concentración teórica de 2 ppm.....	84
35.	Curva de retención a concentración teórica de 3,5 ppm.....	84
36.	Curva de retención a concentración teórica de 5 ppm.....	85
37.	Curva de recuperación a concentración teórica 2 ppm.....	85
38.	Curva de recuperación a concentración teórica 3,5 ppm.....	86
39.	Curva de recuperación a concentración teórica 5 ppm.....	86
40.	Comparación de curvas de operación 1	87
41.	Comparación de curvas de operación 2	87

TABLAS

I.	Procesos de separación por membranas	4
II.	Comparación de los cuatro procesos de membranas.....	6
III.	Clasificación de las membranas en base a varios criterios.....	14
IV.	Estado físico de polímeros.....	17
V.	Temperatura de transición vítrea y fusión.....	20
VI.	Datos técnicos de tereftalato de polietileno (PET)	26
VII.	Definición variables de control preparación de PET	43
VIII.	Definición de las variables de control sinterización.....	44

IX.	Definición de las variables de control de operación	44
X.	Definición operacional de variables independientes	45
XI.	Definición operacional de las variables dependientes.....	45
XII.	Instrumentos en técnica cuantitativa	53
XIII.	Rendimiento de análisis granulométrico.....	57
XIV.	Simbología del diagrama de equipo	66
XV.	Datos utilizados en la preparación de material PTFE.....	72
XVI.	Recolección de datos experimentales.....	72
XVII.	Cálculos realizados en la práctica.....	73
XVIII.	Listado de derecha a izquierda de las partes del módulo	80
XIX.	Resultados	81
XX.	Modelos de saturación	83

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A_m	Área de membrana en metros cuadrados
Q_a	Caudal de alimentación
Q_p	Caudal en el permeado
$[Fe]_p$	Concentración de hierro en permeado de membrana en partes por millón.
$[Fe]_{ra}$	Concentración de hierro real en alimentación a membrana en partes por millón.
$P_{rechazo}$	Porcentaje de rechazo en la membrana
$P_{recuperación}$	Porcentaje de recuperación en la membrana
PTM	Presión transmembrana
R_t	Retención en la membrana
t	Tiempo en segundos
ppm	Unidad de concentración en partes por millón
v	Velocidad de flujo en metros por segundo
V	Volumen en metros cúbicos

GLOSARIO

Barrera Semipermeable	Superficie de separación entre dos compuestos líquidos o gaseosos, que según la naturaleza química de las moléculas adyacentes permite el paso selectivo de algunos compuestos, pero otros no.
Cloruro de sodio	Compuesto iónico formado por un catión sodio (Na^+) y un anión cloro (Cl^-), siendo su fórmula química NaCl . Es el mayor componente de la sal comestible.
Cristalización	Proceso en el cual los iones, átomos o compuestos establecen enlaces de manera natural hasta formar un retículo repetitivo denominado cristal.
Difusión molecular	Proceso físico irreversible, en el que las partículas se introducen en un medio en el cual estaban ausentes, aumentando la entropía del sistema.
Espectrofotometría	Método de análisis óptico en el cual se mide la cantidad de energía radiante que es transmitida o absorbida.

Fouling

Acumulación de material indeseado en las superficies de las membranas y que disminuye su funcionalidad.

Hidróxido de sodio

La fórmula química del hidróxido de sodio es NaOH, es una base química también conocida por su nombre comercial como sosa cáustica o soda cáustica. Su apariencia a temperatura ambiente es sólido y blanco.

Membrana

En procesos de separación, es una barrera semipermeable que permite el paso selectivo de algunas especies, estos se realiza bajo la acción de una fuerza motriz.

Mesh

Barrera hecha por hebras conectadas de metal, fibras u otros materiales flexibles. Puede ser utilizado para separar sólidos de diferentes tamaños.

Microfiltración

Proceso de separación física conducido por presión que se utiliza para la separación de partículas con un tamaño comprendido entre 0,05 y 10 μm .

Módulos de Membrana

Aparato especialmente concebido para colocar grandes cantidades de área de membranas que serán utilizadas en un proceso de separación por membranas.

Monómero	Molécula de pequeña masa molecular, que por medio de enlaces químicos, generalmente covalentes, puede formar macromoléculas llamadas polímeros.
Nanofiltración	Proceso de separación en el cual se hace pasar un fluido a través de una membrana semipermeable. El tamaño del poro está comprendido entre 0,005 y 0,0005 μm .
Onda Electromagnética	Perturbación simultánea de los campos eléctricos y magnéticos en una misma región.
Ósmosis	Proceso físico relacionado con el movimiento de solvente a través de una membrana semipermeable por medio de una difusión simple, sin gasto de energía.
Ósmosis inversa	Proceso de separación física conducido por presión y un mecanismo de difusión. El tamaño del poro es menor a 0,0005 μm .
Polimerización	Proceso químico de reacciones en cadena en el que los monómeros se agrupan químicamente entre sí, dando lugar a una macromolécula.
Polímero	Macromoléculas de cadenas de diversas configuraciones formadas por la unión de varias moléculas más pequeñas llamadas monómeros.

Porosidad	Medida de la fracción del volumen de espacios vacíos sobre el volumen total de un material.
Punto de fusión	Temperatura en la cual una materia se encuentra en equilibrio de fases sólido-líquido .
PVC	Policloruro de vinilo (PVC) es un polímero que resulta de la polimerización por adición del cloruro de vinilo o cloroetano.
Recuperación	Conversión del caudal de aportación que llega a la membrana al caudal de permeado.
Tamizar	Método físico en el cual se separan mezclas de sólidos de diferentes tamaños por un <i>mesh</i> .
Temperatura	Magnitud escalar relacionada con la energía interna conocida como energía cinética.
Tereftalato de polietileno	Polímero perteneciente al grupo de los poliésteres, se obtiene de la policondensación del ácido tereftálico y etilenglicol. Es muy usado en envases de bebidas y en textiles.
Termoestables	Polímero que es infusible e insoluble. El comportamiento se debe a que sus cadenas forman una red tridimensional espacial con enlaces covalentes.

Termoplásticos

Polímero que a temperaturas relativamente altas se vuelve deformable. Al disminuir la temperatura se endurece en un estado de transición vítrea.

Sulfato de aluminio

También llamado sulfato alumínico, es una sal con fórmula $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. A temperatura ambiente es sólido y de color blanco. Es ampliamente usado en la industria como coagulante.

Sulfato ferroso

Sulfato de hierro (II) con fórmula FeSO_4 , es una sal de color azul verdoso, generalmente se encuentra en su forma heptahidratada. A temperatura ambiente no es soluble en el agua.

Ultrafiltración

Proceso de separación en el cual la presión hidrostática fuerza al fluido a pasar por la membrana. Se encuentra en el rango de los 2 a 100 nm.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación muestra los resultados para determinar la capacidad de retención y el comportamiento de la separación en la membrana de tereftalato de polietileno (PET) reciclado para microfiltración. Para ello es necesario realizar pruebas en las condiciones de operación de un sistema de separación con dicha membrana. Por lo cual se propone el diseño de un módulo que sea apto de soporte para dicha membrana y adaptable a la estación experimental que se encuentra ubicada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Se escogió como analito sulfato ferroso heptahidratado (FeSO_4), por su fácil análisis. Además, se utilizó sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) como aglutinante para que dicha solución fuera apta al análisis, esto implica tener el tamaño de partícula en el rango de la microfiltración.

Utilizando el módulo de membrana propuesto se variaron tres veces la concentración inicial de la solución, especialmente apta para el análisis, para luego cambiar tres veces los caudales de operación, variando la abertura de la válvula de globo. Con estas variaciones se obtuvieron los datos experimentales de concentración de permeado y, caudal en alimentación y permesado. Estos permitieron el análisis de la retención, porcentaje de retención y el flujo a través de la membrana de PET fabricada.

OBJETIVOS

General

Diseñar e instalar un módulo que contenga una membrana de tereftalato de polietileno (PET) para microfiltración, sea adaptable a la estación experimental para evaluación de membranas del Laboratorio de Operaciones Unitarias, con lo cual se puedan realizar pruebas que determinen el comportamiento de la separación con dicha membrana.

Específicos

1. Sinterizar un juego de membranas para microfiltración a partir de tereftalato de polietileno (PET) reciclado por medio del método de sinterización.
2. Diseñar e instalar un módulo para membrana de tereftalato de polietileno (PET) reciclado para microfiltración.
3. Cuantificar la retención, el flujo y la recuperación con una solución diseñada para el efecto en las membranas de tereftalato de polietileno (PET) reciclado para microfiltración.
4. Modelar matemáticamente el proceso de microfiltración con una solución diseñada para tal efecto.

5. Generar las curvas de operación con una solución diseñada para el efecto de las membranas de tereftalato de polietileno (PET) reciclado para microfiltración.

Hipótesis

Es posible cuantificar experimentalmente y determinar el comportamiento del proceso de separación y flujo en una membrana para microfiltración fabricada a partir de PET reciclado, utilizando el método de sinterización, y soportándola con un módulo diseñado con las características que sea intercambiable y se adapte a la estación experimental del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería, Usac.

Hipótesis nula:

No existe diferencia significativa en las concentraciones, presiones y el flujo antes y después del proceso de separación en una membrana para microfiltración fabricada a partir de PET reciclado, utilizando el método de sinterización, y usando el módulo propuesto para brindarle soporte.

Hipótesis alternativa:

Existe diferencia significativa en las concentraciones, presiones y el flujo antes y después del proceso de separación en una membrana para microfiltración fabricada a partir de PET reciclado, utilizando el método de sinterización, y usando el módulo propuesto para brindarle soporte.

INTRODUCCIÓN

Una membrana es una barrera que actúa en forma pasiva o activa para restringir el paso selectivamente a través de ella de determinadas especies, esto se realiza bajo la acción de un gradiente o fuerza motriz.

Los estudios sistemáticos de los fenómenos de membrana se pueden remontar al siglo XVIII. Sin embargo, para la década de 1960, las membranas solo eran usadas por algunos laboratorios. El descubrimiento del proceso de Loeb-Sourirajan en 1960 llevó a las membranas a ser usadas a nivel industrial. Aun así, las membranas seguían teniendo problemas de selectividad, productividad/costo y operacionales. Estos problemas siguen siendo la atención de las investigaciones en la actualidad.

Las membranas poseen numerosas ventajas con respecto a los métodos típicos de separación de mezclas. Por esta razón representan una tecnología emergente que requiere de estudios para su desarrollo. Solo el nivel actual de apoyo a la investigación relacionada con esta tecnología del Gobierno de los EE.UU. es del orden de \$11 millones al año. Es así como el mercado de membranas sintéticas crece. Por ejemplo, solo el mercado global de productos de membrana para microfiltración representó \$1,6 mil millones para el 2013.

Las membranas poliméricas constituyen el campo más amplio debido a la versatilidad de sus aplicaciones. La razón por la cual los polímeros tienen una extensa utilidad, se debe a que existe la posibilidad de ejercer cierto control sobre las configuraciones moleculares de los polímeros.

Para mejorar la separación por medio de membranas se utilizan empaquetamientos de membranas, los cuales permiten contener mayor área de la membrana en un menor volumen. Estos empaquetamientos permiten usar la separación por medio de membranas a nivel industrial y se les llama módulos de membrana. El más sencillo de todos es el módulo de plato y marco.

Actualmente se siguen buscando medios de separación por membranas aplicables a la industria que sean fáciles de implementar, menos costosos, tolerante a variaciones químicas y de temperatura, resistentes al ensuciamiento y amigables con el medio ambiente. Añadido a esto, con la creciente demanda de polímeros, se busca métodos de reutilización de los mismos. Las membranas poliméricas para microfiltración pueden ser fabricadas por el método de sinterización. Este consiste en someter partículas muy finas del material a temperaturas cercanas a su punto de fusión, lo cual forma enlaces entre dos partículas debido a la transferencia de materia desde una zona hacia otra. Como resultado se obtiene un material poroso compactado denso.

En Guatemala existe muy poca investigación de los procesos de separación por medio de membranas selectivas. Además, el reciclaje y reutilización del PET es muy viable. Partiendo de las tendencias actuales se ha ideado la preparación de una membrana para microfiltración a partir de tereftalato de polietileno (PET) reciclado por medio del método de sinterización; ya que un análisis de porosidad no es suficiente para determinar el comportamiento de la operación de separación. Se espera que con ella se puedan realizar pruebas de retención, recuperación y flujo; de esta manera se procede con la fabricación de un módulo para membrana de PET reciclado.

1. ANTECEDENTES

El desarrollo en el campo de los polímeros ha sido espectacular. En la actualidad se comprende aún más como está relacionada la estructura de estos con sus propiedades químicas. Además se conocen más métodos de sintetización para producir estructuras mejor adaptadas a aplicaciones específicas.

Durante el período de 1939 a 1941, los científicos británicos Whinfield y Dickson estudiaron los poliésteres termoplásticos. En 1941, produjeron por primera vez el polietileno tereftalato (PET) y lo patentaron como un polímero para la fabricación de fibras. La aplicación que lo llevó a su mayor auge en el mercado fue en el área de envasado de bebidas, la cual se empezó a realizar en 1976.

Los procesos de separación son las operaciones más comunes en la industria. Diversos métodos de preparación y las técnicas de separación por medio de membranas han pasado a ser una simple herramienta de laboratorio a ser una técnica de separación industrial con gran técnica e impacto comercial.

A principios de la década de los sesenta, el experimento de Loeb-Sourirajan de membranas para ósmosis inversa, transformó la aplicación de las membranas de laboratorio a escala industrial. La comercialización de estas membranas produjo que se desarrollarán más investigaciones en el campo de la microfiltración y ultrafiltración. La rápida utilización de las membranas a nivel industrial se produjo debido al desarrollo de los materiales, estructura y producción a gran escala de membranas.

La tesis de pregrado: *Separación de propano y propileno por medio de la membrana de poli(óxido de etileno-co-epiclorhidrina) facilitada por ión plata*, fue presentada en Usac, en 2011, por Wendy Susana García Vásquez. Se estudió la forma de construcción de la membrana y las características finales de esta, tal como las propiedades de permeación a 25 y 35 °C. También se determinó la eficacia y eficiencia del transporte.

En 2013, Edgar Alejandro Arana Valenzuela presentó la tesis *Instalación de estación experimental e implementación de práctica de laboratorio para el curso de separación por membranas selectivas*. La metodología a través de la práctica experimental permitió la evaluación de una membrana para microfiltración, y conocer el funcionamiento del equipo por medio de la determinación de parámetros como la retención, la saturación de las membranas, el porcentaje de recuperación, elaborar curvas de operación y modelar matemáticamente el proceso.

El trabajo de graduación: *Preparación de una membrana polimérica a partir de polietileno tereftalato (PET) a diferentes tiempos y temperaturas de sinterización*, realizada en los años 2013-2014, por Ana Gloria Montes Peña. El objetivo del trabajo es determinar el tiempo y temperatura óptimo para producir una membrana de polietileno tereftalato (PET) reciclado con las mejores características de tamaño y distribución de poro adecuadas para la microfiltración. El método utilizado para la preparación de las membranas es el de sinterización con un agente formador de poros.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Conceptos principales de membranas

En general, la definición de una membrana se puede enunciar convenientemente como una “barrera semipermeable activa o pasiva, que bajo la acción de determinada fuerza, permite el paso preferencial de una o más especies o compuestos seleccionados (moléculas, partículas o polímeros) de una mezcla o solución gaseosa o/y líquida”¹.

A las especies rechazadas por la membrana se les llama retentato, mientras que las especies que traspasan la membrana se les llama permeado o simplemente disolvente.

El rendimiento de la separación de componentes por medio de membranas está descrito por dos parámetros: permselectividad y permeabilidad. La permeabilidad es un indicador de la capacidad de la membrana para procesar el permeado, una alta permeabilidad representa un alto rendimiento. Sin embargo, esto no determina que el proceso sea económicamente viable. Para ello es necesario que la permselectividad también sea alta. La permselectividad es la medida de la capacidad de la membrana para separar el permeado del retentato. Por esta razón, una membrana con una alta permselectividad, pero una baja permeabilidad puede requerir una gran área de transferencia de la membrana, por lo cual se convierte poco atractivo.

¹ HSIEH, H.P. *Inorganic membranes for separation and reaction*. Membrane science and Technology. p. 1.

2.2. Procesos de separación con membranas

Son el grupo de tecnologías basadas en el transporte selectivo de uno o más componentes de una mezcla semipermeable a través de una membrana. Debido a este mecanismo de operación presentan un perfil único de ventajas.

El principio básico de cualquier proceso de separación es, que se requiere de cierta cantidad de energía para lograr la separación. Existen diferentes tipos de separación y cada uno de ellos necesita diferentes cantidades de energía. En la separación por membranas se aprovechan diversos mecanismos de transporte asociados a propiedades físicoquímicas de los compuestos a separar tales como dimensión molecular, solubilidad y afinidad química.

Tabla I. **Procesos de separación por membranas**

Proceso	Fuerza motora	Rango de tamaño	Permeado típico	Retentato típico
Microfiltración	Diferencia de presión, 10 psi	0.05-50 μm	Agua y especies disueltas	Materiales suspendidos
Ultrafiltración	Diferencia de presión, 10-100 psi	2 -100nm	Agua y sales	Biológicos, coloides y macromoléculas
Separación de gas	Diferencia de presión, 1-100 atm	0.005-0.0005 μm	Gases y vapores	Gases y vapores
Ósmosis inversa	Diferencia de presión, 100-800 psi	< 0.0005 μm	Agua	Materiales suspendidos
Electrodialisis	Voltaje		Iones	Especies no iónicas y macromoléculas.

Fuente: HSIEN, H. P. *Inorganic membrane for separation and reaction*. Membrane science and technology. p. 3.

2.2.1. Procesos de separación conducidos por presión

Los procesos de separación con membranas más utilizados son los que tienen como fuerza impulsora una diferencia de presión. La principal diferencia entre estos procesos es el tamaño de poro, lo cual tiene como consecuencia el tipo de partícula separada por la membrana. Las tecnologías en filtración por membranas a partir de una diferencia de presión son:

- **Microfiltración:** las partículas de mayor tamaño que los poros son retenidas totalmente. Se trabaja a presiones bajas para filtrar las partículas en suspensión, bacterias y coloides. La partícula retenida debe tener un tamaño entre 0,05 y 10 μm . El rango de presión de trabajo es de 0,5 a 3 bar. Generalmente, las membranas empleadas son de tipo poroso. Entre las aplicaciones frecuentes se encuentra la separación de células de extractos fermentados, clarificación de jarabes y recuperación de químicos de lavado.
- **Ultrafiltración:** se pueden utilizar tanto para concentrar como para purificar compuestos de alto y mediano peso molecular como proteínas lácteas, carbohidratos y enzimas. Por lo que las moléculas deben estar comprendidas entre un tamaño de 0,005 y 0,0005 μm . Las presiones de trabajo abarcan de 1 a 10 bar. Entre las aplicaciones más representativas están la eliminación de pesticidas en aguas subterráneas, metales pesados en aguas residuales y ablandamiento de agua.
- **Nanofiltración:** está diseñada para conseguir separaciones de partículas de bajo peso molecular como azúcares, minerales disueltos y sales. También retiene iones multivalentes como el calcio. El tamaño del poro está comprendido entre 2 a 100 nm. Entre las aplicaciones típicas se

pueden mencionar la de-salinización de productos lácteos, ablandamiento del agua, eliminación de nitratos, concentración-separación de azúcares, eliminación de metales pesados en aguas residuales y la recuperación de proteínas hidrolizadas.

- Ósmosis inversa: es un proceso que se lleva a cabo a altas presiones; altamente eficiente para retener compuestos de bajo peso molecular. Para producir la separación se utiliza un tamaño de poro menor a 0,0005 μm , y el rango de presión se haya entre 10 y 100 bares. Entre las aplicaciones se encuentran: la pre concentración de lácteos o de alimentos líquidos previo a una evaporación, desalinización de agua de mar, tratamiento de aguas residuales, producción de agua ultrapura y pulido del condensado de evaporador.

Tabla II. **Comparación de los cuatro procesos de membranas**

	Osmosis Inversa	Nanofiltración	Ultrafiltración	Microfiltración
Membrana	Asimétrica	Asimétrica	Asimétrica	Simétrica/ asimétrica
Tamaño de poro	<0.002 μm	<0.002 μm	0.2-0.02 μm	4-0.02 μm
Material de Membrana	Capa delgada	Capa delgada	Capa delgada	
Módulo de membrana	Tubulares espirales plato y marco	Tubulares espirales plato y marco	Tubulares fibras espirales plato y marco	Tubulares espirales plato y marco
Presión de operación	15-150 bar	5-35 bar	1-10 bar	<2 bar

Fuente: WAGNER, Jorgen. *Membrane filtration handbook. Practical tips and hints.* p. 7.

2.2.2. Ventajas de la separación por membranas

Los procesos de separación de membranas operan mediante un mecanismo diferente a otros métodos de separación, por lo que se puede listar diferentes ventajas en comparación con los procesos de separación convencionales. En general, las principales ventajas de estos son:

- Tienen a ser bajos consumidores de energía, por lo que también tienden a ser de menor costo.
- La separación se realiza de manera continua.
- Se pueden combinar fácilmente con otros procesos de separación (procesos híbridos).
- Tienen una amplia versatilidad, ya que las propiedades de las membranas son variadas y pueden ser ajustadas para cada aplicación.
- Producen menor cantidad de subproductos no deseables, ya que no requieren de aditivos.
- El escalado del proceso es sencillo.

Debido a las ventajas antes mencionadas, los procesos de separación con membranas se utilizan cada vez más en la industria. Aunque tienen como inconveniente los problemas de saturación de la membrana.

2.2.3. Materiales para membranas

La tecnología de membranas ha evolucionado con respecto al material utilizado para la fabricación de la misma. Actualmente, pueden ser fabricadas de extensa variedad de materiales que se adecúan a diferentes aplicaciones. Se utilizan tanto materiales orgánicos como inorgánicos.

“Los materiales más importantes para la fabricación de membranas son los orgánicos, es decir polímeros o macromoléculas”². Básicamente, todos los polímeros pueden ser utilizados como materiales de membranas, pero las propiedades pueden diferir tanto que solo un número limitado será usado en dichos procesos.

La elección de un polímero para la fabricación de una membrana no se realiza de forma arbitraria, para ello se debe basar en las propiedades de fisicoquímicas originadas de factores estructurales.

2.3. Clasificación de las membranas

Una membrana puede ser gruesa o delgada, su estructura puede ser homogénea o heterogénea, el transporte puede ser activo o pasivo. El transporte pasivo puede ser impulsado por una presión, concentración o una diferencia de temperatura. Por esta misma razón, las membranas pueden ser clasificadas bajo diferentes criterios. Dependiendo de su origen se les puede clasificar en biológicas y sintéticas.

2.3.1. Membranas biológicas

Son esenciales para la vida y son todas aquellas que forman parte de los seres vivos. Constituyen fronteras que permiten separar y comunicar por medio del transporte de nutrientes al interior. “Estas membranas difieren fundamentalmente en estructura y funcionalidad de las membranas orgánicas e inorgánicas.”³

² MULDER, Marcel. *Basic principles of membrane technology*. p. 22.

³ *Ibíd.*

2.3.2. Membranas sintéticas

Actualmente existe una gran variedad de membranas sintéticas, las cuales a través de investigaciones y mejoramiento en las técnicas utilizadas en su fabricación han ido evolucionando. La extensa diversidad de membranas sintéticas puede clasificarse en cuatro grandes grupos, de acuerdo a su composición (material usado para fabricarla), función, estructura y forma.

Según su composición, las membranas sintéticas se pueden clasificar en inorgánicas, orgánicas o poliméricas y mixtas.

2.3.2.1. Membranas inorgánicas

En general, las membranas inorgánicas se caracterizan por poseer una gran estabilidad térmica, química y mecánica. Pueden fabricarse de metales, vidrio y cerámicas.

El uso de membranas inorgánicas a nivel industrial es limitado debido a su fragilidad y a su relación superficie/volumen. Además que, económicamente no son rentables por su alto costo.

2.3.2.1.1. Membranas metálicas

El método más común para preparar membranas metálicas es por medio de sinterización de polvos como molibdeno, wolfrano, níquel, hierro, aluminio, plata, cobre, entre otros. Sin embargo, también se pueden fabricar membranas de aluminio o silicio a través de *track-etched*, bombardeando ambos lados de la lámina. Estas membranas se producen tanto en láminas planas como en módulos en espiral.

2.3.2.1.2. Membranas cerámicas

El interés en las cerámicas como material para la fabricación de membranas ha crecido debido al gran campo de aplicación, es por esta razón que son las más desarrolladas entre las membranas inorgánicas.

Se fabrican formando óxidos, nitruros y carburos por medio de la combinación de un metal (generalmente aluminio, titanio y zirconio) con un no metal. De todas ellas, las más utilizadas son las de óxidos de aluminio y zirconio. Los métodos de fabricación de estas membranas cerámicas son muy diversos: sinterizado, procesos de deshidratación de geles, anodizado sobre una capa de metal, entre otros.

El gran campo de aplicación de las membranas cerámicas se debe a sus propiedades químicas. Son capaces de soportar temperaturas de hasta 800 °C, lo cual supera a las orgánicas que resisten hasta 300 °C. En el caso de la filtración de líquidos, este rango de temperaturas permite aumentar la solubilidad de la alimentación pudiendo trabajar a mayores concentraciones y viscosidades.

2.3.2.1.3. Membranas de vidrio

Se preparan a partir de óxidos de silicio, y las propiedades que las diferencian unas de otras se encuentran en función del aditivo añadido en su fabricación. Entre los aditivos añadidos podemos encontrar boro, fósforo y sodio. Se pueden obtener por medio de dos métodos: por medio de prensado, en donde las partículas de polvo son sinterizadas como consecuencia de la presión ejercida, o como separación térmica de una fase vítrea homogénea en otras dos fases y posterior tratamiento de cada una de ellas.

Las membranas metálicas o de vidrio, pueden soportar temperaturas superiores a 1000 °C, propiedad fundamental en su principal aplicación: la separación de gases o la catálisis de reacciones gaseosas a altas temperaturas.

2.3.2.2. Membranas poliméricas

A pesar de que los polímeros utilizados para la preparación de membranas poliméricas son limitados, estas constituyen el campo más amplio y avanzado de los procesos de membrana debido a la fácil versatilidad que poseen estos. Es así como las primeras membranas poliméricas se prepararon a partir de celulosa y actualmente se pueden encontrar membranas de polímeros como politetra fluoroetileno, poliamidas modificadas, polisulfonas, y otros con estructuras más complejas.

Las propiedades de una membrana polimérica dependen, fundamentalmente de dos factores: la naturaleza físicoquímica del polímero, que establece las posibles interacciones con los compuestos a separar, y el método de obtención (síntesis) de la misma que determina su estructura.

De acuerdo a su estructura, las membranas poliméricas pueden ser porosas o densas. Las membranas porosas presentan un arreglo ordenado de poros en el rango de 0,1-10 μm para microfiltración y 2-100 nm para ultrafiltración. Las dimensiones de los poros determinan la selectividad de la membrana mientras que las características del polímero afectan a la adsorción sea física o química, y la estabilidad (química, mecánica y térmica) de la membrana. La selección del material se basa especialmente en las propiedades químicas y térmicas de este.

En el caso de las membranas porosas existen varias técnicas de preparación de membranas de microfiltración, entre ellas la sinterización, *stretching*, *track-etching* e inversión de fase. Estas no son utilizadas para membranas de ultrafiltración, ya que el tamaño de poro no se encuentra en este rango, excepto en el caso de la inversión de fase.

Los materiales hidrofóbicos son muy utilizados en la preparación de membranas para microfiltración. Entre ellos se pueden mencionar: politetrafluoroetileno (PTFE), poli (fluoruro de vinilideno) (PVDF) y polipropileno isotáctico (PP). Las membranas para microfiltración de PTFE deben de ser preparadas por sinterización o *stretching*.

Debido a la naturaleza hidrofóbica del PTFE, las membranas de este material no se pueden humedecer instantáneamente con el contacto con agua o cualquier otro líquido con tensión superficial alta.

Las membranas de ultrafiltración, también pueden ser porosas. La mayoría de las membranas de ultrafiltración son fabricadas por técnicas como la inversión de fase.

A diferencia de las membranas porosas, el rendimiento de las membranas no porosas está determinado por las propiedades intrínsecas del material. La elección del material depende de la aplicación de la membrana.

La tabla III muestra en general la clasificación de las membranas según los criterios de naturaleza, estructura y transporte. Estas clasificaciones también ayudan a aclarar el concepto de membrana.

Figura 1. Principales polímeros sintéticos utilizados

Polímero	Micro filtración	Ultra filtración	Nanofiltración ósmosis inversa	Separación de gases pervaporación
Celulosa y derivados	*	*	*	*
Polidimetil siloxano				*
Polietileno	*			
Polipropileno	*			
Polivinil fluoruro	*	*		
Poli(4-metil 1 penteno)				*
Poliéster	*			
Polivinil alcohol				*
Poliacriló nitrilo	*	*	*	*
Policarbonato	*			
Politetra fluoroetileno	*	*		
Poliamida modificada	*	*	*	
Polisulfona	*	*	*	*
Poliéter sulfona				*
Oxido de polifenilo			*	*
Poliéter imida				*
Poliaramida				*
Poliamida imida		*		
Poliamida				*
Polibenzo imidazol		*	*	

Fuente: GUIZARD, Christian. *Clasificación de las membranas y de los procesos que la utilizan.*

p. 4.

Tabla III. **Clasificación de las membranas en base a varios criterios**

NATURALEZA	Biológicas		
	Sintéticas	Inorgánicas	Metálicas vidrio cerámicas
		Orgánicas	Porosas densas
		Mixtas	
ESTRUCTURA	Estructura microscópica	Porosidad	Densas porosas (homo y heteroporosas)
		Configuración	Simétricas asimétricas
		Líquidas	Soportadas no soportadas
	Estructura macroscópica	Laminares tubulares fibras huecas	
TRANSPORTE	Porosas	Flujo fase gaseosa	
		Flujo fase líquida	
		Difusión	
	Densas		
	De cambio iónico	Catiónico aniónico	

Fuente: PALACIO MARTÍNEZ, Laura. *Caracterización estructural y superficial de las membranas microporosas*. p. 4.

2.4. Polímeros

Son moléculas largas de alto peso molecular, los cuales están constituidos de la repetición de unidades químicas básicas llamadas monómeros. Dependiendo de su origen, pueden ser naturales o sintéticos. Las reacciones por las cuales se obtienen los polímeros sintéticos se denominan reacciones de polimerización. Estos últimos pueden estar constituidos hasta por tres tipos diferentes de unidades, mientras que los naturales, pueden contener muchos tipos. Cuando los monómeros son del mismo tipo de molécula se denominan homopolímero. En caso contrario, si están constituidos por más de una molécula, se les llama copolímeros.

El número de unidades estructurales unidas define el número de polarización y la masa molecular del polímero depende de la estructura del monómero. La elección de un polímero como material para la preparación de una membrana se basa en las propiedades de este. A fin de entender las propiedades de los polímeros es necesario conocer la química de estos.

2.4.1. Estructura de los polímeros

Al estudiar la estructura de los polímeros es necesario considerar tanto la estructura química como la física.

2.4.1.1. Estructura química

“La estructura química de los polímeros se refiere a la construcción de la molécula individual”⁴.

⁴ BELTRÁN, Maribel. MARCILLA, Antonio. *Tecnología de los polímeros. Procesado y propiedades*. p. 19.

2.4.1.1.1. Tipos de átomos en la cadena principal y sus sustituyentes

En un polímero el enlace entre cada uno de los monómeros se realiza por enlaces covalentes. Sin embargo, las características de los átomos sustituyentes en la cadena principal son los responsables de las fuerzas de cohesión entre cadenas. A su vez esto determinará la flexibilidad del material, temperatura de transición vítrea, temperatura de fusión y capacidad de cristalización entre otras. Si en la cadena principal se introducen compuestos aromáticos, como es el caso del PET se aumenta la rigidez de la cadena lineal. Esto se debe a que son moléculas voluminosas y fácilmente polarizables.

En general, las fuerzas de cohesión tienen una relación directa con la temperatura de fusión en el caso de los polímeros cristalinos. Mientras que en los no cristalinos afecta directamente a la temperatura de reblandecimiento.

2.4.1.1.2. Peso molecular y estado físico

Propiedades como la resistencia mecánica, la temperatura de transición vítrea de los polímeros amorfos o la temperatura de fusión de fibras, son establecidas por el peso molecular de los mismos.

Un ejemplo claro del cambio de las propiedades de un polímero en función del peso molecular es el estado de agregación al que se encuentra. El estado de agregación del polímero bajo ciertas condiciones es de suma importancia en relación con sus propiedades mecánicas, químicas, térmicas y de permeación. Todas estas propiedades químicas son de suma importancia para el comportamiento del polímero bajo condiciones de temperatura elevada.

A continuación, en la tabla IV se muestra cómo afecta el peso molecular al estado de agregación.

Tabla IV. Estado físico de polímeros

Número de unidades de carbono	Peso molecular	Estado físico a 20 °C
1	30	Gas
6	170	Líquido
35	1000	Grasa
430	>12000	Resina

Fuente: BELTRÁN, Maribel. MARCILLA, Antonio. *Tecnología de los polímeros. Procesado y propiedades*. p. 23.

2.4.1.1.3. Uniones entre átomos

Esta unión depende del proceso de polimerización. En la polimerización por condensación se unen siempre de la misma forma, caso contrario en la polimerización por adición, en donde no siempre es de esta manera.

2.4.1.2. Estructura física

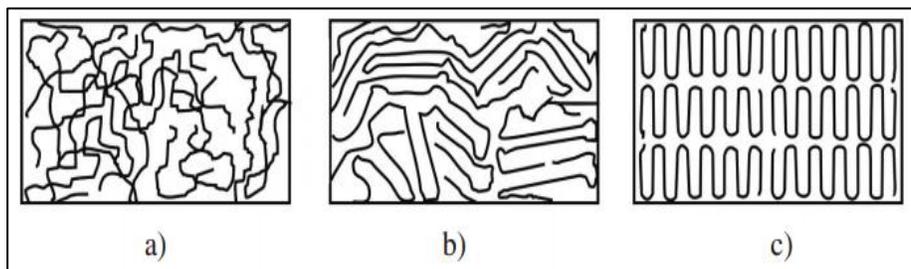
Se refiere al ordenamiento de las moléculas respecto a otras. “La estructura física de los polímeros incluye el estudio de la orientación y cristalinidad, los cuales dependen de la estructura química de este. Tanto la orientación como la cristalinidad repercuten en el comportamiento del material cuando se está procesando y en su vida de servicio”⁵. A continuación se describirá cómo afecta la estructura física de los polímeros.

⁵ BELTRÁN, Maribel. MARCILLA, Antonio. *Tecnología de los polímeros. Procesado y propiedades*. p. 20.

2.4.1.2.1. Estado amorfo y cristalino

Aunque ningún polímero es completamente cristalino debido a su tamaño y complejidad, el término cristalino se utiliza para describir el empaquetamiento de cadenas moleculares para producir una región ordenada de los polímeros. Mientras que el estado amorfo denota lo contrario. En la figura 2 se muestran los estados: a) amorfo, b) semicristalino y c) cristalino.

Figura 2. Estado cristalino y amorfo



Fuente: BELTRÁN, Maribel. MARCILLA, Antonio. *Tecnología de los polímeros. Procesado y propiedades*. p. 29.

Los polímeros con estructuras química y geoméricamente regulares son aquellos que son capaces de cristalizar. Las irregularidades ocasionales que se pueden presentar en la cadena, tal como las ramificaciones limitan, pero no impiden la cristalización del polímero. Por el contrario, las irregularidades constantes si impiden la cristalización.

Son pocas las familias de polímeros que poseen regularidad estructural suficiente como para cristalizar, aun así nunca se cristalizan por completo. Es por esta razón que se define el grado de cristalización.

La movilidad de la cadena polimérica es muy restringida en el estado cristalino debido a que no pueden rotar libremente alrededor de la cadena principal.

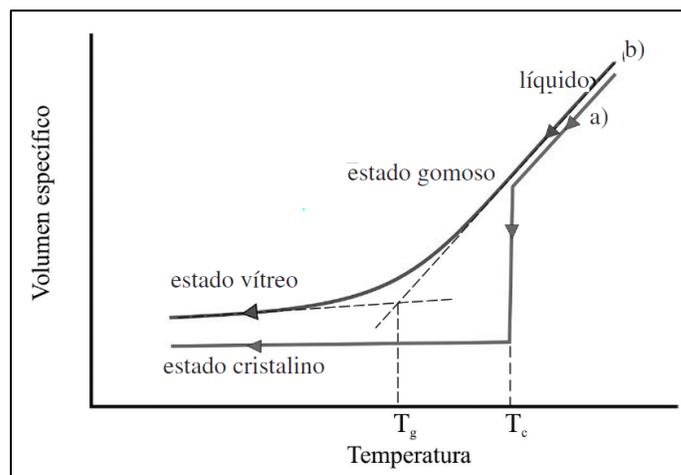
2.4.1.2.2. Temperatura de transición vítrea y temperatura de fusión

Los polímeros termoplásticos se encuentran en una fase líquida a temperaturas elevadas y pueden pasar rápidamente de una conformación a otra. En este estado poseen un alto volumen específico, tal y como se puede observar en la figura 3 a medida que la temperatura desciende, también la energía disponible es menor, la rapidez del cambio de configuración es más lenta y el volumen específico disminuye. Cuando se alcanza una temperatura determinada todos los sistemas tienden a ordenar sus moléculas en forma de redes cristalinas sólidas. Los polímeros que tienen capacidad de cristalizar poseen una temperatura de cristalización T_C . En esta temperatura se produce un cambio de fase desde el estado amorfo fundido al estado sólido cristalino. También tienen una temperatura de fusión T_m , en la cual se realiza una transición desde el estado sólido al fundido.

En caso contrario, los polímeros que poseen una estructura muy compleja, como ramificaciones y fuertes interacciones entre cadenas, tienen como característica viscosidades muy elevadas en el estado líquido. Este tipo de moléculas no poseen un estado cristalino más estable que el amorfo al llegar a la temperatura en que se esperaría cristalizaran debido a su viscosidad alta y su geometría demasiado compleja. En estos casos persiste la conformación desordenada del estado líquido.

Para polímeros amorfos, como el polímero b) de la figura 3, se utiliza la temperatura de transición vítrea T_g , en la cual el polímero sufre cambios perceptibles de propiedades. El término de fusión se debe de emplear solo para polímeros cristalinos y semicristalinos. A diferencia de estos, los polímeros amorfos, poseen un intervalo de reblandecimiento por arriba de la temperatura T_g en donde se encuentra en una fase fluida, aunque no se encuentra fundido.

Figura 3. **Volumen específico de polímeros**



Fuente: BELTRÁN, Maribel. MARCILLA, Antonio. *Tecnología de los polímeros. Procesado y propiedades*. p. 31.

Tabla V. **Temperatura de transición vítrea y fusión**

Polímero	T_g (°C)	T_m (°C)
Polietileno	-125	140
Poli(cloruro de vinilo)	81	---
Polietilentereftalato	29	270
Politetrafluoroetileno	-113	327

Fuente: BELTRÁN, Maribel. MARCILLA, Antonio. *Tecnología de los polímeros, procesados y propiedades*. p. 32.

2.4.1.2.3. Calor de fusión

Los poliésteres lineales alifáticos poseen bajos puntos de fusión, este comportamiento se les atribuye a sus bajos calores de fusión. La razón de este comportamiento radica en que las fuerzas cohesivas que deben vencerse en la fusión resultan casi exclusivamente entre las fuerzas de dispersión de los metilenos en las cadenas lineales vecinas. Dado que los poliésteres poseen menos grupos metileno por unidad de longitud de cadena, sus calores de fusión son más bajos en comparación con otros polímeros.

Mientras las interacciones de metilo entre cadenas tienen una gran influencia en el punto de fusión, las interacciones dipolo-dipolo entre cada grupo éster no contribuyen de manera significativa en el calor de fusión de los polímeros. Esto corrobora la suposición de que los enlaces bipolares en el cristal se reforman casi enteramente en el proceso de fundido.

El polietileno fue sintetizado por primera vez en la década de los treinta. Las características que lo convierten en el polímero más utilizado en la actualidad son: bajo costo, baja reactividad química y fácil de procesamiento.

2.4.2. Análisis térmico

Entre todos los análisis realizados a los polímeros el más avanzado es el térmico. Con el avance en los equipos y técnicas analíticas empleadas se puede estudiar desde los cambios de entalpía asociados con el calentamiento, enfriamiento templado, cristalización, o diferentes tratamientos térmicos de los polímeros. Además se puede estudiar el comportamiento con diferentes cambios en la temperatura, como la polimerización, degradación y algunos cambios químicos.

2.4.2.1. Comportamiento del proceso según la cristalinidad del polímero

Los polímeros se pueden comportar de diferentes maneras en un proceso de cambio de temperatura dependiendo de su capacidad de cristalizar. El grado de cristalinidad también tiene efecto en las propiedades del producto final.

Debido a que los polímeros cristalinos contienen regiones amorfas al ser calentados el material se reblandece debido a la movilidad que adquieren gradualmente las moléculas de estas regiones. Es hasta alcanzar la temperatura de fusión que la estructura contiene suficiente energía y colapsa. Es por esta razón que se debe de trabajar por encima del punto de fusión.

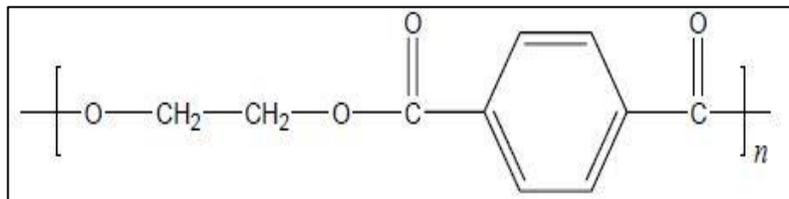
La contracción de volumen es un fenómeno que se manifiesta en el enfriamiento de los polímeros tanto cristalinos como amorfos, sin embargo, en el caso de los polímeros cristalinos es mucho mayor (1,5 a 3 % en polímeros cristalinos frente a 0,4 a 0,8 % en amorfos). En los polímeros que cristalizan la reducción del volumen específico se debe a que después del enfriamiento se produce un empaquetamiento de las moléculas.

2.5. Polietileno tereftalato (PET)

Más conocido por sus siglas en inglés, PET es un polímero que fue descubierto como una fibra textil en 1941. Se obtiene como resultado de una reacción de policondensación entre ácido tereftálico y el etilenglicol. Según sus propiedades forma parte de los plásticos termoformables (termoplásticos), es decir, que es un material fácilmente moldeable cuando se le somete a una temperatura.

Según su estructura forma parte de los poliésteres. La representación de la estructura química del monómero del PET se puede ver en la figura 4:

Figura 4. **Monómero de PET**



Fuente: MANO, João F. *Propiedades térmicas de los materiales en la enseñanza de la ciencia de materiales e ingeniería - estudios DSC sobre poli(tereftalato de etileno)*. Volumen 25.

Número 4-6. p. 16.

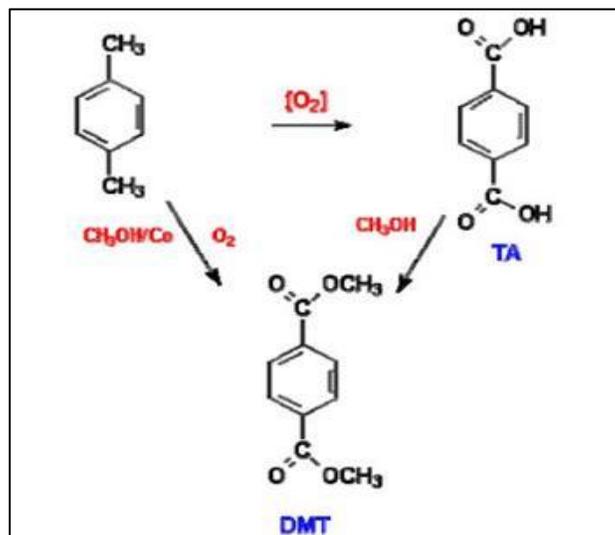
Muchos de los compuestos que se involucran en la reacción de síntesis de polímeros son resultado de la refinación del petróleo. El dimetilbenceno o xileno, es un importante químico industrial, el cual es sucesivamente utilizado para la manufactura del ácido tereftálico puro (PTA), uno de los compuestos necesarios para la producción del PET. Este es un líquido incoloro e inflamable.

El método más simple para la obtención del PET consiste en realizar una esterificación del ácido tereftálico con etilenglicol, el cual es obtenido a partir del tratamiento del etileno con oxígeno en presencia de lata como catalizador para producir óxido de etileno. Por último, el óxido de etileno reacciona con agua en medio ácido para formar etilenglicol.

El primer paso de la esterificación consiste en oxidar el dimetilbenceno en presencia de un catalizador de cobalto y metanol para producir el ácido tereftálico (TA). Este último es posteriormente esterificado a tereftalato de dimetilo (DMT).

En la reacción de esterificación se forma el bis-β-hidroxietil tereftalato, el cual para obtener un polímero de cadena larga crea el proceso de policondensación. El metanol es eliminado como subproducto. Este proceso se realiza al vacío para liberar una molécula de etilenglicol cada vez que la cadena se alarga por una unidad repetida. La masa del PET requerida es determinada por medio de la viscosidad registrada en un reómetro. Una vez se tiene la cantidad necesaria se rompe el vacío y se introduce nitrógeno, así se evita fenómenos de oxidación. La masa fundida se solidifica haciéndolo pasar previamente por un matriz. Por último se peletiza.

Figura 5. Reacción de síntesis del PET



Fuente: ÁLVAREZ, Mariano. <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/pet.html>.

Consulta: enero de 2014.

El PET no es considerado como una sustancia tóxica, sin embargo, en períodos largos de exposición puede ser nocivo si se inhala o ingiere. Puede causar irritación si se tiene contacto directo con los ojos.

El PET puede ser moldeado o procesado mediante extrusión, inyección, soplado, termoconformado, entre otros. La resina de PET absorbe humedad del ambiente, por lo que previo a cualquier proceso térmico es importante eliminarla mediante secado. Para fabricar un buen producto de PET, se requiere reducir la humedad a menos de 0,004 % (40 ppm).

El peso molecular de los polímeros está relacionado indirectamente con la viscosidad intrínseca (VI), es decir con el tamaño promedio de moléculas que definen el polímero. La viscosidad intrínseca usada generalmente es de $0,8 \pm 0,02$ dl/g. La disminución de la VI significa una disminución del peso. Bajo condiciones controladas de secado y moldeo, la pérdida de VI no debe ser mayor de 0,03 dl/g. Cualquier pérdida superior de VI trae como consecuencia una disminución en la transparencia y pérdida de propiedades mecánicas, debido a un incremento de cristalización.

La pérdida de la viscosidad se debe básicamente a una degradación hidrolítica ocurrida durante el estado de fusión que es donde el agua a niveles superiores de 40 ppm tiene una acción destructiva del polímero. La hidrólisis del PET aumenta directamente a la temperatura. En la práctica, desde el punto de vista económico y de eficiencia, las mejores condiciones de secado se alcanzan entre 165 y 170 °C. Una segunda causa de la caída de VI es la degradación térmica durante la fusión para inyectarlo. Por esta razón se debe emplear un perfil de temperaturas de modelo lo más suave posible que permitan la obtención de preformas transparentes y libres de distorsión.

Durante el proceso de fusión del PET se genera acetaldehído (CH_3CHO) en pequeñas cantidades. Esto se genera por la degradación térmica de las moléculas de PET mientras se encuentra en estado de fusión.

Tabla VI. Datos técnicos de tereftalato de polietileno (PET)

POLIETILENTEREFTALATO				PET
Propiedades mecánicas a 23°	Unidad	ASTM	DIN	Valores
Peso específico	g/cm ³	D-792	53479	1,39
Resistencia a la tracción (fluencia/rotura)	kg/cm ²	D-638	53455	900 / --
Resistencia a la compresión (1 y 2 %)	kg/cm ²	D-695	53454	260 / 480
Resistencia a la flexión	kg/cm ²	D-790	53452	1450
Resistencia al choque sin entalla	kg.cm/cm ²	D-256	53453	> 50
Alargamiento a la rotura	%	D-638	53455	15
Módulo de elasticidad (tracción)	kg/cm ²	D-638	53457	37000
Dureza	<i>Shore D</i>	D-2240	53505	85 - 87
Coeficiente de roce estático s/acero		D-1894		--
Coeficiente de roce dinámico s/acero		D-1894		0,20
Resistencia al desgaste por roce				Muy buena
Propiedades térmicas	Unidad	ASTM	DIN	Valores
Calor específico	kcal/kg. °C	C-351		0,25
Temperatura de flexión b/carga (18,5 kg/cm ²)	°C	D-648	53461	75
Temperatura de fusión	°C			255
Coeficiente de dilatación lineal de 23 a 100 °C	por °C	D-696	52752	0,00008
Coeficiente de conducción térmica	kcal/m.h. °C	C-177	52612	0,25
Propiedades químicas			Observaciones	
Resistencia a hidrocarburos			Buena	
Resistencia a ácidos débiles a temperatura ambiente			Buena	
Resistencia a álcalis débiles a temperatura ambiente			Buena	
Resistencia a productos químicos definidos			Consultar	
Efecto de los rayos solares			Algo lo afectan	
Aprobado para contacto con alimentos			Si	
Comportamiento a la combustión			Arde con mediana dificultad	
Propagación de llama			Mantiene la llama	
Comportamiento al quemarlo			Gotea	
Color de la llama			Amarillo anaranjado tiznado	
Olor al quemarlo			Aromático dulce	

Fuente: Industrias JQ. <http://www.jq.com.ar/Imagenes/Productos/PET/dtecnicos/dtecnicos.html>.

Consulta: abril de 2014.

2.6. Sinterización

Este método consiste en el tratamiento isotérmico de material granular o en forma de polvo durante el tiempo de operación y la temperatura de sinterización. Estas son habitualmente inferiores a las condiciones de fusión de sus partículas e inferiores a las del cambio alotrópico si lo tuviera. Se aplica, en forma general, a la preparación de piezas de cerámica y metal.

Por medio de la sinterización, la pieza en verde (sin tratamiento) incrementa su fuerza y resistencia, lo que se logra por la consolidación y extensión de las uniones cohesivas intersuperficiales. Es así como su resistencia podría ser la necesaria para fines industriales.

Una herramienta básica en la sinterización es el horno, al que debe exigírsele un control riguroso de los tiempos de residencia, temperatura de sinterización y de la naturaleza de la atmósfera circundante. Por lo que las variables de control principales en la sinterización son la temperatura, el tiempo en el que se mantiene el material adentro del horno. La temperatura utilizada debe de ser menor a la del punto de fusión, entre un 70 y 90 % de esta. El tiempo de residencia de los polvos metálicos es mayor en comparación con el de los polímeros.

Los pasos principales que comprende el proceso de sinterizado son: elaboración de la materia prima (polvos finos o granos elementales) para lo cual se utiliza un proceso de trituración o molienda, mezcla de componentes, conformado de la materia prima mediante presión y temperatura. Aunque dependiendo del fin que tenga la pieza se puede obviar cualquiera de las anteriores.

2.7. Preparación de membranas por sinterización

En la síntesis de membranas el método de sinteriza se puede definir como el “proceso que consiste en aglutinar, por efecto de la temperatura, un material granular o en pulverulento, con objeto de conseguir una lámina sólida más o menos porosa”⁶. La temperatura debe ser menor a la de fusión.

En el transcurso de la sinterización es frecuente que los gránulos sean sometidos a una fuerte compresión. Con todo ello, se pretende inducir modificaciones químicas en las partículas que favorezcan la formación de puentes y enlaces entre las mismas. El proceso se realiza hasta formar verdaderos agregados que proporcionan resistencia mecánica al conjunto.

Por medio de la sinterización se pueden obtener membranas con tamaños nominales de poro de hasta 0,005 μm de cerámicas y de vidrio borosilicatado tipo Pyrex® y Vycor®. Aunque este vidrio posee resistencias químicas muy buenas, las membranas de estos materiales suelen ser gruesas y frágiles, por lo que quedan restringidas a usos de microfiltración. También es posible compactar gránulos de polímero de resina cambiadora y de material inerte para producir membranas funcionales con capacidad de intercambio iónico.

2.8. Técnicas de caracterización de membranas

En el campo de los procesos de separación por medio de membranas, caracterizar una membrana se refiere al conocimiento de su constitución, estructura y comportamiento funcional. Esto se logra empleando los métodos adecuados.

⁶ HERNÁNDEZ A. et. al. *Microfiltración, ultrafiltración y ósmosis inversa*. Procesos de transporte y separación. Volumen 4. p. 37.

El procedimiento de preparación de la membrana determina su estructura física, la cual influye en la funcionalidad de la membrana como elemento separador.

La caracterización estructural de una membrana conlleva, fundamentalmente, la determinación experimental de los siguientes parámetros:

- Distribución estadística de tamaños de poro: se toma en cuenta esta variable, ya que raramente se observan en una membrana poros de un tamaño único.
- Morfología y tamaño de los poros: estos parámetros se expresan mediante un factor de forma y un valor de radio de poro equivalente.
- Densidad superficial de poros: es decir, el número de los mismos por unidad de área de superficie.
- Porosidad en volumen: esta es la fracción del volumen total de membrana que está ocupada por los poros o huecos. Regularmente, también se determina la porosidad de superficie, la cual está definida en forma paralela.

Los métodos de caracterización que permiten determinar un parámetro pueden agruparse de la siguiente manera:

- Tamaño de poro y distribución de tamaños
 - Microscopía electrónica (SEM y TEM)
 - Porosimetría con mercurio. Punto de burbuja
 - Permeación de líquidos (Hagen-Poiseuille)
 - Permeación de gases (Knudsen)
 - Adsorción y condensación capilar de gases

- Características de porosidad
 - Microscopía electrónica
 - Porosidad con mercurio
 - Picnometría y densidad aparente
 - Análisis térmico y calorimetría (ATD y DSC)

- Forma y estructura del poro
 - Microscopía electrónica
 - Termoporometría

2.9. Módulos de membrana

Para llevar a cabo un proceso de separación de componentes a nivel industrial se necesitan de una planta de membrana de miles de metros cuadrados de membrana. Un método económico y eficiente, que facilita llevar a cabo la separación por medio de membranas a nivel industrial, es empaquetar las grandes cantidades de área de membrana requerida. Estos paquetes son llamados módulos de membrana.

Los primeros diseños de módulos están basados en una simple filtración y fueron desarrollados en los años sesenta y setenta. Estos consistían en láminas planas de membranas sostenidas en un tipo de filtro de prensa, por lo que se les llamó filtro de plato y marco. En la actualidad, representan un alto costo comparado con otros módulos. La mayoría del desarrollo de la tecnología de membranas ha sido realizado por compañías, por lo que la información se encuentra en patentes disponibles al público.

Entre los factores determinantes para la escogencia de un tipo de módulo se encuentra indudablemente el costo. Sin embargo, los puntos más importantes a tratar en un módulo son el ensuciamiento de membrana y la polarización concentración. Además se debe de tomar en cuenta que el soporte que se le da a la membrana por medio del módulo resista las condiciones de presión y temperatura del proceso.

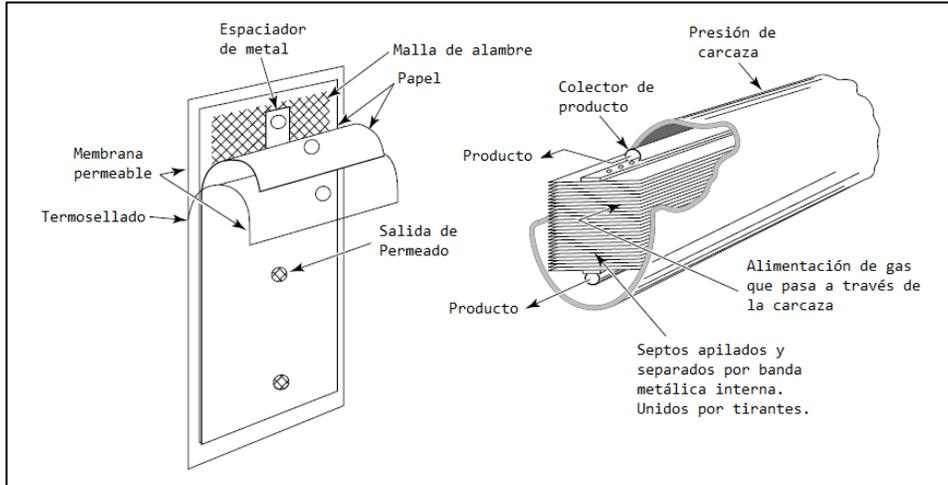
2.9.1. Módulos de plato y marco

En este tipo de módulo, la membrana, los espaciadores de alimentación, y producto están colocados entre dos platos situados al extremo. La mezcla de alimentación es forzada por medio de la superficie de la membrana. Una porción de la alimentación pasa a través de la membrana, entra en el canal de permeación, y sigue su camino hacia el colector central de permeato.

En la figura 6 se muestra uno de los primeros diseños de módulos de plato y marco desarrollados por Stern et al. En la actualidad son usados en aplicaciones a pequeña escala como la electrodiálisis y sistemas de pervaporación. También son utilizados en limitados sistemas de osmosis inversa y ultrafiltración. Los módulos de plato y marco proveen un buen control de flujo en los lados del permeado y de la alimentación, aunque el gran número platos espaciadores y sellos elevan los costos de fabricación.

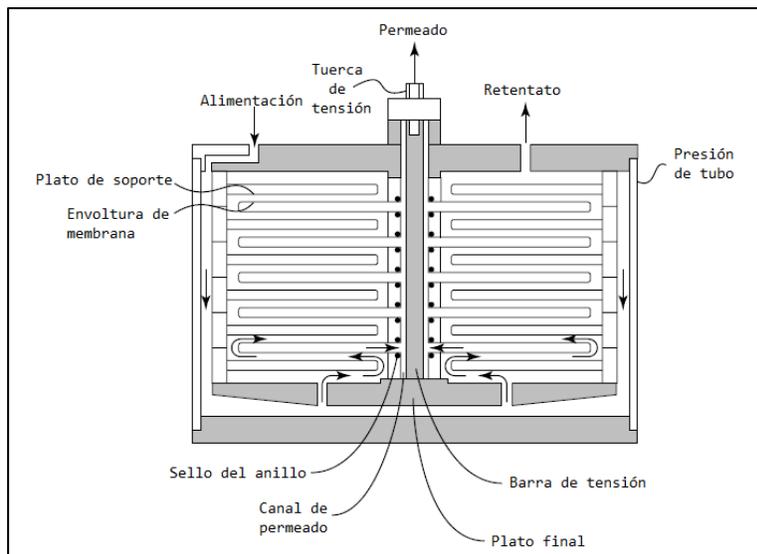
Los equipos de módulo de plato y marco son utilizados en diferentes aplicaciones. Para cada equipo, cada lámina plana de membrana debe de encajar en el aparato de plato y marco. Esto puede ser económicamente favorable en el reemplazo de la membrana cuando se termine su tiempo de vida útil. Se debe de tomar en cuenta que la membrana encaje bien para evitar fugas de la mezcla que se desea separar.

Figura 6. **Primer módulos de plato y marco**



Fuente: BAKER, Richard W. *Membrane Technology and Applications*. p. 140.

Figura 7. **Esquema módulo de plato y marco**



Fuente: BAKER, Richard W. *Membrane Technology and Applications*. p. 141.

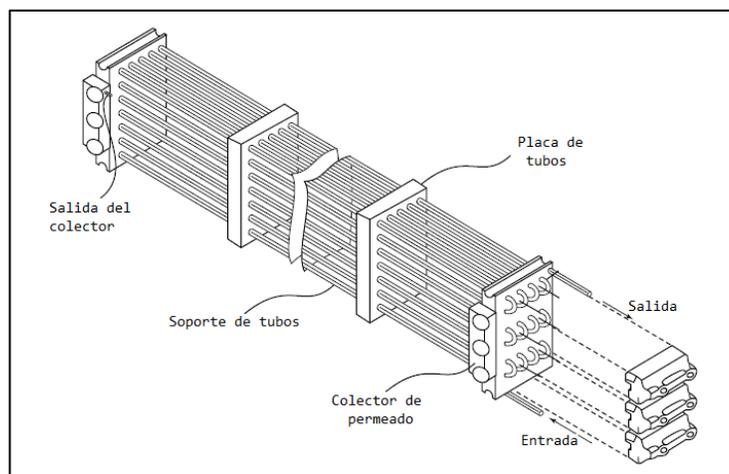
2.9.2. Módulos tubulares

La mayoría de las veces, la morfología de estos módulos consiste en papel poroso o un soporte de fibra de vidrio con la membrana formada dentro de los tubos. En un típico sistema de membranas tubular un gran número de tubos son colocadas en serie. El permeato es removido de cada tubo y mandado a un colector principal de permeado.

Actualmente, los módulos tubulares están limitados a aplicaciones de ultrafiltración debido a que su resistencia al ensuciamiento y la hidrodinámica de los fluidos eleva sus costos.

En la figura 8 se muestra un sistema tubular de ultrafiltración en el cual treinta tubos son conectados en serie. El permeato de cada tubo es colectado en el colector de permeado.

Figura 8. Módulos tubulares



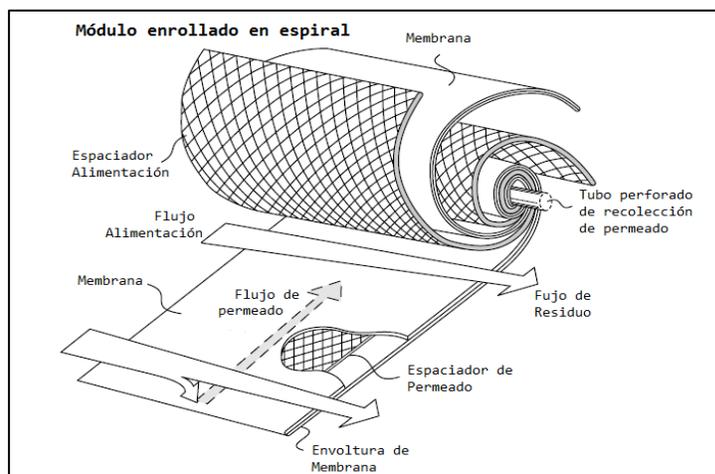
Fuente: BAKER, Richard W. *Membrane Technology and Applications*. p. 143.

2.9.3. Módulos enrollados en espiral

La estructura más simple de este tipo de módulos consiste en una envoltura de membrana con espaciadores y membranas enrolladas alrededor de un tubo central de recolección perforado. Una porción de la alimentación se permea dentro de la envoltura de membrana, en donde mueve en espiral hacia el centro y sale a través del tubo de recolección.

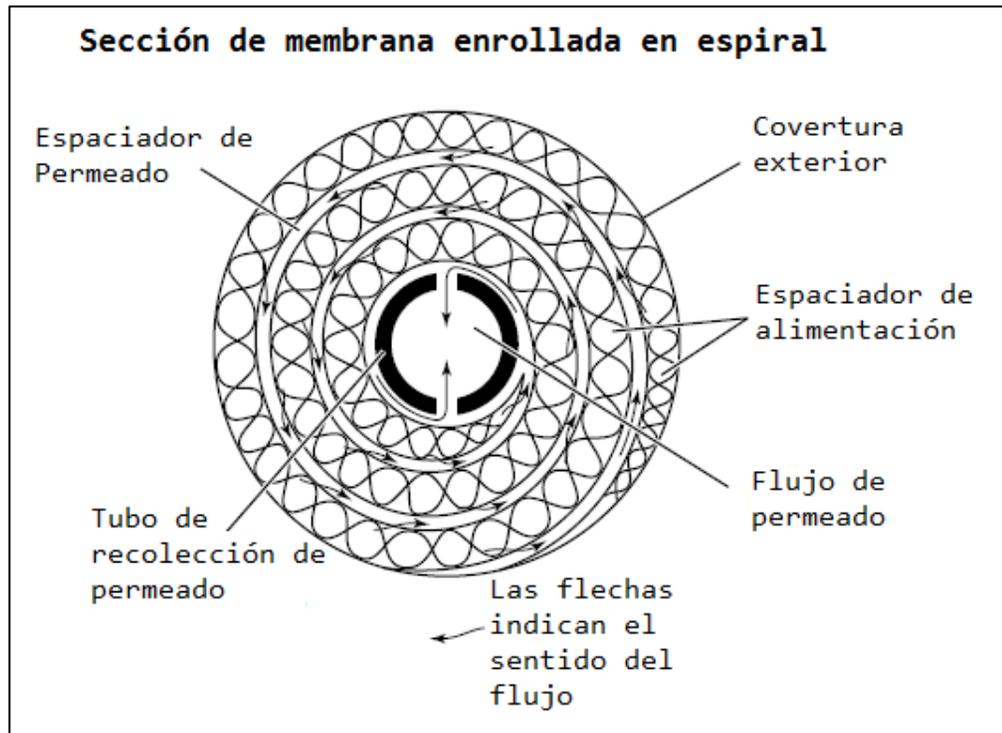
Los módulos de espiral utilizados a nivel de laboratorio constan de un diseño que utiliza solamente una envoltura de membrana, con un área aproximada entre 0,2 a 1,0 m², enrollada alrededor del tubo de recolección. Por el contrario, a nivel industrial se utilizan varias envolturas de membrana, cada una de las cuales pueden tener áreas entre 1-2 m², y se encuentran enrolladas alrededor del tubo central. El diseño de envolturas en serie minimiza la caída de presión encontrado por el permeado cuando este fluye a través del tubo.

Figura 9. Módulos enrollados en espiral



Fuente: BAKER, Richard W. *Membrane Technology and Applications*. p. 144.

Figura 10. Módulos de fibras huecas



Fuente: BAKER, Richard W. *Membrane Technology and Applications*. p. 144.

2.9.4. Módulos de fibras huecas

Estos se encuentran en dos diferentes tipos de geometrías, las cuales se diferencian básicamente por la manera en que se alimentan. Estas son: alimentación por el lado de la carcasa y por el lado del orificio.

En los módulos que utilizan la alimentación por el lado de la carcasa, un paquete cerrado de fibras es contenido en un recipiente. El sistema es presurizado desde el lado de la carcasa, esto provoca que el permeato pase a través de la pared de fibras y salga por el extremo final de las mismas.

El diseño de alimentación por el lado de la carcasa tiene dos principales ventajas: es fácil de fabricar y puede contener una gran cantidad de área de membrana en un sistema económico. Las fibras utilizadas en este sistema de módulo usualmente tienen diámetros pequeños, alrededor de 50 μm y de 100 a 200 μm , y paredes gruesas. Debido al tamaño de las membranas, este módulo puede soportar presiones hidrostáticas altas.

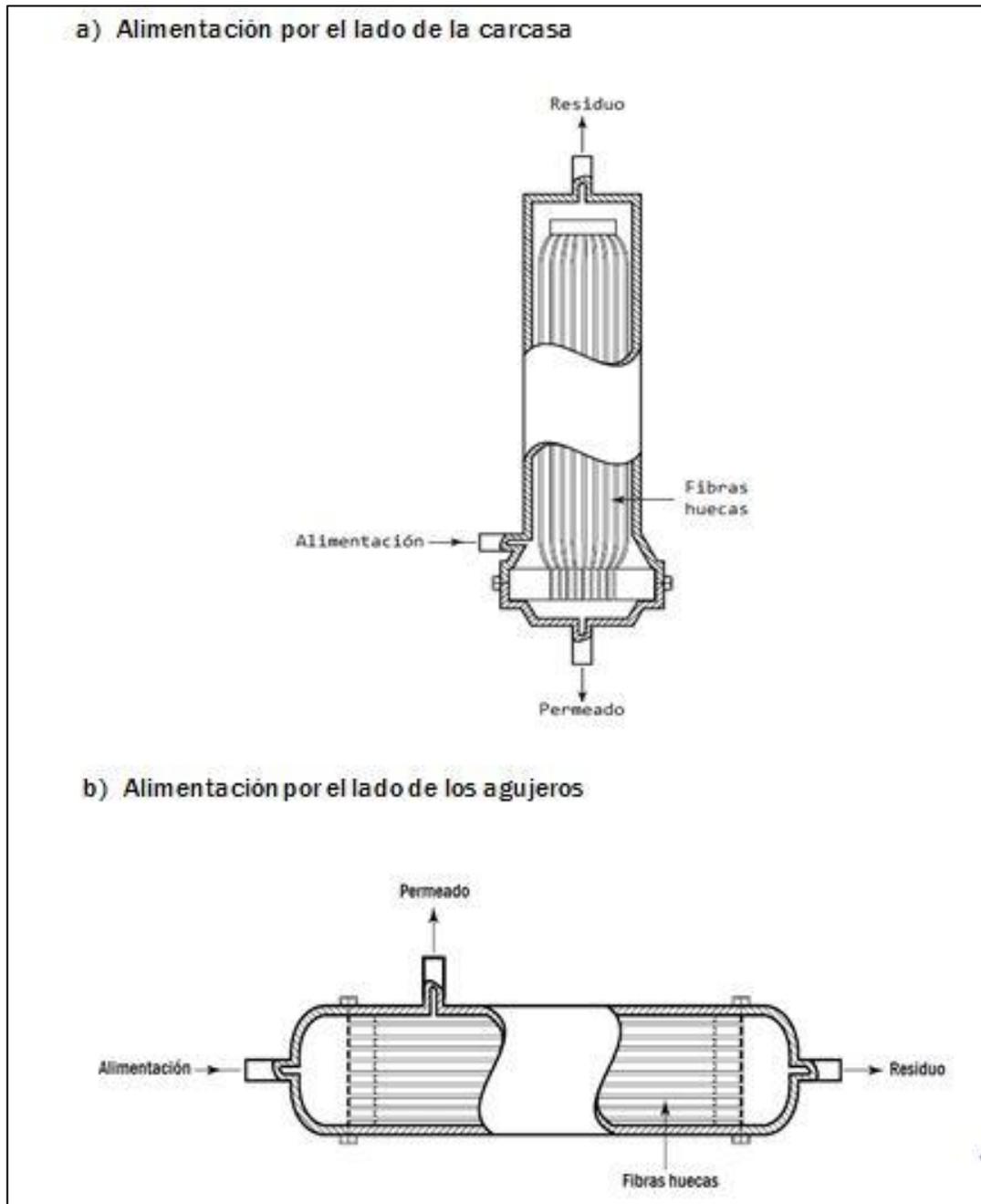
Los módulos con diseño por el lado de la carcasa son usados por Monsanto en los sistemas de separación de hidrógeno y por la Du Pont en los procesos de ósmosis inversa.

En el otro tipo de módulo de fibra hueca, el que realiza la alimentación por el lado del orificio, las fibras se encuentran abiertas en ambos lados, y el fluido de alimentación circula a través de los agujeros de las fibras. Para minimizar la caída de presión adentro de las fibras de membrana, los diámetros de las fibras son mayores que los del otro tipo de geometría (alimentación por el lado de la carcasa). Debido a la geometría de este sistema, las presiones de trabajo están limitadas generalmente hasta 150 psi.

En los módulos alimentados por el lado del orificio, es de suma importancia asegurarse que las fibras tengan diámetros y permeancias idénticas. Incluso variaciones tan pequeñas de $\pm 10\%$ del promedio de fibra pueden causar grandes variaciones en el rendimiento del módulo. El flujo de fluido a través del agujero es proporcional al diámetro a la cuarta potencia, mientras que el área solo varía a la segunda potencia.

La concentración por polarización está bien controlada en los módulos alimentados por el lado del orificio. Esto se debe a que la alimentación pasa directamente por a través de la superficie de separación.

Figura 11. Módulos enrollados en espiral vista transversal



Fuente: BAKER, Richard W. *Membrane Technology and Applications*. p. 147.

2.10. Valoraciones para membranas

Las membranas están medidas por la velocidad en la cual producen flujo de permeado y la habilidad para seleccionar lo que traspasa y lo que se retiene a través de la membrana. Para casi todas las membranas de microfiltración y ultrafiltración se realiza una prueba de flujo de agua, el cual es un valor tomado en condiciones estándares las cuales no coinciden con las condiciones de operación.

Lo que las membranas retienen están descritas por tres diferentes términos: retención, y reflexión. Estos tres términos son sinónimos para ultrafiltración y microfiltración. La retención está definida como:

$$R_i = 1 - \frac{c_i(\text{permeado})}{c_i(\text{retentato})}$$

en donde: c es la concentración de las especies presentes en la solución. Esta definición es arbitraria en la convención de concentración, ya que esta es medida en la alimentación, la cual está muy alejada de la membrana, que puede ser muy diferente.

Además se utiliza el porcentaje de recuperación como un factor de conversión entre el caudal de permeado y el caudal de aportación que llega a la membrana. Esta medida es una buena indicación de posibles ensuciamientos en la membrana. Se denota como un cociente expresado en porcentaje:

$$\% \text{recuperación} = \frac{\text{Caudal de permeado}}{\text{Caudal de aportación}} \times 100$$

Por el contrario, se tiene el porcentaje de rechazo, el cual es el cociente expresado en porcentaje entre el caudal de la solución de alimentación a la membrana menos el caudal de permeado y el caudal de alimentación.

$$\%rechazo = \frac{\text{caudal alimentación} - \text{caudal permeado}}{\text{caudal alimentación}} \times 100$$

Además se usa el coeficiente de permeabilidad que es una medida del volumen de solvente que atraviesa la membrana por unidad de superficie, tiempo y presión a una temperatura dada.

2.11. Energía radiante

La energía transmitida en las ondas electromagnéticas por sustancias en estado de gran excitación, como altas temperaturas, es llamada energía radiante.

Las ondas electromagnéticas son caracterizadas de dos maneras: utilizando propiedades de ondas y propiedades de partículas. Es caracterizada en forma de onda, aunque no necesite de un medio de propagación, en fenómenos de difracción y refracción. Mientras que en emisión y absorción se utiliza como partículas, llamadas fotones.

Todas las ondas electromagnéticas están distribuidas energéticamente en el espectro electromagnético. Dicha distribución sirve para identificar una sustancia. El espectro abarca 20 órdenes de magnitud de longitud de onda, por lo que se utiliza la escala logarítmica para su representación. Las ondas electromagnéticas son caracterizadas según su longitud de onda λ , su frecuencia f y su energía de fotón E .

2.11.1. Transmitancia

Si se coloca un haz de radiación paralela en una sustancia absorbente de determinado espesor y concentración la potencia del haz es atenuada. Esto es consecuencia de las interacciones entre el haz de fotones y las partículas de la sustancia.

La transmitancia es la relación entre el poder de radiación incidente entre la transmitida por el cuerpo absorbente. Se expresa de la siguiente manera

$$T = \frac{I}{I_0}$$

2.11.2. Absorbancia

Se expresa como el logaritmo de base diez del inverso de transmitancia:

$$A = -\log T = \log \frac{I_0}{I}$$

El término absorbancia es equivalente a la densidad óptica. En la mayoría de los métodos analíticos se utiliza la relación directa entre esta propiedad y, la concentración de la especie o grosor de la muestra. Por esta razón, es frecuentemente utilizado en química analítica y en bioquímica. Al contrario, la transmitancia varía exponencialmente con el grosor y la concentración.

Los métodos analíticos de espectrofotometría se basan en la medición de estas dos propiedades. Deben de ser medidos en la misma posición del espectro y con la misma rendija o celda.

2.12. Espectrofotometría

La espectrofotometría es el estudio de la radiación y su comportamiento con la materia como una función de la frecuencia y longitud de onda. Es considerada una versátil herramienta para análisis cuantitativos y cualitativos. La espectrofotometría convencional incluye las regiones ultravioleta, visible y de infrarojo.

Las ventajas de este método cuantitativo para análisis químico y las razones por las cuales es sumamente utilizado son:

- Se puede analizar en un amplio intervalo de longitudes de onda.
- Instrumentos con gran precisión.
- Provee resultados rápidos en tiempos reales, y es fácilmente adaptable a monitoreos continuos.
- Se puede utilizar para cuantificar constituyentes en cantidad de trazas mucho menores de los que pueden cuantificar los métodos gravimétricos y volumétricos.
- Método no destructivo de la muestra, por lo que se puede aplicar cuando el componente a cuantificar es de alto costo.

El objetivo principal en cada procedimiento es determinar la composición de una muestra y la cuantificación de diferentes especies presentes en ella. Las técnicas espectrofotométricas pueden identificar y cuantificar en una misma medida. Inclusive en mezclas de multicomponentes, existe un extenso rango de compuestos que pueden ser detectados con una alta especificidad.

En los análisis espectrofotométricos, las especies son identificadas por frecuencias y características de absorción, emisión o de dispersión. La

cuantificación de las especies se lleva a cabo por la intensidad de estas características. Generalmente se utiliza la propiedad de absorbancia para la cuantificación en los análisis, ya que facilita los cálculos posteriores.

Cuando un haz de energía radiante incide sobre una sustancia parte de la energía es absorbida y el resto se toma como transmitido. En realidad, cierta parte de la energía es reflejada. Si se diera el caso de que la solución con el analito se encontrara en una celda, ocurriría reflexión en las interfaces aire-pared y pared-solución. Los instrumentos de medición toman en cuenta este factor y se elimina su influencia.

Para equilibrar estos efectos, en la práctica se compara la potencia del haz transmitido por una misma celda que primero contiene solamente solvente y luego contiene la solución con el analito. El espectrofotómetro genera una lectura de transmitancia porcentual cuando en la celda se reemplaza el solvente por la muestra.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Es una magnitud susceptible de tomar un valor cualquiera de los comprendidos en un conjunto numérico. Con el objetivo de determinar el comportamiento de la separación de un componente por membranas selectivas a través de una membrana para microfiltración sinterizada a partir de PET reciclado, se lleva a cabo un análisis de las variables que se manejan en dicho estudio.

3.1.1. Variables de control

Las variables de control deben mantenerse constantes durante el experimento. A continuación se listan las concernientes al presente trabajo.

Tabla VII. **Definición variables de control preparación de PET**

No.	Variable	Dimensional	Factor potencial de diseño		Descripción
			Constante	Variable	
Preparación de la resina de PET					
1	Tamaño de partícula	Micrómetros (μm)	X		Tamaño después de tamizar PET/sal
2	Proporción PET/ sal	Porcentaje (%)	X		Proporción sal/PET en polvo

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Definición de las variables de control sinterización**

No.	Variable	Dimensional	Factor potencial de diseño		Descripción
			Constante	Variable	
Sinterización de la membrana					
1	Masa de mezcla	Gramos (g)	X		Cantidad mezcla colocada en bandeja
3	Tiempo de sinterización	Minutos (min)	X		Tiempo de permanencia del PET en el horno a la temperatura sinterización.
4	Temperatura de sinterización	Grados Celcius (°C)	X		Temperatura de horno para sinterización del PET.

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Definición de las variables de control de operación**

No.	Variable	Dimensional	Factor potencial de diseño		Descripción
			Constante	Variable	
Variables de operación					
1	Radio de poro	Micrómetros (µm)	X		Radio promedio de los poros de la membrana sinterizada a partir de PET
2	Concentración inicial	Partes por millón (ppm)	X		Cantidad de soluto en determinado volumen al inicio de la práctica experimental.

Fuente: elaboración propia.

3.1.2. Variables independientes

Son todos los factores manipulados por el investigador que producen uno o más resultados, por lo que también son llamadas variables manipuladas.

Tabla X. **Definición operacional de variables independientes**

No.	Nombre	Variable dimensional	Descripción
1	Concentración inicial	Partes por millón (ppm)	Cantidad de soluto en determinado volumen al inicio de la práctica experimental.
2	Porcentaje de válvula	%	Porcentaje de abertura de la válvula que permite el paso de la solución a analizar.
3	Velocidad de flujo	Metros por segundo (m/s)	Se utiliza para describir el flujo de los fluidos.
4	Caudal volumétrico	Metro cúbico por segundo (m ³ /s)	Cantidad del fluido por unidad de tiempo.

Fuente: elaboración propia.

3.1.3. Variables dependientes

Aquellas que son influenciadas por las variables independientes. En el presente trabajo se listan tres variables dependientes.

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

No.	Nombre	Variable dimensional	Descripción
1	Retención	Adimensional	Cantidad de soluto retenida por la membrana.
2	Porcentaje de recuperación	Porcentaje (%)	Proporción entre el flujo en el permeado y alimentación.
3	Concentración	Partes por millón (ppm)	Cantidad de soluto en determinado volumen en el transcurso de la separación.

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación de campo de estudio

Es imprescindible delimitar el campo de estudio de un trabajo de investigación a fin de no correr el riesgo de tomar datos innecesarios. Con este propósito se definieron los límites para la presente investigación. El proceso de la separación por medio de membranas lo conforman varios factores.

3.2.1. Campo de estudio

El campo de estudio que conforma la presente investigación son los procesos de separación por medio de membranas selectivas.

3.2.2. Material de estudio

Diseño de un módulo para membrana de PET para microfiltración que sea adaptable a la estación de análisis del Laboratorio de Operaciones Unitarias. Asimismo, que permita el análisis de flujo a través de esta y de la separación de los componentes de una solución problema.

3.2.3. Procesos que conforman la investigación

- Preparación de la resina de PET: incluye molienda y análisis granulométrico por tamizaje.
- Pruebas preliminares de sinterización de membranas de PET reciclado para microfiltración.
- Elaboración de un juego de membranas por el proceso de sinterización PET.

- Diseño del módulo de membrana para microfiltración a partir de PET, el cual debe ser adaptable a la estación de análisis para procesos de separación de componentes por medio de membranas selectivas.
- Análisis de flujo a través de membrana para microfiltración de PET reciclado, y de la separación de los componentes de una solución problema por medio de esta.

3.2.4. Selección de tamaño y muestra

Para que el módulo de marco y plato fuera adaptable a la estación experimental se seleccionó una carcasa de PVC de 3 pulgadas de diámetro. Este permite el soporte de una membrana para microfiltración de material PET reciclado de la misma medida de diámetro.

El juego de membranas de PET reciclado para microfiltración consta de nueve membranas, debido al limitante del proceso de preparación previa del material, el cual tiene muy bajo rendimiento.

Se utilizó una membrana por cada tratamiento. Un tratamiento consiste en una variación de la concentración de alimentación al módulo y una abertura de la válvula de globo. Se variaron tres veces la concentración de alimentación y por cada una de estas tres veces la abertura de la válvula de globo. Esto da como resultado nueve tratamientos.

3.2.5. Unidad de análisis y observación

En la fase experimental la unidad de análisis y observación corresponde a la concentración del analito y el caudal del sistema. Se escogió sulfato ferroso heptahidratado (FeSO_4) como analito.

Debido a que el tamaño partícula del sulfato ferroso no está en el rango de la microfiltración se utilizó sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) como coagulante. Este permite que las partículas coloidales del sulfato ferroso se aglomeren y forme flóculos. En la cuantificación se utilizó un método de análisis rápido.

3.2.6. Material que conforma la membrana selectiva

El material con el cual se prepararon las membranas para microfiltración es PET reciclado. Este es todo aquel que no cumple con las especificaciones de tamaño de partícula para la fabricación de *pellets* de PET reciclado. Siendo así el residuo de dicho proceso.

3.2.7. Material que conforma el módulo propuesto

Carcasa de PVC, partes de acero inoxidable y material poroso de poliuretano. Estos dos últimos le brindan soporte mecánico a la membrana.

3.2.8. Material de control de la investigación

Son las variables de presiones, tiempos y concentración. Estas son controladas en el transcurso de la investigación.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador

Karen Lucrecia Hurtarte Pineda

Correo electrónico: karen.hurtarte@gmail.com

Universidad de San Carlos de Guatemala

- Asesor de investigación

Ramón Benjamín Piedrasanta Batz

Correo electrónico: benjapiedra@yahoo.com

Colegiado núm. 715

- Coasesor de investigación

Ing. Renato Giovanni Ponciano Sandoval

Correo electrónico: iq7membranas@gmail.com

Colegiado núm. 826

3.4. Recurso material disponible

Son todos los materiales o medios tanto físicos y concretos que permitieron alcanzar los objetivos de la investigación.

3.4.1. Recursos físicos disponibles

El estudio se realizó en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Para la preparación de la membrana de microfiltración se utilizó PET reciclado en presentación de triturados finos. La procedencia del material es el desecho del proceso de producción de *pellets* de PET reciclado. Estos polvos finos proporcionan un método práctico para generar grandes longitudes de producto a partir de una material que no puede ser extruido en fusión. Aún así, fue necesario utilizar un molino para pulverizar el polímero para fomentar la reducción del tamaño de partícula. Luego se tamizó para homogenizar el tamaño de partícula de resina. Se utilizó un tamiz de 100 μm .

La reducción del tamaño de partícula se llevó a cabo en la sección de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII), haciendo uso de un molino de martillos. Debido a que el PET en esta presentación contiene humedad, fue necesario someter el PET a un proceso de secado en un horno de bandejas con convección. El proceso de secado y el análisis de partículas se llevó a cabo en el Laboratorio de Extractos Vegetales (LIEXVE), el que, también es parte del CII.

Para la parte de sinterización se utilizó el horno con convección adiabática del laboratorio de Tecnología de la Madera trabajando a la temperatura y tiempo ya estipulado (apéndice 1). Para determinar dichas condiciones se realizaron diez pruebas preliminares.

El diseño del módulo para la membrana de PET reciclado para microfiltración constó de una carcasa de material PVC. Adentro de esta se encuentran componentes de PVC, una rejilla de acero inoxidable y material poroso de poliuretano. Además de adaptadores para colocarlo en la estación experimental de separación por medio de membranas selectivas. La construcción del módulo se realizó en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería, Usac.

El análisis del flujo y de la retención por medio de dicha membrana se realizó utilizando el módulo propuesto y componentes de la estación experimental, por ejemplo: la bomba centrífuga que proporciona la presión necesaria para que se realice el proceso de separación, los manómetros que proporcionan la lectura de la presión en el sistema y la presión transmembrana, entre otros. Este equipo se encuentra en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería, Usac.

3.4.2. Recursos materiales disponibles

Son todos los equipos, materiales, materia prima y cualquier otro bien que permitió conseguir el objetivo de la presente investigación. Para listarlos se dividieron en dos grupos. En el grupo de materia prima se tomaran en cuenta todos los reactivos utilizados.

3.4.2.1. Materia prima

- Tereftalato de polietileno (PET) reciclado
- Cloruro de sodio (NaCl) tipo reactivo
- Sulfato ferroso (FeSO_4)
- Sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$)
- Reactivo HI 93721-0 *Iron High Range Reagent*

3.4.2.2. Materiales y equipo

- Guantes
- Mascarilla
- Bata de laboratorio
- Tijeras
- Balanza analítica
- Recipientes plásticos
- Secador de bandejas
- Bandejas de acero inoxidable
- Molino
- Set de tamices de diferentes mesh
- Mortero de laboratorio
- Imán

- Bolsas con cierre dentado
- Horno adiabático
- Cronómetro
- Molde de sinterización de la membrana
- Papel encerado
- Espátula
- Trapo de tela
- Regla
- *Beaker*
- *Erlenmeyer*
- Pipetas
- Pizeta
- *Checker* HI 721 HANNA instruments®.

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

Para elegir el método adecuado a seguir en el desarrollo de la presente investigación es necesario determinar el tipo de variables a tratar. Por lo tanto, a continuación se realiza un análisis.

Haciendo uso del módulo propuesto que contiene la membrana para microfiltración, a partir de PET reciclado, se llevó a cabo un análisis experimental. Por medio del análisis experimental se cuantificó los efectos de la modificación de parámetros operacionales en el funcionamiento de las membranas para microfiltración de material PET reciclado. Con los datos obtenidos se generaron curvas de operación, cuantificaron las características de la membrana, como la retención del analito por la membrana. Según las variables que se van a manejar en este caso, la técnica a utilizar es cuantitativa.

Tabla XII. Instrumentos en técnica cuantitativa

Técnica cuantitativa	Instrumento / método	Cuantitativa	
		Continua	Discreta
Tamaño de partícula PET	Tamizador 100	X	
Tamaño de partícula sal	Tamizador 100	X	
Masa de PET tamizado	Balanza analítica	X	
Masa de sal tamizada	Balanza analítica	X	
Temperatura sinterización	Termómetro del horno	X	
Tiempo de sinterización	Cronómetro	X	
Presión transmembrana	Manómetros	X	
Concentración de analito	Hanna Checker HI 721	X	
Tiempo variación de volumen	Cronómetro	X	
Variación del volumen	Cambio escala tanque	X	

Fuente: elaboración propia.

3.6. Proceso de preparación previa de PET al método de sinterización

El método de preparación de las membranas para microfiltración de sinterización requiere un tamaño de partícula de 150 μ m. Por lo cual, la preparación del polímero consistió en llevarlo al tamaño de partícula por medio de varios procesos físicos.

3.6.1. Descripción de los procesos físicos

El tereftalato de polietileno es un material altamente utilizado en la industria para la fabricación de empaques de alimentos y textiles, por lo que su reciclaje y reutilización es viable. En el primer proceso de reciclaje del PET para la producción de *pellets*, las botellas son recolectadas, lavadas y trituradas.

El material utilizado para la fabricación de las membranas para microfiltración a partir de PET en el presente trabajo de investigación es todo

aquel que no cumple con las especificaciones de tamaño de partícula para la fabricación de *pellets*. Se aprovechó dicho material, ya que este posee pequeños tamaños de partícula y su precio de venta es bajo comparado con un polímero virgen.

El primer proceso físico realizado es el de secado. Por consiguiente, la humedad remanente del proceso de limpieza del PET fue removida utilizando el secador de bandejas a una temperatura de 150 °C por un tiempo de 120 minutos. La humedad resultante fue de 1,1 %. La reducción de humedad facilita la separación en el tamiz en el análisis granulométrico. Además, que previene el proceso de hidrólisis en la sinterización. En otras palabras, el proceso de secado del PET es trascendental para llevar a cabo una sinterización adecuada. A continuación se muestra una imagen del secador de bandejas y las bandejas de acero inoxidable utilizadas en el proceso de secado.

Figura 12. **Bandejas con PET en secador**



Fuente: Laboratorio de Extractos Vegetales (LIEXVE), Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII), Facultad de Ingeniería, edificio T-5.

Luego de disminuir el porcentaje de humedad en el PET se procedió a reducir el tamaño de partícula por medio de un molino de martillos con el objetivo de obtener mayor cantidad de material con tamaño de partícula de 0,15 mm.

Posteriormente se realizó un análisis granulométrico por medio de tamizaje para separar el material con el tamaño de partícula requerida del resto. Para ello se utilizó un juego de tamices desde un rango de *mesh* de 3/8 hasta 100 μm y una máquina tamizadora. El juego de tamices es colocado en la tamizadora, la cual por medio de movimientos obliga a cernir el material. El material que cumplió con el tamaño de partícula fue pasado por un proceso de detección de metales por medio de un imán. Posteriormente fue almacenado en bolsas con cierre dentado para evitar que el material absorba humedad del ambiente.

Figura 13. **Vista interior de molino de martillos**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII),
Facultad de Ingeniería.

Figura 14. **Descarga de material de molienda**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII), Facultad de Ingeniería.

Figura 15. **Tamiz utilizado en análisis granulométrico por tamizaje de PET**



Fuente: Laboratorio de Extractos Vegetales (LIEXVE), Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII), Facultad de Ingeniería, edificio T-5.

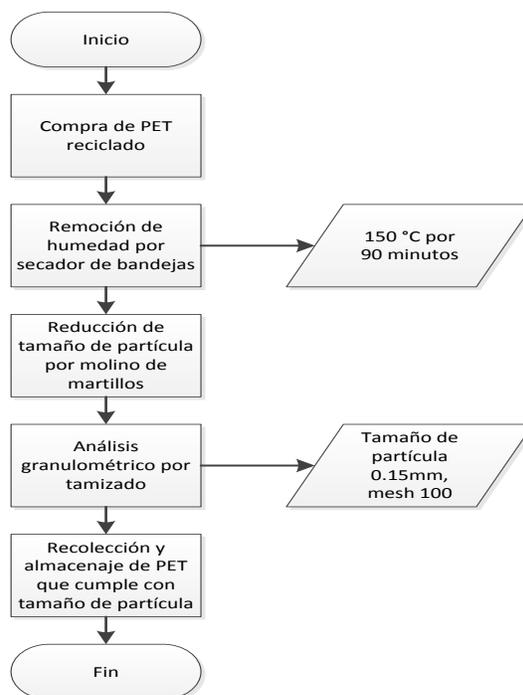
En las figuras 12, 13 y 14 se muestran imágenes de los equipos utilizados en la reducción de tamaño y análisis granulométrico de la preparación previa del material PET. El PET contenía residuos del proceso de molienda de la recicladora, por lo que fue de suma importancia eliminarlos con un imán.

Tabla XIII. Rendimiento de análisis granulométrico

Dato	Valor	Unidad
Cantidad total de PET tamizado	10	Kg
Cantidad de 100 μm	134	g
Rendimiento	0,134	%

Fuente: elaboración propia.

Figura 16. Diagrama de proceso de preparación previa de PET



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

3.7. Proceso de pruebas preliminares de sinterización

Se realizaron diez pruebas preliminares a la sinterización para determinar las condiciones que producen una membrana de PET, con las propiedades necesarias para realizar las pruebas experimentales. La descripción se encuentra en apéndice 1.

3.8. Sinterización de un juego de membranas de tereftalato de polietileno (PET)

El material utilizado para la elaboración de las membranas consiste de una mezcla previamente preparada de PET y cloruro de sodio (NaCl) tipo reactivo. Este último es el agente formador de poros en la membrana.

Debido a que las condiciones de temperatura y tiempo son sumamente importantes para poder elaborar las membranas por el método de sinterización, se realizaron pruebas preliminares (apéndice 1); en las cuales se variaron las proporciones de la cantidad de PET y NaCl, la temperatura y el tiempo de sinterización. Las condiciones de sinterización que obtuvo los mejores resultados de sinterización fue a una proporción de 7:3 (PET:NaCl) a 270 °C por 25 minutos.

El procedimiento para la preparación de las membranas consta de varias fases:

- Pesaje de materia prima previamente secada y tamizada: se pesaron 7 g de PET y 3 g de NaCl por cada membrana.
- Mezcla de materia prima: se llevó a cabo en *beaker* con una espátula hasta homogenizar.

- Distribución de la mezcla homogenizada en el molde de acero inoxidable: este molde consistió de un aro con un diámetro de tres pulgadas y una base plana cuadrada con 4 pulgadas por lado, ambos de acero inoxidable. Se colocó papel encerado para que la membrana se pudiera retirar del molde. Además se utilizó un molde circular con superficie plana de madera para compactar el material ya distribuido adentro del aro. Este se fabricó en el Laboratorio de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII).
- Pre calentamiento del horno: la temperatura de pre calentamiento fue de 280 °C. Se realizó a una temperatura mayor a la de sinterización, ya que al introducir el molde con la mezcla al horno hay una disminución de temperatura.
- Introducción del molde al horno: se introduce el molde con el material con sumo cuidado para evitar que este se derrame. Se inició a contar el tiempo de sinterización cuando el horno llegó a una temperatura de 270 °C. La residencia es de 25 minutos. Pasado el tiempo de sinterización se apagó el horno y se esperó a que bajara la temperatura a 100 °C con la puerta cerrada. Luego se retiró el molde del horno y se dejó enfriar a temperatura ambiente. Todo esto se realizó para que la membrana no sufra cambios bruscos de temperatura que puedan afectar su estructura.
- Remoción del papel encerado: se separó el papel encerado de la membrana utilizando la espátula.
- Lavado de membrana: se procedió a lavar la membrana con agua para la eliminación de NaCl.

Es frecuente que los granulos de la mezcla de sinterización sean sometidos a compresión mientras se realiza el proceso a la temperatura determinada. A las membranas preparadas en el presente trabajo no se les ejercicio presión.

Figura 17. **Molde utilizado para la sinterización de cada membrana**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII), Facultad de Ingeniería.

Figura 18. **Membrana resultado de la sinterización**



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOPU), Facultad de Ingeniería, edificio T5.

Figura 19. **Juego de nueve membranas para microfiltración de PET**



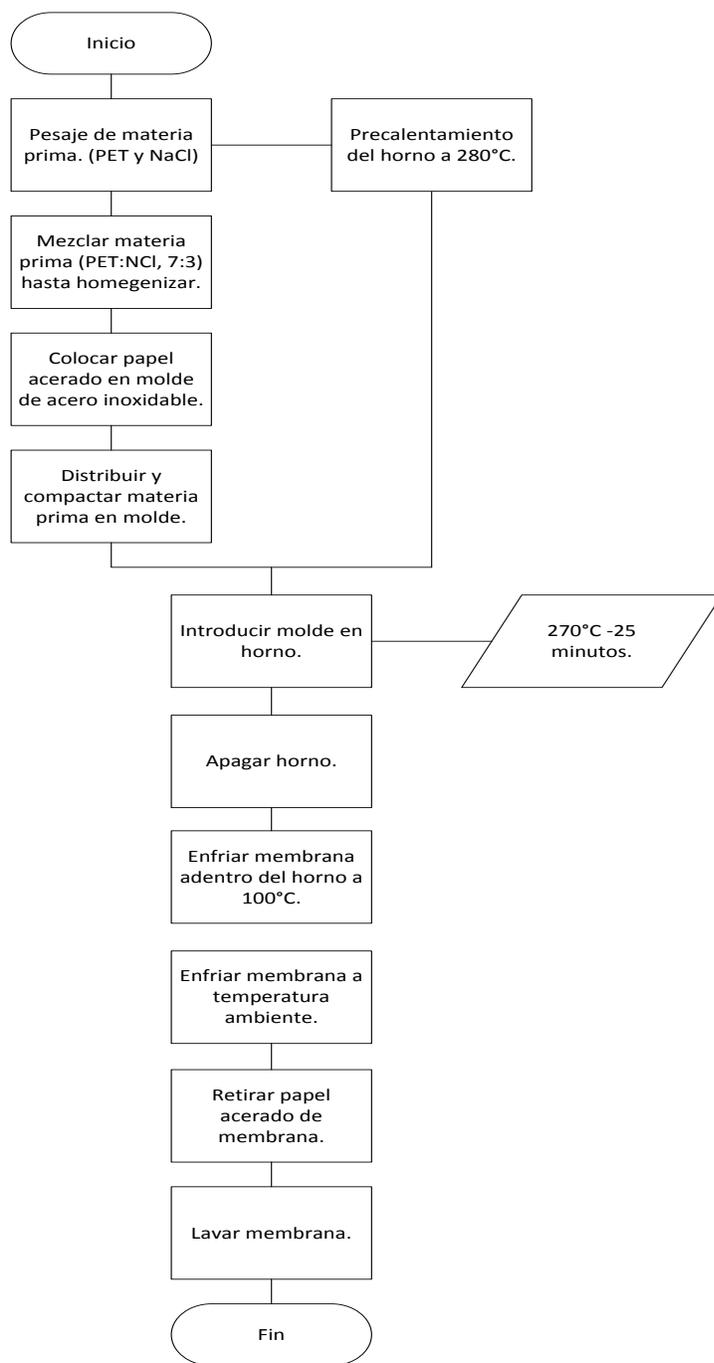
Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOPU), Facultad de Ingeniería, edificio T5.

En la figura 19 se muestra el conjunto completo de las membranas de PET para microfiltración preparadas por el método de sinterización. Estas se utilizarán para el análisis de flujo y separación.

Es importante mencionar las medidas de seguridad seguidas durante la realización del método de sinterización. En el Laboratorio de Tecnología de la Madera se portaron obligatoriamente gafas de seguridad y bata de laboratorio. Además, al introducir y sacar el molde del horno fue necesario usar guantes para altas temperaturas.

El PET puede ser dañino por inhalación, ingestión o por contacto directo con la piel. En consecuencia, cada vez que se manipulan los polvos finos de PET reciclado es necesario utilizar mascarilla y guantes de látex.

Figura 20. Diagrama de proceso de sinterización



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

3.9. Análisis experimental

El desarrollo del análisis experimental es dependiente del diseño del módulo para las membranas sinterizadas de PET reciclado puesto que sin ello es imposible llevarlo a cabo. Asimismo, un mal diseño puede generar fugas en el sistema.

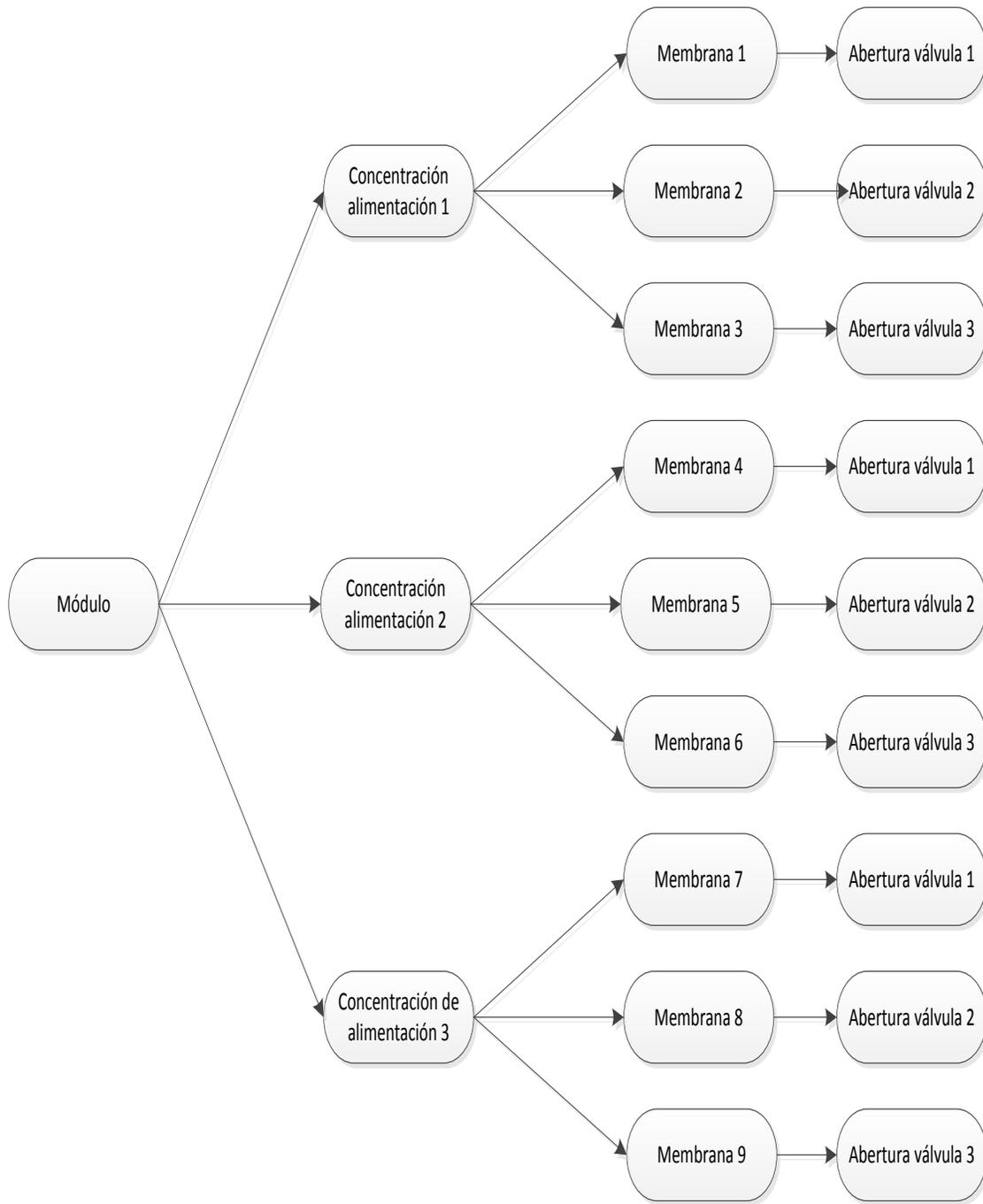
El análisis experimental constó de la determinación del comportamiento de flujo a través de la membrana, retención del analito seleccionado y recuperación. Para ello es necesario variar las condiciones de operación en la unidad experimental.

Se variaron tres veces la concentración de sulfato ferroso (FeSO_4) inicial de alimentación al módulo de la membrana. Además, por cada variación de concentración se varió tres veces la abertura de la válvula de globo del sistema de alimentación. La variación de esta tiene como consecuencia un cambio en el caudal de ingreso al módulo.

Como resultado de la combinación de variables se obtienen nueve tratamientos. En cada uno de estos se utiliza una membrana para evitar el *fouling*. Cada membrana de PET reciclado para microfiltración fue sinterizada bajo las mismas condiciones químicas y físicas, por lo que no representa una variable en el proceso de análisis. El árbol de variables se puede observar en la figura 20.

En el desarrollo de la parte experimental se midieron la concentración de entrada y salida al sistema experimental de módulo de membrana PET a diferentes caudales, para luego calcular las propiedades de la membrana. Los caudales se determinaron midiendo el cambio de volumen en un tiempo.

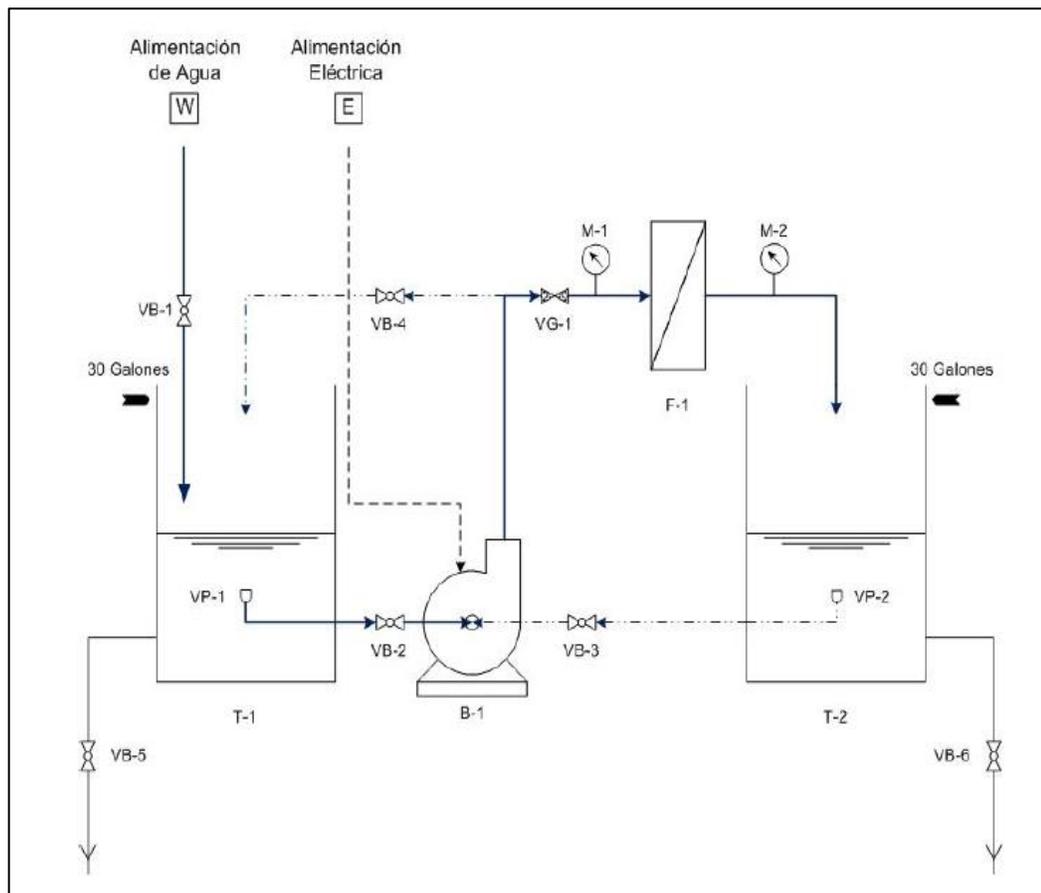
Figura 21. **Árbol de variables**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

La estación experimental para membranas cuenta con una serie de equipos, los cuales permitieron el análisis de retención y flujo a través de la membrana de PET reciclado para microfiltración. Además se aprovechó la ventaja que esta permite el cambio y adaptación de cualquiera de sus partes. En la figura 21 se puede observar el diagrama de dicha estación. Mientras que en la tabla XIV se listan cada una de sus partes.

Figura 22. Diagrama de 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*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 2013. p. 55.

Tabla XIV. **Simbología del diagrama de equipo**

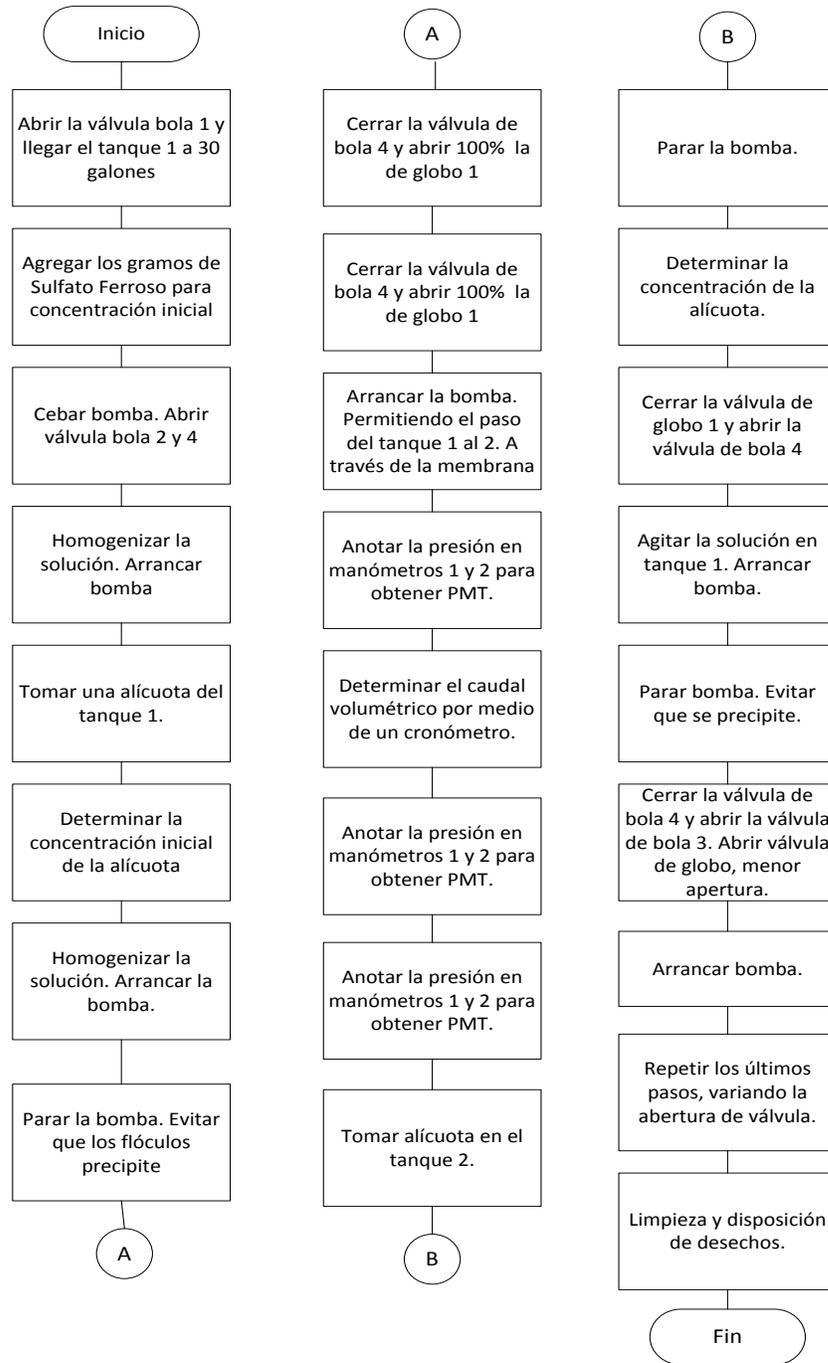
Simbología	
Abreviatura	Equipo
T	Tanque de 30 galones
VB	Válvula de bola ½ pulgada
VG	Válvula de globo ½ pulgada
VP	Válvula de pie ½ pulgada
M	Manómetro de Bourdon de 0-100 psi
B	Bomba centrífuga de ½ hp y 120 V
F	Módulo de membrana para microfiltración de PET
W	Alimentación de agua
E	Alimentación eléctrica
	Tubería de agua ½ pulgada
	Tubería de agua de recirculación ½ pulgada
	Cableado eléctrico de calibre 10
	Drenaje ½ pulgada

Fuente: ARANA VALENZUELA, Edgar Alejandro. *Instalación de estación experimental e implementación de práctica de laboratorio para el curso de Separación por Membranas Selectivas*. p. 56.

Para calcular la retención y otras propiedades de la membrana es necesario utilizar una sustancia problema de fácil determinación, por esta razón se utilizó una solución de sulfato ferroso heptahidratado (FeSO_4). Debido a que este no se encuentra en el rango de la microfiltración fue necesario utilizar sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) como coagulante. De esta manera se obtuvo una partícula que puede ser retenida por microfiltración.

El desarrollo del proceso de análisis experimental se describe en la figura 22. En donde también se toman en cuenta los procedimientos adecuados para el buen funcionamiento de los equipos.

Figura 23. Proceso de análisis experimental



Fuente: elaboración propia.

Se usó un equipo digital de cuantificación rápida de hierro *checker* HI 721 HANNA instruments® para determinar las concentraciones. El cual se puede observar en la figura 23. El procedimiento de uso de este se encuentra en la sección de anexo 2. Además, las mediciones de presión en el sistema se realizaron por medio de los manómetros ya instalados en la unidad.

Figura 24. **Equipo de medición de hierro**



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOPU), Facultad de Ingeniería, edificio T5.

3.10. **Recolección de la información**

Todos los datos necesarios para cumplir con los objetivos provienen de diferentes procedimientos del proceso, el cual se puede observar en el diseño general.

La preparación previa al sinterizado del polímero de tereftalato de polietileno (PET) es un procedimiento simple. En este solo se requirió reducir el tamaño de partícula del PET con el objetivo de recolectar más material y realizar tamizajes. Sin embargo, se tamizó una cantidad significativa de resina de PET, ya que se prepararon nueve membranas.

Se debe de tomar en cuenta que el tamaño de partícula de resina de PET, reciclado tiene que ser aproximado al tamaño de la sal a utilizar en la mezcla para que el proceso de sinterizado se realice de manera adecuada, esto se logró utilizando el mismo número de *mesh*. Se anotó el *mesh* que mejor se ajustó y con ello se determinó el tamaño de partícula del PET. El utilizado fue de 100 micrones.

Las condiciones de temperatura y tiempo son las más importantes en el proceso de sinterización. En esta parte del procedimiento de experimentación no se recolectaron datos puesto que el rango en el que se encuentran la temperatura y tiempo de sinterización para producir las membranas de microfiltración ya están determinados.

Aun así se realizaron pruebas preliminares para obtener la membrana con mejores propiedades para el desarrollo del análisis experimental (apéndice 1). Los datos de dichas condiciones se registraron y se mantendrán constantes durante la parte experimental para mantener invariables las características de la membrana a utilizar.

En la parte del estudio experimental se ensayó el efecto de las variables de operación en el sistema de módulo propuesto para la membrana para microfiltración de PET. Se mantuvo constante las condiciones de la membrana sinterizada y, el analito y concentración inicial de este.

Para la determinación de las variaciones de concentración se optó por utilizar un equipo *checker* HI 721 HANNA instruments®, ya que brinda resultados rápidos a través de un tratamiento químico sencillo. Asimismo, tiene la ventaja del fácil desecho del reactivo que utiliza.

Luego de fabricar el módulo propuesto para la membrana para microfiltración de PET se procedió a realizar las pruebas variando las condiciones de operación. Con los datos experimentales obtenidos se procedió a generar las curvas de operación y modelar matemáticamente el proceso. El modelo se creó por medio de la ecuación de Darcy:

$$J = k * PTM$$

Donde:

J=flujo de permeado (m^3/s)

k=coeficiente de Darcy ($m^3/s*Pa$)

PTM=presión transmembrana (Pa)

Las ecuaciones de retención, caudal, porcentaje de recuperación y rechazo; junto con la muestra de cálculo se encuentra en el apéndice 1.

3.11. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

El ensayo utilizando el módulo propuesto consistió en una serie de pruebas con las soluciones de sulfato ferroso. Con ellas se calculó características del proceso de separación por membranas selectivas como:

- Retención
- Caudal
- Porcentaje de Recuperación

Estos parámetros se analizarán realizando mediciones de concentración de las soluciones problema en la entrada y la salida de la unidad experimental, y la medición del caudal.

Una vez realizados los ensayos se recopilaron los datos y se procedió a ordenarlos de una manera adecuada con la finalidad de presentarlos de forma gráfica. De esta manera, poder realizar un análisis comparativo de dichos cambios en las condiciones del proceso al variar las condiciones de operación en la estación experimental.

3.11.1. Tamaño del muestreo

Para lograr una mayor confiabilidad en los resultados del experimento, se determinó el número de corridas adecuadas para disminuir los errores. Para determinar el tamaño de la muestra fue necesario tomar en cuenta el costo y el tiempo de la preparación previa de la materia prima y, del uso de los instrumentos y equipo.

En el presente estudio, primero se tomó como variable de control la concentración inicial de la solución a tratar y se varió el caudal del flujo a través de la membrana. Las variaciones del caudal se obtuvieron al variar la abertura de la válvula de globo. Seguidamente se analizaron otras dos concentraciones iniciales. Como resultado, se obtuvieron 9 tratamientos, es decir combinaciones de ensayos de concentración inicial-abertura de válvula.

3.11.2. Tabulación y ordenamiento de los datos

La información recolectada del proceso experimental se ordenó, según se requirió, en tablas simples o cruzadas. Todas estas contienen títulos y las unidades en que se expresa la medición. Se midieron los datos de concentración de alimentación y permeado, caudal de alimentación y permeado; y presión transmembrana.

A continuación se muestran las tablas utilizadas en el proceso de preparación del PET y en la práctica experimental del análisis de separación y flujo.

Tabla XV. **Datos utilizados en la preparación de material PTFE**

Número de <i>mesh</i>	
Tamaño de partícula de PET (μm)	
Masa de polvo de PET (g)	
Masa de cloruro de sodio (g)	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Recolección de datos experimentales**

Concentración de alimentación					
Abertura válvula globo [%]	Cambio de presión PTM	Caudal en tanque 1	Caudal en tanque 2	Concentración alimentación	Concentración en permeado
Abertura de válvula globo 1,1	PTM 1,1	Caudal tanque1 1,1	Caudal tanque2 1,1	Concentración en alimentación	Concentración en permeado 1,1
Abertura de válvula globo 1,2	PTM 1,2	Caudal tanque1 1,2	Caudal tanque2 1,2		Concentración en permeado 1,2
Abertura de válvula globo 1,3	PTM 1,3	Caudal tanque1 1,3	Caudal tanque2 1,3		Concentración en permeado 1,3

Fuente: elaboración propia.

3.11.3. Procesamiento de la información

Con los datos obtenidos a partir de la experimentación, utilizando el módulo para microfiltración de PET, se procedió a calcular diferentes parámetros de operación para membranas. Luego se realizaron gráficas que permitieron el análisis del comportamiento de separación y flujo de la membrana mencionada.

Se calculó: la retención, el porcentaje de recuperación y rechazo, y el flujo en el permeado. Los cuales se recolectaron y ordenaron en la siguiente tabla propuesta. La muestra de cálculo se encuentra en el apéndice 2.

Tabla XVII. **Cálculos realizados en la práctica**

Concentración de alimentación					
Abertura válvula de globo [%]	Cambio Presión PTM	Retención	Porcentaje recuperación [%]	Porcentaje rechazo [%]	Flujo en el permeado [m/s]
Abertura de válvula globo 1,1	PTM 1,1	Retención 1,1	Porcentaje de recuperación 1,1	Porcentaje rechazo 1,1	Flujo en el permeado 1,1
Abertura de válvula globo 1,2	PTM 1,2	Retención 1,2	Porcentaje de recuperación 1,2	Porcentaje rechazo 1,2	Flujo en el permeado 1,2
Abertura de válvula globo 1,3	PTM 1,3	Retención 1,3	Porcentaje de recuperación 1,3	Porcentaje rechazo 1,3	Flujo en el permeado 1,3

Fuente: elaboración propia.

Consecutivamente se procedió a graficar las relaciones:

- Retención *versus* caudal volumétrico.
- El porcentaje de recuperación *versus* el caudal volumétrico.
- El caudal volumétrico *versus* presión transmembrana (PTM). Con el dato de la pendiente de la gráfica se obtuvo el coeficiente de permeabilidad.

3.12. Análisis estadístico

Los cálculos estadísticos se realizarán una vez se hayan terminado de registrar los datos de los análisis. Estos pertenecen a los siguientes grupos de pruebas:

- Medidas de dispersión
- Análisis correlacional
- Regresión

3.12.1. Medidas de dispersión

Son las utilizadas para medir la variabilidad de una serie de datos. Se empleará la desviación estándar para la determinación de la dispersión en las variables de operación.

3.12.2. Análisis correlacional y regresión

El análisis correlacional parte de analizar la dispersión de los resultados obtenidos al estudiar la relación de correspondencia de dos variables. Este análisis será usado para conocer el comportamiento entre las variables de operación en la estación experimental y las variables de separación por medio

de la membrana para microfiltración. La correlación entre las variables estará dada por el coeficiente de correlación.

La regresión será utilizada para mostrar un modelo matemático representativo de la distribución de los resultados obtenidos al comparar cada par de variables. Para fines de simplificación, generalmente se asume una tendencia de comportamiento lineal de los datos debido a que se está estudiando un proceso donde las características deseadas del proceso deben de ser lo más constante posibles, sin embargo, por no conocer la tendencia real que debieran de tener las variables se buscará la regresión de mejor ajuste. Se presentará también el coeficiente de determinación para mostrar el grado de ajuste de los datos a la línea recta obtenida de la regresión lineal.

Se llegará a obtener un modelo lineal de la siguiente forma:

$$Y = a + bX$$

Donde:

Y = valor de la variable dependiente que se desea predecir

a = ordenada en el origen

b = pendiente o inclinación

X = variable independiente

4. RESULTADOS

4.1. Sinterización de un juego de membranas de PET reciclado para MF

Se presenta el juego de nueve membranas sinterizadas a partir de polietileno tereftalato (PET) reciclado para microfiltración (MF) a condiciones de 270 °C y 25 minutos.

Figura 25. Juego de membranas sinterizadas



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOPU), Facultad de Ingeniería, edificio T5.

4.2. Diseño e instalación de un módulo para membrana de PET

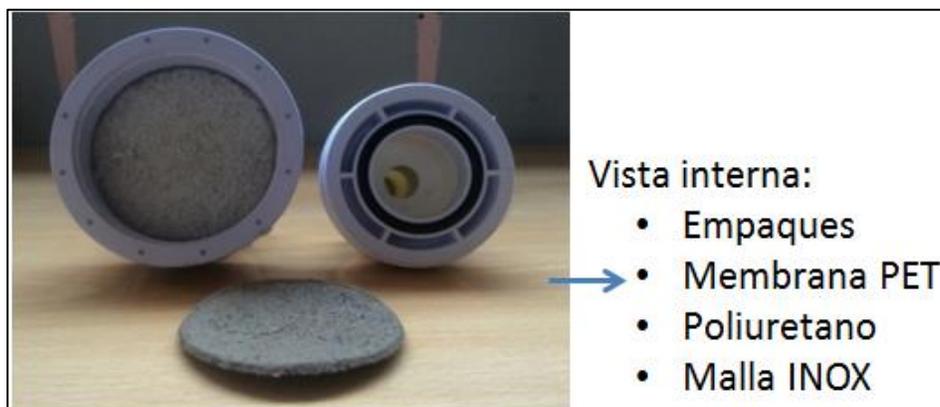
A continuación se muestran los resultados del diseño del módulo para la membrana a partir de PET para microfiltración.

Figura 26. **Módulo de membrana de tereftalato de polietileno**



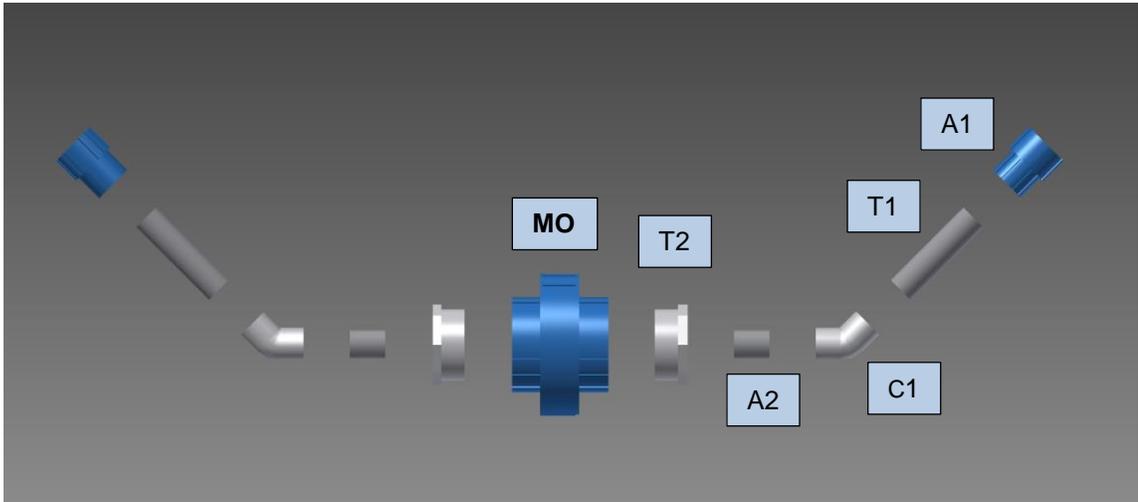
Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOPU), Facultad de Ingeniería, edificio T5.

Figura 27. **Interior de módulo para membrana de PET**



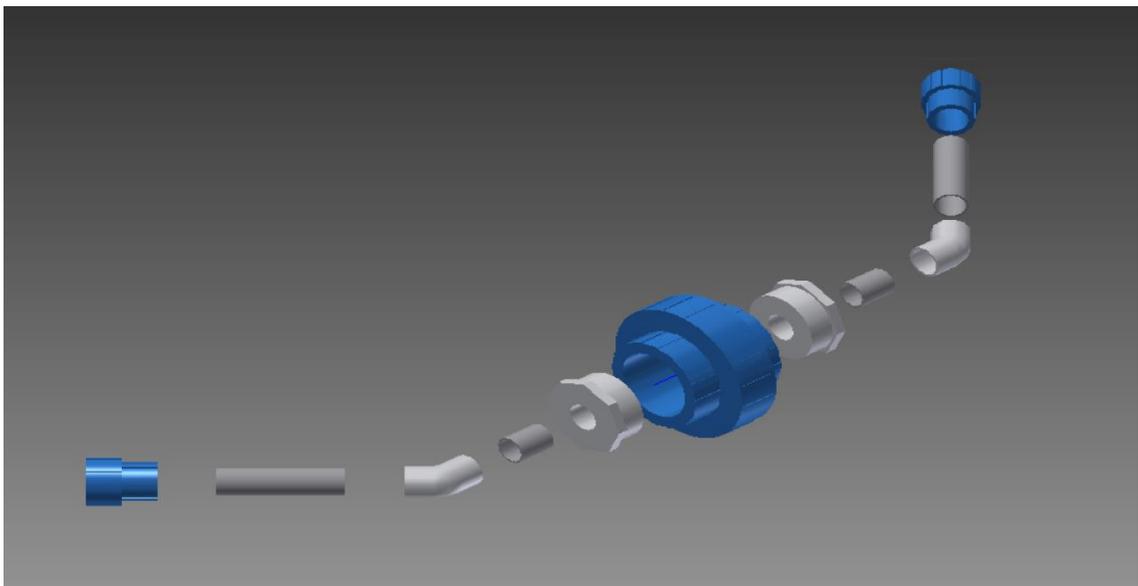
Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOPU), Facultad de Ingeniería, edificio T5.

Figura 28. **Esquema vista frontal de módulo**



Fuente: elaboración propia, con programa Autodesk Inventor.

Figura 29. **Esquema vista isométrica de módulo**



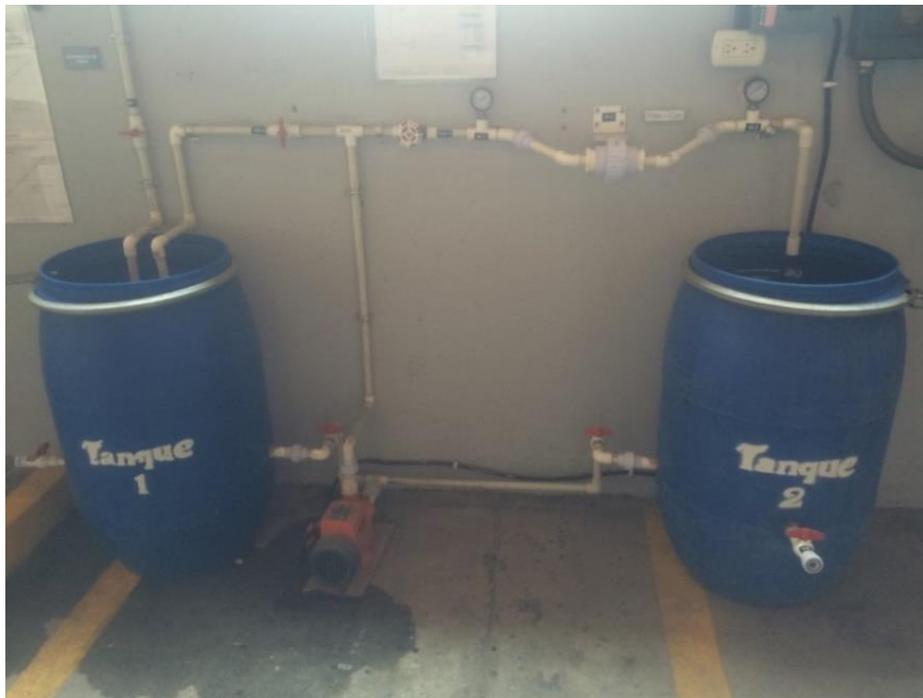
Fuente: elaboración propia, con programa Autodesk Inventor.

Tabla XVIII. Listado de derecha a izquierda de partes del módulo

No.	Código	Nombre
1	A1	Adaptador de tubo PVC de 1/2" ASTMD2466
2	T1	Tubo PVC de 1/2", 14 cm
3	C1	Codo de 45° de PVC de 12mm D2466
4	T2	Tubo de PVC de 1/2", 5cm
5	A2	Adaptador de PVC 1 1/2" - 1/2"
6	MO	PVC-U SCH40 ASTM D2466 1-1/2", 3" de diámetro
7	E	Empaque de hule, evita fugas de agua
8	MPET	Membrana de PET reciclado para MF, Ø=3"
9	P	Material poroso de poliuretano para soporte mecánico, Ø=3"
10	MINOX	Malla de acero inoxidable para soporte mecánico, Ø=3"

Fuente: elaboración propia.

Figura 30. Módulo instalado en la estación experimental



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOPU), Facultad de Ingeniería, edificio T5.

4.3. Cuantificación del flujo, porcentaje de recuperación y retención

En las tablas siguientes se muestran los resultados de las pruebas de retención, porcentaje de recuperación y flujo tomados en la estación experimental utilizando la membrana sinterizada y la solución problema escogida: sulfato ferroso heptahidratado (FeSO_4). Se observa que todas las membranas de PET reciclado para microfiltración retuvieron el analito problema. Además, todas estas tuvieron resultados altos de porcentaje de recuperación.

Tabla XIX. Resultados

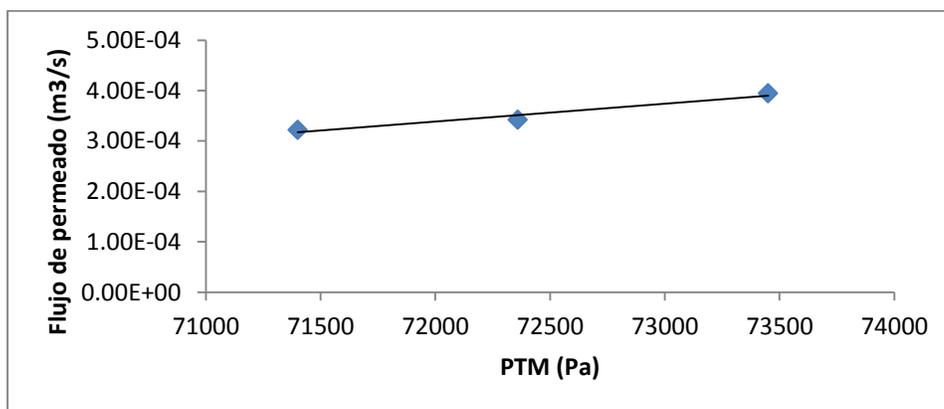
Concentración teórica de alimentación 2 ppm					
Abertura válvula	PTM (Pa)	Retención	Porcentaje recuperación (%)	Porcentaje rechazo (%)	Flujo permeado (m^3/s)
1/8	71400,5	0,2	97,34	2,66	2,69E-03
1/4	72360,1	0,21	96,54	3,46	2,86E-03
3/8	73450,6	0,38	96,76	3,24	3,30E-03
Concentración teórica de alimentación 3,5 ppm					
Abertura válvula	PTM (Pa)	Retención	Porcentaje recuperación (%)	Porcentaje rechazo (%)	Flujo permeado (m^3/s)
1/8	71360,7	0,15	98,39	1,61	2,16E-03
1/4	72230,9	0,57	97,62	2,38	2,68E-03
3/8	73370,4	0,6	92,41	7,59	3,30E-03
Concentración teórica de alimentación 5 ppm					
Abertura válvula	PTM (Pa)	Retención	Porcentaje recuperación (%)	Porcentaje rechazo (%)	Flujo permeado (m^3/s)
1/8	71189,9	0,13	98,88	1,12	2,09E-03
1/4	72167,8	0,22	98,81	1,19	3,27E-03
3/8	73310,1	0,30	98,57	1,43	3,62E-03

Fuente: elaboración propia.

4.4. Modelo matemático del proceso de microfiltración

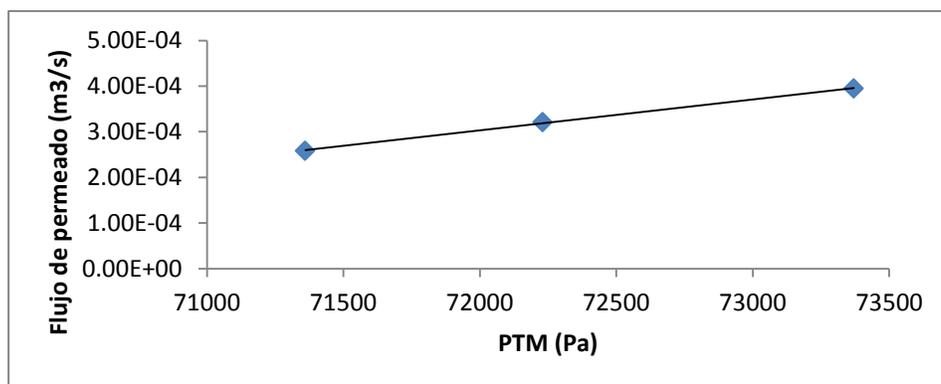
A continuación se presentan los resultados de los modelos matemáticos del proceso de microfiltración a las concentraciones analizadas.

Figura 31. **Gráfica de dispersión a 2 ppm**



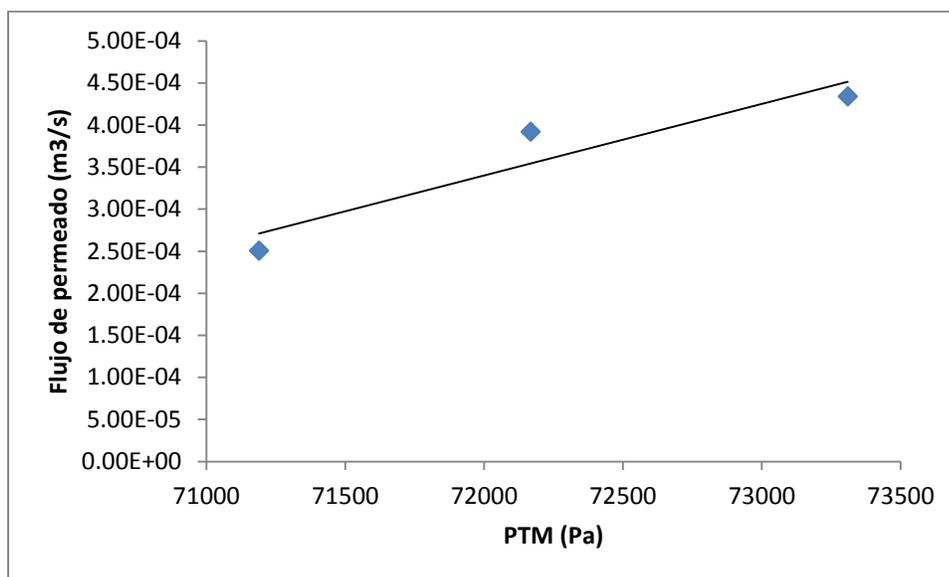
Fuente: elaboración propia.

Figura 32. **Gráfica de dispersión a 3,5 ppm**



Fuente: elaboración propia.

Figura 33. Gráfica de dispersión a 5 ppm



Fuente: elaboración propia.

En las gráficas 31, 32 y 33 se observan rectas lineales crecientes correspondientes a las distribuciones. A continuación se muestra una tabla con un resumen de los modelos matemáticos de separación a diferentes concentraciones de alimentación teórica.

Tabla XX. Modelos de saturación

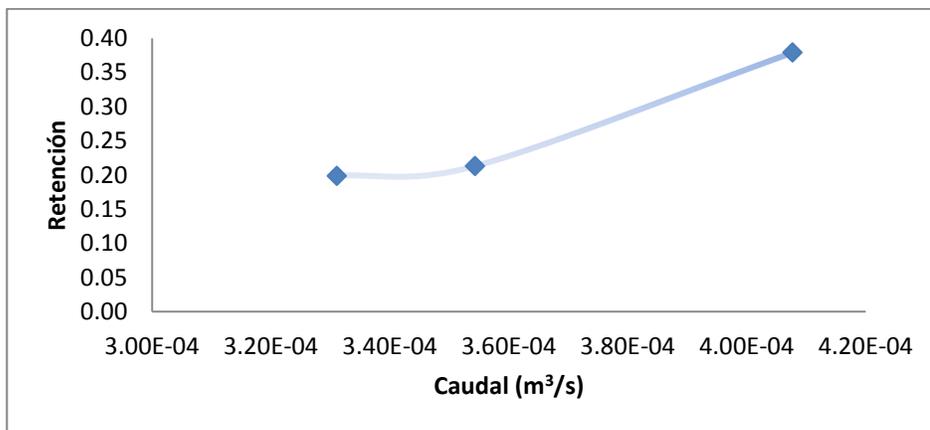
C_a teórica (ppm)	Modelo	Tendencia	Regresión (R^2)
2	$Q_p=4E-08PTM-0.0022$	Líneal positiva	0,953
3,5	$Q_p=7E-08PTM-0.0046$	Líneal positiva	0,9991
5	$Q_p=9E-08PTM-0.0058$	Líneal positiva	0,8838

Fuente: elaboración propia.

4.5. Curvas de operación de membrana de PET reciclado para MF

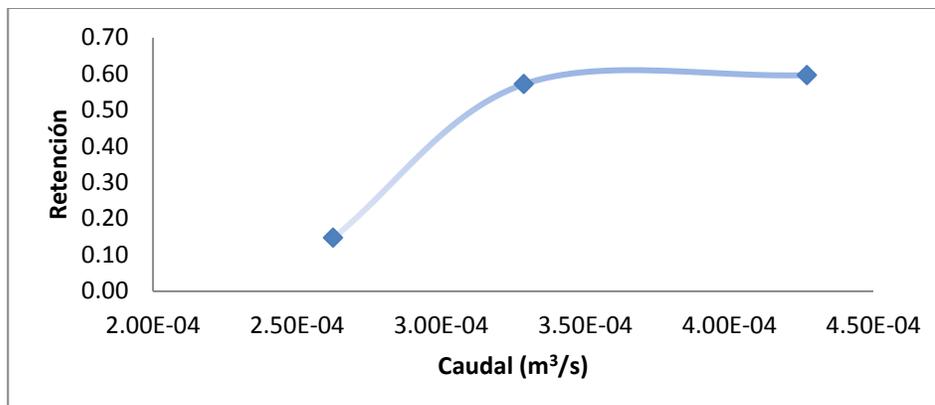
En las siguientes gráficas se exponen las curvas de operación para la membrana de PET reciclado.

Figura 34. Curva de retención a concentración teórica de 2 ppm



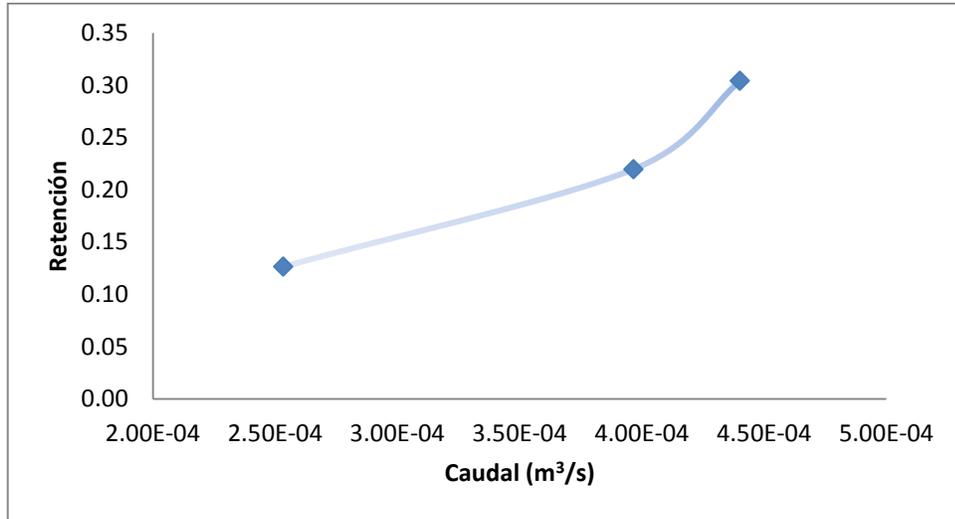
Fuente: elaboración propia.

Figura 35. Curva de retención a concentración teórica de 3,5 ppm



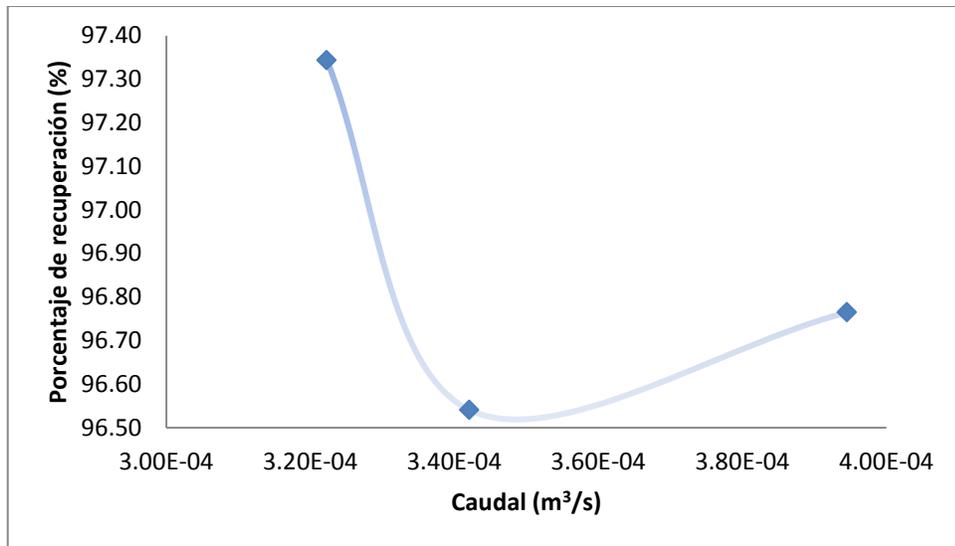
Fuente: elaboración propia.

Figura 36. **Curva de retención a concentración teórica de 5 ppm**



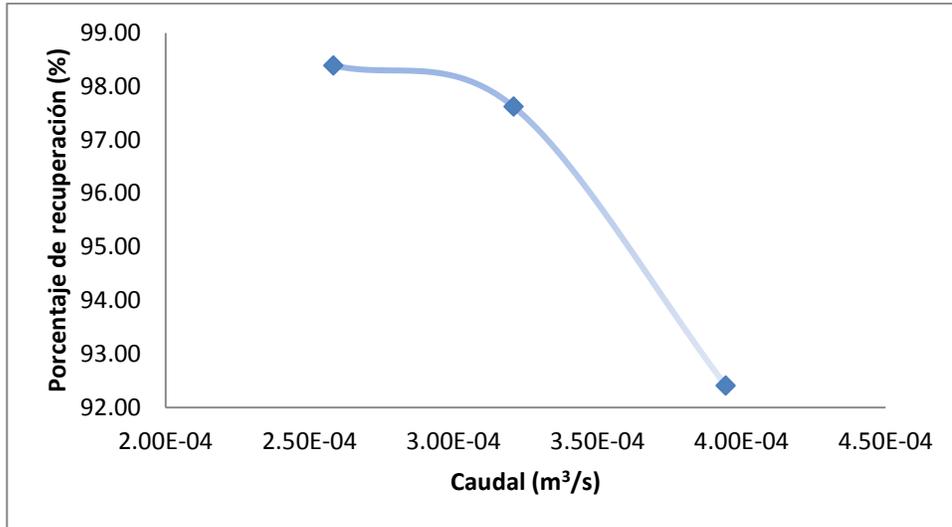
Fuente: elaboración propia.

Figura 37. **Curva de recuperación a concentración teórica 2 ppm**



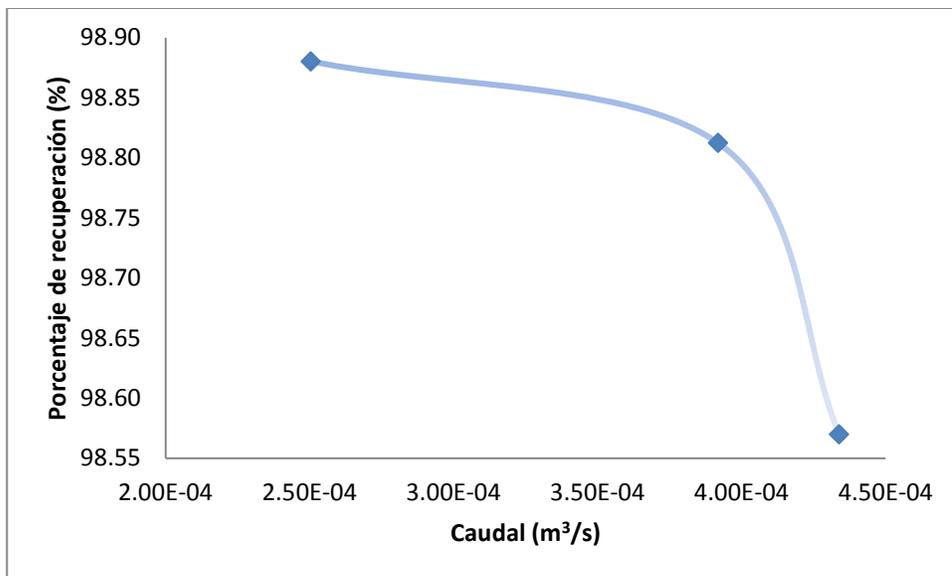
Fuente: elaboración propia.

Figura 38. **Curva de recuperación a concentración teórica 3,5 ppm**



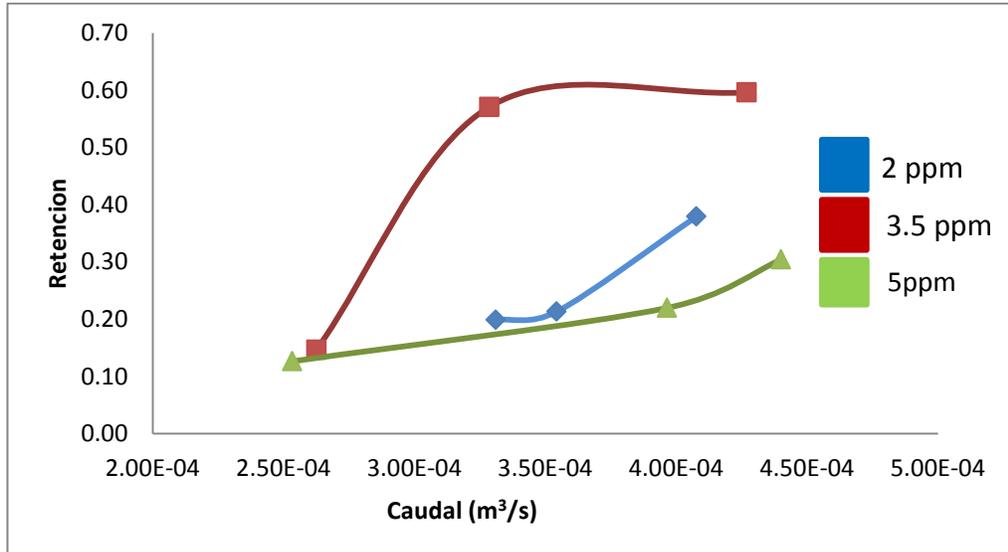
Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Curva de recuperación a concentración teórica 5 ppm**



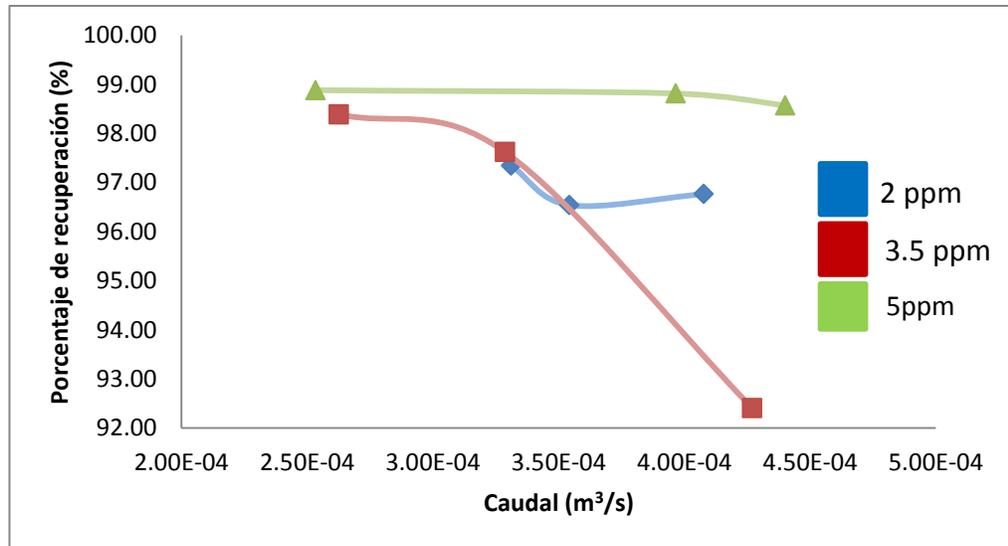
Fuente: elaboración propia.

Figura 40. Comparación de curvas de operación 1



Fuente: elaboración propia.

Figura 41. Comparación de curvas de operación 2



Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Se elaboró un juego de nueve membranas por el método de sinterización a partir de polietileno tereftalato (PET) reciclado para microfiltración (MF), a condiciones de 270 °C, 25 minutos y proporciones de materia 7:3 (PET:NaCl). Estas condiciones de sinterización fueron las que proporcionaron los mejores resultados según las pruebas preliminares (apéndice 1). Cada una de las membranas tiene las dimensiones necesarias para que se ajuste al módulo diseñado y de esta manera realizar las pruebas experimentales.

La estación experimental para membranas ubicada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química, Usac está construida con un conjunto de equipos que permiten la realización de las pruebas (sección 3.9). Para que el módulo fuera adaptable a esta, se eligió como material para su fabricación PVC, ya que tiene la ventaja de que existen en el mercado variedad de equipo, en tamaño y forma, es de fácil adquisición y bajo costo.

El módulo para la membrana de tereftalato de polietileno consta de adaptadores para tubería de PVC, codos de 45°, un tubo de PVC de ½ pulgada de 60° para alimentación, un módulo de marco y plato de forma cilíndrica de 3 pulgadas de diámetro, y un tubo de PVC de ½ pulgada de 60° para el permeado. En la parte interior se dispone de empaques que impiden que haya fugas de la solución a separar. También una rejilla de acero inoxidable y material poroso de poliuretano, lo cual le brinda soporte mecánico a la membrana. La parte interna se puede observar en la figura 24.

Los empaques internos y la estructura del módulo permiten que el flujo de la solución a analizar pase exclusivamente a través del área de la membrana. . Asimismo, se añadió cinta de teflón en la parte enroscable para evitar fugas de la alimentación. La tapadera enroscable representa una ventaja del módulo, ya que permite cambiar fácilmente la membrana de PET para microfiltración. El módulo instalado en la estación experimental se puede observar en la figura 29.

Los resultados de las pruebas experimentales muestran que todas las membranas de PET reciclado para microfiltración retienen sulfato ferroso (FeSO_4). Además, independientemente de la concentración inicial, se muestra que a mayor caudal aumenta la retención. Las condiciones de 3,5 ppm de concentración de alimentación y $3/8$ de abertura de válvula, obtuvieron el mayor resultado de retención, siendo 0,6. Esto quiere decir que la membrana retiene hasta el 60 % de la concentración inicial de sulfato ferroso.

El porcentaje de recuperación es una medida de la conversión del caudal de aportación que llega a las membranas al caudal de permeado. Las membranas de PET reciclado para microfiltración muestran un porcentaje de recuperación arriba del 90 %. El mayor valor es de 98,88 %, a las condiciones de 5 ppm de concentración de alimentación y $1/8$ de abertura de válvula. También se observa que la retención es inversamente proporcional al porcentaje de retención.

Los resultados de flujo de permeado para todos los tratamientos se encuentran en un rango de $2,09\text{E}-03$ a $3,62\text{E}-03$ m^3/s . Se observa que el flujo de permeado aumenta mientras aumenta el porcentaje de abertura de la válvula de globo.

Asimismo, que mientras aumenta la concentración inicial de sulfato ferroso disminuye el flujo en el permeado. Lo cual puede suceder por un proceso de *fouling*.

El modelo matemático del proceso de microfiltración para las membranas de PET reciclado, flujo de permeado *versus* presión transmembrana, muestra una tendencia lineal positiva sin importar la concentración inicial de sulfato ferroso (FeSO_4).

CONCLUSIONES

1. Se preparó un juego de membranas de tereftalato de polietileno (PET) reciclado para microfiltración por el método de sinterización a condiciones de 270 °C, 25 minutos y proporción 7:3 (PET:NaCl)
2. Se diseñó e instaló un módulo adaptable a una membrana de tereftalato de polietileno (PET) para microfiltración.
3. Todas las membranas de PET reciclado para microfiltración retienen el analito de sulfato ferroso. El dato mayor de retención fue a las condiciones de 3,5 ppm de concentración de alimentación y abertura de válvula de 3/8, siendo 0,6.
4. El mayor porcentaje de recuperación de todas las membranas es de 98,88, y se obtuvo a las condiciones de concentración de alimentación de 5 ppm y abertura de válvula de ¼.
5. La retención de las membranas de PET reciclado para microfiltración es inversamente proporcional al porcentaje de recuperación de la misma.
6. Los modelos matemáticos del proceso de microfiltración (flujo de permeado *versus* PTM) a las tres concentraciones de alimentación (2, 3.5 y 5 ppm), tienen un comportamiento lineal.

7. El flujo en el permeado de la membrana de PET reciclado para microfiltración aumenta, conforme el caudal en las concentraciones de alimentación de 2, 3.5, 5 ppm de sulfato ferroso.
8. La retención en la membrana de PET reciclado para microfiltración aumenta, conforme el caudal en las concentraciones de alimentación de 2, 3.5, 5 ppm de sulfato ferroso.
9. El porcentaje de recuperación en la membrana de PET reciclado para microfiltración disminuye, conforme aumenta el caudal en las concentraciones de alimentación de 2, 3.5, 5 ppm de sulfato ferroso.

RECOMENDACIONES

1. Emplear un tamiz más pequeño en el análisis granulométrico de la preparación del material PET previo a la sinterización. Esto con el objetivo que reducir el tamaño del poro de la membrana para microfiltración. Además se espera que esto mejore la formación de enlaces o puentes de materia en el método de sinterización.
2. Someter a un proceso de secado la sal que actúa como agente formadora de poros, puesto que esta también contiene humedad. La humedad proveniente de la sal puede fomentar el proceso de hidrólisis en el método de sinterización, lo cual repercute de forma negativa en el método de sinterización.
3. Realizar el método de sinterización utilizando un molde que le pueda someter presión a la mezcla de material PET-sal. De esta manera se espera que se reduzca el grosor de la membrana producida.
4. Utilizar aluminio para la construcción del molde de sinterización de la membrana de PET, ya que este tiene una mayor conductividad térmica.
5. Diseñar un módulo para la membrana de PET reciclado para microfiltración que sea de filtración tangencial en lugar de filtración directa. Por consiguiente, se espera minimizar el ensuciamiento de la misma.

6. Aumentar el área de filtración en el módulo colocando una serie de membranas para microfiltración sinterizadas de PET reciclado. Con ello realizar un análisis experimental con una solución diseñada para tal efecto; cuantificando la retención, el flujo y la recuperación.

7. Realizar pruebas de acondicionamiento del agua por medio de un proceso de separación usando las membranas de PET reciclado para microfiltración.

BIBLIOGRAFÍA

1. ÁLVAREZ, Mariano. *Tecnología de los plásticos*. México: 2011, [en línea] <<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/pet.html>> [Consulta: enero de 2014].
2. AYRES, Gilbert. *Análisis químico cuantitativo*. 2a ed. Madrid: HARLA, 1970. 854 p.
3. BAKER, R.W. *Membrane technology and applications*. California: John Wiley & Sons, Inc., 2000. 449 p.
4. _____. et. al. *Membrane separation systems recent developments and future directions*. New Jersey: Noyes Data Corporation, 1991. 449 p.
5. BELTRÁN, Maribel; MARCILLA, Antonio. *Tecnología de los polímeros. Procesado y propiedades*. España: Publicaciones Universidad de Alicante, 2012. 244 p.
6. BILURBINA, Alter Luis; LIESA MESTRES, Francisco; IRIBARREN LACO, José Ignacio. *Corrosión y protección*. Barcelona: Edicions UPC S.L., 2004. 278 p.
7. BILLMEYER JR., Fred W. *Ciencia de los polímeros*. Barcelona: Reverté, 1975. 581 p.

8. BRUNATTI, Carlos; MARTÍN, Ana María. *Introducción a la espectroscopía de absorción molecular ultravioleta, visible e infrarrojo cercano*. Argentina: [en línea] <<https://materias.fi.uba.ar/6305/download/Espectrofotometria.pdf>> [Consulta: septiembre de 2014].
9. CEMBRERO CIL, Jesús. et al. *Ciencia y tecnología de los materiales: problemas y cuestiones*. Madrid: Pearson Educación, 2005. 165 p.
10. Enka de Colombia S. A. *Hoja de seguridad. Resina de poliéster*. Medellín, Colombia: 2011, [en línea] <<http://www.enka.com.co/enka/index.php/es/content/download/161/1924/file/HOJA+DE+SEGURIDAD+Resina+PES.pdf>> [Consulta: mayo de 2015].
11. FERRER GIMÉNEZ, Carlos; AMIGÓ BORRÁS, Vicente. *Tecnología de los materiales*. Valencia: Editorial Universidad Politécnica de Valencia, 2003. 560 p.
12. GUIZARD, Christian. *Clasificación de las membranas y de los procesos que la utilizan*. Colombia: Universidad de los Andes, 1999. 34 p.
13. HANNA instruments®. *Manual de producto checker HI 721 HANNA instruments®*. México: 2012, [en línea] < <http://www.hannainst.com.gt/informacion-y-descargas/item/ficha-tecnica-hi-721-checker-de-hierro>> [Consulta: mayo de 2015].
14. HERNÁNDEZ, A. et. al. *Microfiltración, ultrafiltración y osmosis inversa. Procesos de transporte y separación. Volumen 4*. Madrid: Universidad de Murcia, 1990. 139 p.

15. HSIEH, H.P. *Inorganic Membranes for Separation and Reaction*. Membrane science and Technology, Serie 3. Amsterdam: ELSEVIER B. V., 1996. 587 p.
16. Industrias JQ. *Plásticos para ingeniería*. Buenos Aires: 2013, [en línea] <<http://www.jq.com.ar/Imágenes/Productos/PET/dtecnicos/dtecnicos.html>> [Consulta: 10 de octubre 2014].
17. MANO, João F. *Propiedades térmicas de los materiales en la enseñanza de la ciencia de materiales e ingeniería - estudios DSC sobre poli(tereftalato de etileno)*. Journal of Materials Education. Volumen 25. Número 4-6. Toluca: Universidad Autónoma del Estado de México, 2003. 16 p.
18. MILLER, José Carlos. *Estadística para química analítica*. 2a ed. Londres: Addison-Wesley, 1998. 135 p.
19. MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos aplicada*. 4a ed. México: Prentice-Hall, 1996. 528 p.
20. MULDER, Marcel. *Basic principles of membrane technology*. Países Bajos: Kluwer Academic Publishers, 1996. 557 p.
21. NIEVES CIFUENTES. *Tratamiento del agua con membranas*. Madrid: Escuela de Organización Industrial, 2010, [en línea] <<http://www.eoi.es/savia/documento/eoi-45515/tratamiento-del-agua-comembranas>> [Consulta: mayo de 2015].

22. PALACIO MARTÍNEZ, Laura. *Caracterización estructural y superficial de las membranas microporosas*. España: Universidad de Valladolid, 1999. 331 p.
23. PORTER, Mark C. *Handbook of industrial membrane technology*. New Jersey: Noyes Publication, 1990. 594 p.
24. SOTO, Arcadio. *Aplicación de la tecnología de membranas de nanofiltración y ósmosis inversa para el tratamiento de disoluciones acuosas de compuestos fenólicos y ácidos carboxílicos*. España: Universidad Rey Juan Carlos, 2008. 237 p.
25. ST Automatismo Total®. *Información técnica PET* [en línea]. Argentina: 2010, <http://www.st-1.com.ar/info/Informacion_de_PET.pdf> [Consulta: junio 2015].
26. WAGNER, Jorgen. *Membrane filtration handbook. Practical tips and hints*. USA: Osmonics Inc., 2001. 120 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Pruebas preliminares de sinterización

Tabla A1. Condiciones pruebas preliminares de sinterización

Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Temperatura (°C)	275	280	275	270	270	270	270	270	270	270
Tiempo (minutos)	20	22	30	30	10	10	10	13	25	25
Proporción PET:NaCl	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	3:2	7:3
Masa mezcla (g)	4	4	4	4	6	8	8	10	10	10

Fuente: elaboración propia.

Tabla A2. Observaciones pruebas preliminares de sinterización

Prueba	Observación
1	No se lleva a cabo la sinterización en los extremos.
2	Se aumenta temperatura. Se funde el material, no existe porosidad.
3	Se aumenta tiempo. Se funde el material, no existe porosidad.
4	Se disminuye temperatura. Se funde el material, no existe porosidad.
5	Se aumenta masa de mezcla. Demasiados espacios libres.
6	Se aumenta masa de mezcla. No se realiza sinterización en extremos
7	Se funde la parte superior, no se lleva a cabo sinterización en inferior.
8	Se aumenta masa de mezcla y tiempo. No se realiza la sinterización
9	Se aumenta tiempo y cambia proporción. Existen poros muy grandes.
10	Se cambia la proporción de mezcla. Membrana con poros de tamaño adecuado.

Fuente: elaboración propia.

Figura A1. **Prueba preliminar de sinterización 1**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, CII.

Figura A2. **Prueba preliminar de sinterización 2**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, CII.

Figura A3. **Prueba preliminar de sinterización 3**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, CII.

Figura A4. **Prueba preliminar de sinterización 4**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, CII.

Figura A5. **Prueba preliminar de sinterización 5**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, CII.

Figura A6. **Prueba preliminar de sinterización 6**



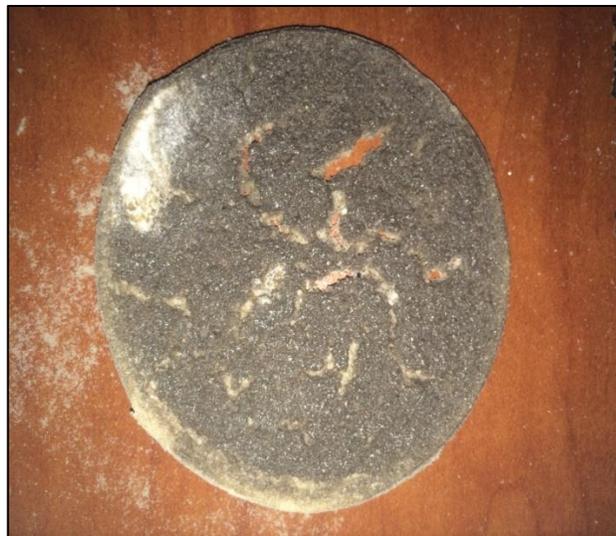
Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, CII.

Figura A7. Prueba preliminar de sinterización 7



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, CII.

Figura A8. Prueba preliminar de sinterización 8



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, CII.

Figura A9. **Prueba preliminar de sinterización 9**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, CII.

Figura A10. **Prueba preliminar de sinterización 10**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, CII.

Apéndice 2. Muestra de cálculo

Ecuación 1. Caudal volumétrico

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

Donde

Q: caudal volumétrico (m³/s)

V: volumen de líquido (m³)

t: tiempo (s)

Ejemplo: cálculo del caudal de alimentación a 2 ppm y 1/8 de abertura.

$$\dot{Q} = \frac{V}{t} = \frac{7,57E - 03 \text{ m}^3}{22,7 \text{ s}} = 3,33E - 04 \text{ m}^3/\text{s}$$

Nota: de la misma manera se calculó el resto de caudales, véase tablas A5-A7.

Ecuación 2. Área superficial de membrana

$$A_m = \pi r_m^2$$

Donde

A_m: área membrana (m²)

r_m: radio de membrana (m)

Ejemplo: cálculo del área de la membrana.

$$A_m = \pi(0,0381)^2 = 0,1197\text{m}^2$$

Nota: se utilizó el mismo cálculo para todas las membranas.

Ecuación 3. **Velocidad de flujo**

$$v = \frac{Q}{A}$$

Donde

v: velocidad de flujo (m/s)

Q: caudal volumétrico (m³/s)

A: área (m²)

Ejemplo: cálculo de la velocidad de flujo a 2 ppm y 1/8 de abertura.

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{3,33\text{E} - 0,4 \text{ m}^3/\text{s}}{0,1197\text{m}^2} = 2,68\text{E} - 3 \text{ m/s}$$

Nota: de la misma manera se calcularon los demás datos, véase tabla XIX.

Ecuación 4. **Presión transmembrana**

$$\text{PTM} = \frac{P_a + P_s}{2}$$

Donde

PTM: presión transmembrana

P_a : presión de alimentación

P_p : presión de permeado

P_s : presión de salida

Ejemplo: cálculo del caudal de alimentación a 2 ppm y 1/8 de abertura.

$$PTM = \frac{P_a + P_s}{2} = \frac{37,000 + 34400,5}{2} = 71400,5$$

Nota: de la misma manera se calcularon las demás PTM, véase tabla XIX.

Ecuación 5. Retención

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

Donde

R_t : retención

$[Fe]_{ra}$: concentración alimentación (ppm)

$[Fe]_p$: concentración en el permeado (ppm)

Ejemplo: cálculo de la retención a 2 ppm y 1/8 de abertura.

$$R_t = \frac{[Fe]_{ra} - [Fe]_p}{[Fe]_{ra}} = \frac{1,85 - 1,48}{1,85} = 0,2$$

Nota: de la misma manera se calcularon los demás datos de retención, véase tabla XIX.

Ecuación 6. **Porcentaje de recuperación**

$$P_{\text{recuperación}} = \frac{Q_a}{Q_p} \times 100$$

Donde

$P_{\text{recuperación}}$: porcentaje de recuperación

Q_a : caudal de alimentación

Q_p : caudal de permeado

Ejemplo: cálculo de la recuperación a 2 ppm y 1/8 de abertura.

$$P_{\text{recuperación}} = \frac{Q_a}{Q_p} \times 100 = \frac{3,31\text{E} - 04}{3,22\text{E} - 04} \times 100 = 97,34\%$$

Nota: de la misma manera se calcularon los demás datos de presión transmembrana, véase tabla XIX.

Ecuación 7. **Porcentaje de rechazo**

$$P_{\text{rechazo}} = \frac{Q_a - Q_p}{Q_a} \times 100$$

Donde

P_{rechazo} : porcentaje de rechazo

Q_a : caudal de alimentación

Q_p : caudal de permeado

Ejemplo: cálculo del rechazo a 2 ppm y 1/8 de abertura.

$$P_{\text{rechazo}} = \frac{Q_a - Q_p}{Q_a} \times 100 = \frac{3,31E - 04 - 3,22E - 04}{3,31E - 04} \times 100 = 2,66\%$$

Nota: de la misma manera se calcularon los demás datos de porcentaje de rechazo, véase tabla XIX.

Ecuación 8. **Media aritmética**

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Donde

\bar{x} : valor promedio de las mediciones

x_i : valor de cada una de las mediciones

n : número de mediciones

Ejemplo: cálculo de la media aritmética de la concentración de hierro en el permeado, se realizó con el programa de hoja de cálculo Microsoft Excel de Microsoft Office 2010.

$$\bar{x} = \left(\frac{1,47 \text{ ppm} + 1,48 \text{ ppm} + 1,49 \text{ ppm}}{3} \right) = 1,48 \text{ ppm}$$

Nota: de la misma manera se calcularon los demás datos de media aritmética, véase datos calculados.

Ecuación 9. **Desviación estándar**

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

Donde

\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 de la concentración de hierro en el permeado, este se realizó con el programa de hoja de cálculo Microsoft Excel de Microsoft Office 2010.

$$s^2 = \sqrt{\left[\frac{(1,47 - 1,48)^2 + (1,48 - 1,48)^2 + (1,49 - 1,48)^2}{3} \right]} ppm$$

$$s^2 = 0,01 ppm$$

Nota: de la misma manera se calcularon los demás datos de desviación estándar, véase datos calculados.

Ecuación 10. **Ecuación de Darcy**

$$J = P_i * PTM = \frac{PTM}{\mu * R_{rot}}$$

Donde

J: flujo de permeado (m^3/s)

P_i : coeficiente de permeabilidad

PTM: presión transmembrana

μ : viscosidad

R_{rot} : resistencia total de la membrana

Apéndice 3. **Datos calculados**

Tabla A3. **Concentraciones de hierro en el permeado**

Concentración teórica de alimentación 2ppm					
1/8 de abertura		1/4 de abertura		3/8 de abertura	
Corrida	[Fe]_p (ppm)	Corrida	[Fe]_p (ppm)	Corrida	[Fe]_p (ppm)
1	1,47	1	1,5	1	1,19
2	1,48	2	1,44	2	1,1
3	1,49	3	1,42	3	1,15
Promedio	1,48	Promedio	1,45	Promedio	1,15
Desviación	0,01	Desviación	0,04	Desviación	0,05
Concentración teórica de alimentación 3.5 ppm					
1/8 de abertura		1/4 de abertura		3/8 de abertura	
Corrida	[Fe]_p (ppm)	Corrida	[Fe]_p (ppm)	Corrida	[Fe]_p (ppm)
1	2,92	1	1,36	1	1,39
2	2,96	2	1,56	2	1,4
3	2,93	3	1,51	3	1,38
Promedio	2,94	Promedio	1,48	Promedio	1,39
Desviación	0,02	Desviación	0,10	Desviación	0,01
Concentración teórica de alimentación 5ppm					
1/8 de abertura		1/4 de abertura		3/8 de abertura	
Corrida	[Fe]_p (ppm)	Corrida	[Fe]_p (ppm)	Corrida	[Fe]_p (ppm)
1	4,2	1	3,87	1	3,39
2	4,25	2	3,9	2	3,37
3	4,28	3	3,6	3	3,38
Promedio	4,24	Promedio	3,79	Promedio	3,38
Desviación	0,04	Desviación	0,17	Desviación	0,01

Fuente: elaboración propia.

Tabla A4. Caudales de alimentación

Concentración teórica de alimentación 2 ppm							
Corrida	V (m³)	1/8 de abertura		1/4 de abertura		3/8 de abertura	
		t (s)	Q_a (m³/s)	t (s)	Q_a (m³/s)	t (s)	Q_a (m³/s)
1	7,57E-03	22,7	3,33E-04	21,4	3,54E-04	18,7	4,05E-04
2		22,8	3,32E-04	21,6	3,50E-04	18,4	4,11E-04
3		23,1	3,28E-04	21,1	3,59E-04	18,6	4,07E-04
Promedio		22,87	3,31E-04	21,37	3,54E-04	18,57	4,08E-04
Desviación		2,08E-01	3,00E-06	2,52E-01	4,18E-06	1,53E-01	3,36E-06
Concentración teórica de alimentación 3.5 ppm							
Corrida	V (m³)	1/8 de abertura		1/4 de abertura		3/8 de abertura	
		t (s)	Q_a (m³/s)	T (s)	Q_a (m³/s)	T (s)	Q_a (m³/s)
1	7,57E-03	28,7	2,64E-04	22,9	3,31E-04	17,6	4,30E-04
2		29,0	2,61E-04	23,1	3,28E-04	17,5	4,33E-04
3		28,8	2,63E-04	23,1	3,28E-04	18,1	4,18E-04
Promedio		28,83	2,63E-04	23,03	3,29E-04	17,73	4,27E-04
Desviación		1,53E-01	1,39E-06	1,15E-01	1,65E-06	3,21E-01	7,67E-06
Concentración teórica de alimentación 5 ppm							
Corrida	V (m³)	1/8 de abertura		1/4 de abertura		3/8 de abertura	
		t (s)	Q_a (m³/s)	t (s)	Q_a (m³/s)	t (s)	Q_a (m³/s)
1	7,57E-03	29,5	2,51E-04	19,3	3,92E-04	17,1	4,43E-04
2		29,9	2,53E-04	18,87	4,01E-04	17,0	4,45E-04
3		29,6	2,56E-04	19,1	3,96E-04	17,5	4,33E-04
Promedio		29,67	2,53E-04	19,09	3,97E-04	17,20	4,40E-04
Desviación		2,08E-01	2,37E-06	2,15E-01	4,47E-06	2,65E-01	6,72E-06

Fuente: elaboración propia.

Tabla A5. Caudales en el permeado

Concentración teórica de alimentación 2 ppm							
Corrida	V (m ³)	1/8 de abertura		1/4 de abertura		3/8 de abertura	
		t (s)	Q _p (m ³ /s)	t (s)	Q _p (m ³ /s)	t (s)	Q _p (m ³ /s)
1	7,57E-03	23,94	3,16E-04	22	3,44E-04	19,9	3,80E-04
2		22,95	3,30E-04	21,9	3,46E-04	18,7	4,05E-04
3		23,6	3,21E-04	22,5	3,36E-04	19	3,98E-04
Promedio		23,50	3,22E-04	22,13	3,42E-04	19,20	3,95E-04
Desviación		5,03E-01	6,94E-06	3,21E-01	4,93E-06	6,24E-01	1,27E-05
Concentración teórica de alimentación 3.5 ppm							
Corrida	V (m ³)	1/8 de abertura		1/4 de abertura		3/8 de abertura	
		t (s)	Q _p (m ³ /s)	t (s)	Q _p (m ³ /s)	t (s)	Q _p (m ³ /s)
1	7,57E-03	29,42	2,57E-04	23,95	3,16E-04	18,1	4,18E-04
2		29,0	2,61E-04	23,75	3,19E-04	17,9	4,23E-04
3		29,5	2,57E-04	23,1	3,28E-04	18,4	4,11E-04
Promedio		29,31	2,58E-04	23,60	3,21E-04	18,13	4,18E-04
Desviación		2,69E-01	2,38E-06	4,44E-01	6,09E-06	2,52E-01	5,78E-06
Concentración teórica de alimentación 5 ppm							
Corrida	V (m ³)	1/8 de abertura		1/4 de abertura		3/8 de abertura	
		t (s)	Q _p (m ³ /s)	t (s)	Q _p (m ³ /s)	t (s)	Q _p (m ³ /s)
1	7,57E-03	30	2,52E-04	19,6	3,86E-04	17,9	4,23E-04
2		31	2,44E-04	18,87	4,01E-04	16,8	4,51E-04
3		29,7	2,55E-04	19,5	3,88E-04	17,68	4,28E-04
Promedio		30,23	2,50E-04	19,32	3,92E-04	17,46	4,34E-04
Desviación		6,81E-01	5,58E-06	3,96E-01	8,12E-06	5,82E-01	1,47E-05

Fuente: elaboración propia.

Tabla A6. Concentraciones de hierro en el permeado

Concentración teórica de alimentación 2 ppm				
Abertura Válvula	Q _a (m ³ /s)	Q _p (m ³ /s)	[Fe] _{ra} (ppm)	[Fe] _p (ppm)
1/8	3,31E-04	3,22E-04	1,85	1,48
1/4	3,54E-04	3,42E-04		1,45
3/8	4,08E-04	3,95E-04		1,15
Concentración teórica de alimentación 3.5 ppm				
Abertura Válvula	Q _a (m ³ /s)	Q _p (m ³ /s)	[Fe] _{ra} (ppm)	[Fe] _p (ppm)
1/8	2,63E-04	2,58E-04	3,44	2,94
1/4	3,29E-04	3,21E-04		1,48
3/8	4,27E-04	3,95E-04		1,39
Concentración teórica de alimentación 5 ppm				
Abertura Válvula	Q _a (m ³ /s)	Q _p (m ³ /s)	[Fe] _{ra} (ppm)	[Fe] _p (ppm)
1/8	2,53E-04	2,50E-04	4,86	4,24
1/4	3,97E-04	3,92E-04		3,79
3/8	4,40E-04	4,34E-04		3,38

Fuente: elaboración propia.

Tabla A7. Concentración real de alimentación

Concentraciones de alimentación					
Concentración teórica 2 ppm		Concentración teórica 3.5 ppm		Concentración teórica 5 ppm	
Corrida	[Fe] _{ra} (ppm)	Corrida	[Fe] _{ra} (ppm)	Corrida	[Fe] _{ra} (ppm)
1	1,89	1	3,4	1	4,9
2	1,83	2	3,43	2	4,79
3	1,82	3	3,49	3	4,88
Promedio	1,85	Promedio	3,44	Promedio	4,86
Desviación	0,04	Desviación	0,05	Desviación	0,06

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Tabla de requisitos académicos**

Tabla A8. **Requisitos académicos**

Área	Cursos	Temas
Química	<ul style="list-style-type: none"> • Química 4 • Química Orgánica 2 • Química Ambiental 	<ul style="list-style-type: none"> • Estados de agregación de la materia • Temperatura de fusión • Polímeros
Fisicoquímica	<ul style="list-style-type: none"> • Laboratorio de Fisicoquímica 1 	<ul style="list-style-type: none"> • Práctica de ósmosis
Operaciones unitarias	<ul style="list-style-type: none"> • Flujo de Fluidos • Transferencia de Calor • Transferencia de Masa • Laboratorio de Ingeniería Química 1 • Separación por medio de membranas selectivas 	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de tamaño de partícula • Calentamiento • Difusión • Diagramas de flujo • Membranas • Permeabilidad y selectividad • Preparación de membranas
Ciencias básicas	<ul style="list-style-type: none"> • Estadística 	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis correlacional • Medidas de dispersión • Regresión lineal
Especialización	<ul style="list-style-type: none"> • Ciencia de los Materiales • Diseño de Equipo 	<ul style="list-style-type: none"> • Polímeros • Sinterización • Costo de equipos

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Hoja de seguridad PET

Identificación de la sustancia

- Aplicaciones: empaque y otros.
Polímero poliéster tipo industrial: para hilos de alta tenacidad.
Polímero de poliéster: para aplicaciones textiles (filamento y fibras)
- Composición
Polietileno tereftalato

Identificación de peligros

En caso de sobreexposición, puede ser dañino por inhalación, ingestión o por contacto directo con la piel. Puede causar irritación en los ojos y en la piel.

Primeros auxilios

- Por inhalación: respire aire fresco.
- Por contacto con la piel: lave con abundante agua.
- Por contacto con los ojos: inmediatamente enjuague los ojos con abundante agua al menos durante 15 minutos. Consulte con un médico.
- Por ingestión: no es tóxico. Lave la boca con agua. Consulte con un médico.
- Por contacto con polímero fundido: si hay quemaduras, enfríe el material fundido adherido a la piel tan rápido como sea posible con agua fría y acuda a un doctor para remover el polímero adherido.

Medidas de lucha contra incendio

- Medio de extinción adecuados: agua, polvo químico seco o CO₂.
- Especial exposición al peligro: use equipos de aire autocontenido para proteger de inhalación de humo mientras apaga el incendio.
- Medidas a tomar en caso de vertido accidental: usar respirador para vapores orgánicos, gafas tipo goggles, botas y guantes de caucho para trabajo pesado

Barrer y recoger el gránulo en bolsas, evitando que se levante polvo. Ventilar el área y lavar el sitio después de que se ha recogido.

Fuente: Enka de Colombia S. A. *Hoja de seguridad. Resina de Poliéster.*
<http://www.enka.com.co/enka/index.php/es/content/download/161/1924/file/HOJA+DE+SEGURIDAD+Resina+PES.pdf>. Consulta: mayo de 2015.

Anexo 2. **Checker HI 721 HANNA instruments®**

Especificaciones técnicas

El *checker* HI 721 HANNA instruments®, es un instrumento de medición de análisis rápido. Esto permitió durante el trabajo de investigación, agilizar los resultados y evitar la necesidad de análisis extensos para realizar las mediciones de concentración.

Además, es un instrumento de medición específico para la determinación de hierro total en muestras de agua.

Características

El *checker* HI 721 HANNA instruments® cuenta con características físicas y estructurales que determinan su manejo y operación.

Figura B1. **Checker HI 721 HANNA instruments®**



Fuente: HANNA instruments®. *Manual de producto checker HI 721 HANNA instruments®*.
<http://www.hannainst.com.gt/informacion-y-descargas/item/ficha-tecnica-hi-721-checker-de-hierro>. Consulta: mayo de 2015.

Figura B2. **Datos checker HI 721 HANNA instruments®**

SPECIFICATIONS	HI 721 (Iron)
Range	0.00 to 5.00 ppm (mg/L)
Resolution	0.01 ppm (mg/L)
Accuracy @ 25°C/77°F	±0.04 ppm ±2% of reading
Light Source	LED @ 525 nm
Light Detector	silicon photocell
Environment	0 to 50°C (32 to 122°F); RH max 95% non-condensing
Battery Type	(1) 1.5V AAA
Auto-off	after three minutes of non-use and ten seconds after reading
Dimensions	81.5 x 61 x 37.5 mm (3.2 x 2.4 x 1.5")
Weight	64 g (2.25 oz.)
Method	adaptation of the EPA Phenantroline method 315 B, for natural and treated waters.

Fuente: HANNA instruments®. *Manual de producto checker HI 721 HANNA instruments®*.
<http://www.hannainst.com.gt/informacion-y-descargas/item/ficha-tecnica-hi-721-checker-de-hierro>. Consulta: mayo de 2015.

Manual de uso

El *checker* HI 721 HANNA instruments®, como un instrumento de medición, cuenta con un manual de usuario describe el siguiente procedimiento:

Materiales

El método de análisis empleado por *checker* HI 721 HANNA instruments®, requiere de los siguientes materiales. Estos materiales están incluidos con el equipo.

- Medidor de hierro total *checker* HI 721 HANNA instruments®.
- Celdas de cristal HI 731321 (incluido con el *checker*).
- Paño de limpieza HI 731318 (incluido con el *checker*).

Reactivos y soluciones

El método de análisis empleado por *checker* HI 721 HANNA instruments®, requiere de los siguientes reactivos y soluciones. Estos reactivos están incluidos con el equipo. Al agotarse pueden ser adquiridos por separado.

- Agua destilada.
- *Kit* de reactivos para medidor de hierro total *checker* HI 721-25.

Procedimiento

El método de análisis empleado por *checker* HI 721 HANNA instruments®, se basa en el método espectrofotométrico de la fenantrolina, El procedimiento incluye una autocalibración que permite el análisis de muestras con turbidez.

1. Llene ambas cubetas con la solución a analizar.
2. Agregue a una de las cubetas el reactivo contenido en el sobre HI 721.
3. La cubeta sin reactivo y a la que se le ha agregado el reactivo corresponden a las soluciones C1 y C2 respectivamente.
4. Oprima y suelte el interruptor. El instrumento solicitará la solución C1.
5. Coloque la solución C1 en el *checker*: secando la cubeta con el paño de limpieza.
6. Oprima y suelte el interruptor. El instrumento iniciará la calibración, al finalizar solicitará la solución C2.
7. Seque y coloque la cubeta con la solución C2 en el *checker*.
8. Oprima el interruptor hasta que la cuenta regresiva inicie.
9. Al finalizar la cuenta regresiva, el aparato mostrará el resultado de la medición. Anote el resultado.
10. El resultado aparece en la pantalla por 10 segundos, luego de este tiempo el aparato se reiniciará y estará listo para la próxima medición.
11. Limpie las cubetas con agua destilada y continúe con la próxima medición.

Fuente: HANNA instruments®. *Manual de producto checker HI 721 HANNA instruments®*.
<http://www.hannainst.com.gt/informacion-y-descargas/item/ficha-tecnica-hi-721-checker-de-hierro>. Consulta: mayo de 2015.

