



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

**INSTALACIÓN DE ESTACIÓN EXPERIMENTAL E IMPLEMENTACIÓN DE PRÁCTICA DE
LABORATORIO PARA EL CURSO DE SEPARACIÓN POR MEMBRANAS SELECTIVAS**

Edgar Alejandro Arana Valenzuela

Asesorado por el Ing. Renato Giovanni Ponciano Sandoval

Guatemala, mayo de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**INSTALACIÓN DE ESTACIÓN EXPERIMENTAL E IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA DE
LABORATORIO PARA EL CURSO DE SEPARACIÓN POR MEMBRANAS SELECTIVAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

EDGAR ALEJANDRO ARANA VALENZUELA

ASESORADO POR EL ING. RENATO GIOVANNI PONCIANO SANDOVAL

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, MAYO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
EXAMINADORA	Inga. Casta Petrona Zeceña Zeceña
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

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:

INSTALACIÓN DE ESTACIÓN EXPERIMENTAL E IMPLEMENTACIÓN DE PRÁCTICA DE LABORATORIO PARA EL CURSO DE SEPARACIÓN POR MEMBRANAS SELECTIVAS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha noviembre del 2011.



Edgar Alejandro Arana Valenzuela



Guatemala, 30 de octubre de 2012

Ingeniero
Victor Manuel Monzón Valdez
Director de la Escuela de Ingeniería Química
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ing. Monzón:

Reciba por medio de la presente un cordial saludo de mi parte. El motivo por el que me dirijo a usted es para hacer de su conocimiento que he revisado y corregido el Informe Final del trabajo de graduación del estudiante Edgar Alejandro Arana Valenzuela, carné universitario No. 200511697, en el planeamiento y ejecución de su Tesis para optar al título de Ingeniero Químico, denominado **"Instalación de Estación Experimental e Implementación de Práctica de Laboratorio para el Curso de Separación por Membranas Selectivas"**. Es mi opinión que el trabajo está listo para ser sometido a la revisión y escrutinio de los revisores nombrados por la Escuela de Ingeniería Química, por lo que por este medio le comunico mi **APROBACIÓN** del mismo y solicito que se le dé el trámite correspondiente.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted con todo respeto.

Atentamente,
"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Renato Giovanni Ponciano Sandoval
INGENIERO QUÍMICO

Ing. Renato Giovanni Ponciano Sandoval
Profesor Titular V



Guatemala, 29 de noviembre de 2012
Ref. EI.Q.TG-IF.064.2012

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

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el Acta TG-184-2011-IF 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 el estudiante universitario: **Edgar Alejandro Arana Valenzuela**

Identificado con número de carné: **2005-11697**

Previo a optar al título de INGENIERO QUÍMICO.

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

INSTALACIÓN DE ESTACIÓN EXPERIMENTAL E IMPLEMENTACIÓN DE PRÁCTICA DE LABORATORIO PARA EL CURSO DE SEPARACIÓN POR MEMBRANAS SELECTIVAS

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Renato Giovanni Ponciano Sandoval**.

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. Manuel Galvan
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



ACAAI

Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería



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 del estudiante, **EDGAR ALEJANDRO ARANA VALENZUELA** titulado: "INSTALACIÓN DE ESTACIÓN EXPERIMENTAL E IMPLEMENTACIÓN DE PRÁCTICA DE LABORATORIO PARA EL CURSO DE SEPARACIÓN POR MEMBRANAS SELECTIVAS". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.


Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, mayo 2013

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: **INSTALACIÓN DE ESTACIÓN EXPERIMENTAL E IMPLEMENTACIÓN DE PRÁCTICA DE LABORATORIO PARA EL CURSO DE SEPARACIÓN POR MEMBRANAS SELECTIVAS**, presentado por el estudiante universitario **Edgar Alejandro Arana Valenzuela**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, mayo de 2013

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Que tiene un proyecto para todos, que cada meta alcanzada sea de tu agrado y me permita alcanzar el propósito que has diseñado para mí.

Aquellos que ya no están

Por sus esperanzas depositadas en quienes dejaron atrás, así como los sueños que compartí con ellos y que cada uno a su modo, me inspiran a realizar.

Mi familia presente

Restituirles un poco de lo que me han dado, pues su trabajo y aliento es lo que me ha hecho lo que soy.

Mi familia futura

Porque el trabajo y la superación que alcance serán para su prosperidad. El apoyo y aliento que recibí pueda transmitírseles en cada una de sus pruebas.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios

La roca fuerte que me ha sostenido en la tempestad, me ha bendecido y ha guiado mis pasos para alcanzar mis metas.

Mi padre

Edgar Romeo Arana Castillo (q.e.p.d.), cuyas enseñanzas y ejemplo me han permitido progresar y nunca perder de vista lo que busco. Y aceptar las pruebas que la vida nos pone, pues solo ellas nos hacen merecer el éxito.

Mi madre

Candida Orfelinda Valenzuela Medina, cuyo amor y apoyo incondicional me ha dado fuerza en los pasos más cruciales de mi vida. Y aún hoy me reconforta como solo una madre puede hacerlo.

Mi hermano

Carlos Romeo Arana Valenzuela, al final siempre hemos sido nosotros dos, nunca los mejores amigos, pero eternamente hermanos. Gracias por cada momento que me has tendido la mano.

Mi novia	Shirley Haydée Esperanza Martínez, mi compañera idónea, que estuvo conmigo en mis desvelos y comparte mis pesares. Calmó mi ser cuando mi espíritu se vio desconsolado.
Mis abuelos	Víctor Arana (q.e.p.d.) y Margarita Castillo, David Valenzuela y Elba Medina, que como pilares de mi familia sentaron las bases de la vida de cada uno de sus hijos. Bases que hoy viven en mí.
Mi familia	Porque cada uno de ellos forman parte de mi mundo y nunca me han dado la espalda.
Mis amigos	Tanto compañeros de estudio, como de la vida siempre han sabido hacer más ligeras las cargas.
Mi asesor	Ing. Qco. Renato Giovanni Ponciano Sandoval, por su tiempo y conocimiento que son base importante en este trabajo.
Mi cuñado	Melbin Osmaní Esperanza Martínez, por su apoyo en una etapa crucial este trabajo.
A la Universidad de San Carlos de Guatemala	Mi segundo hogar, que me abrió las puertas y me brindó las herramientas para mi desarrollo profesional y personal.

A la empresa

Corporación de Servicios, S.A. / LABIND /
SYSA cuyo apoyo y recursos han hecho posible
la culminación de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XXV
OBJETIVOS/HIPÓTESIS.....	XXIX
INTRODUCCIÓN.....	XXXIII
1. ANTECEDENTES.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Membranas selectivas.....	5
2.1.1. Membranas inorgánicas.....	7
2.1.2. Membranas poliméricas.....	8
2.1.3. Membranas líquidas.....	11
2.1.4. Membranas compuestas.....	14
2.2. Tecnología de membrana.....	16
2.3. Tipos de filtración por membranas.....	19
2.3.1. Filtración frontal.....	20
2.3.2. Filtración tangencial.....	21
2.4. Módulos de membrana.....	22
2.4.1. Membranas de placa y marco.....	22
2.4.1.1. Membranas de espiral.....	23
2.4.1.2. Membranas almohadiformes.....	24
2.4.2. Membranas tubulares.....	24
2.4.3. Membranas capilares.....	25

2.4.4.	Membranas de fibras huecas	26
2.5.	Modelo matemático de la filtración por membrana	27
2.5.1.	Fenómenos de transporte en membranas	27
2.6.	Obstrucción de la membrana.....	31
2.7.	Limpieza de la membrana	32
2.7.1.	Lavado con chorro delantero.....	33
2.7.2.	Lavado con chorro trasero.....	34
2.7.3.	Limpieza por chorro de aire o por chorro de aire y agua	35
2.7.4.	Limpieza química	36
2.8.	Aplicaciones de las membranas	36
2.8.1.	Membranas para aplicaciones de separación	38
2.8.1.1.	Filtración	38
2.8.1.2.	Separación de gases y pervaporación ..	39
2.8.1.3.	Electrodialisis	40
2.8.2.	Membranas reactoras	41
2.8.3.	Membranas sensoras.....	42
2.9.	Estaciones experimentales.....	43
2.9.1.	Aplicaciones.....	43
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	47
3.1.	Variables	47
3.2.	Delimitación de campo de estudio	49
3.2.1.	Determinación del problema.....	49
3.2.1.1.	Definición	49
3.2.1.2.	Delimitación	50
3.3.	Recursos humanos disponibles	51
3.4.	Recursos materiales disponibles	51
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa	52

3.5.1.	Cuantitativo.....	52
3.5.2.	Cualitativo.....	53
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	53
3.6.1.	Limpieza y cambio de membrana	57
3.6.2.	Limpieza y tratamiento de desechos.....	57
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	58
3.8.	Análisis estadístico	61
3.8.1.	Promedio	61
3.8.2.	Desviación estándar	61
3.8.2.1.	Interpretación y aplicación	62
3.8.3.	Regresión y correlación	63
3.8.4.	Coeficiente de correlación de Pearson	63
3.8.4.1.	Interpretación del coeficiente de correlación de Pearson.....	64
4.	RESULTADOS	65
4.1.	Reconocimiento del área de trabajo y construcción de la estación experimental	65
4.2.	Estación experimental para el curso de separación por membranas selectivas	70
4.3.	Procedimiento de la práctica de laboratorio para la estación experimental	76
4.3.1.	Prueba de flujo de agua.....	77
4.3.2.	Procedimiento experimental	79
4.3.2.1.	Cálculos y reporte.....	82
4.3.3.	Mantenimiento del equipo.....	83
4.4.	Validación de la práctica de laboratorio.....	84
4.4.1.	Implementación de la práctica de laboratorio.....	84

4.4.2.	Encuesta de validación	89
4.5.	Resultados obtenidos en la práctica de validación	96
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	101
	CONCLUSIONES	107
	RECOMENDACIONES	109
	BIBLIOGRAFÍA	111
	ANEXOS	115
	APÉNDICES	139

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diferentes tipos de poros de membranas	10
2.	Imágenes de microscopía electrónica de una membrana	10
3.	Diferentes tipos de membranas líquidas	14
4.	Esquema de funcionamiento de membranas	17
5.	Clasificación según tamaño de partícula.....	18
6.	Membrana de espiral	23
7.	Membranas tubulares	25
8.	Membranas capilares	26
9.	Membranas de fibras huecas.....	27
10.	Lavado con chorro delantero	33
11.	Lavado con chorro trasero	34
12.	Limpieza con chorro de aire.....	35
13.	Diagrama de la estación experimental	55
14.	Área de trabajo asignada.....	65
15.	Conexión a la red de agua potable encontrada en el área de trabajo	66
16.	Conexión a la red eléctrica encontrada en el área de trabajo	66
17.	Conexión a la red de drenaje encontrada en el área de trabajo.....	67
18.	Secciones de la estación experimenta elaboradas de forma individual para su instalación	68
19.	Estación experimental con sus distintos elementos ya conectados	68
20.	Conexión a la red eléctrica	69

21.	Conexión a la red de drenaje	69
22.	Estación experimental para el curso de separación por membranas selectivas	70
23.	Bomba centrífuga de ½ hp.....	71
24.	Caja de control de la bomba centrífuga	71
25.	Tanques no. 1 y 2	72
26.	Escala interna de los tanques, para determinación de volumen (galones)	73
27.	Módulo de membranas selectivas, membrana de microfiltración instalada	74
28.	Equipo de medición de PTM, manómetros	75
29.	Válvulas de estación experimental.....	76
30.	Estudiantes del curso de separación por membranas selectivas	85
31.	Estudiantes familiarizándose con la estación experimental.....	86
32.	Estudiantes recibiendo instrucciones por parte del catedrático del curso	87
33.	Estudiantes siendo instruidos en el uso de equipos de medición.....	88
34.	Estudiantes realizando mediciones con el instrumento proporcionado.....	88
35.	Encuesta de validación realizada al final de la práctica.....	89
36.	Califique su conocimiento previo sobre la operación de equipos de separación por membranas selectivas.....	91
37.	El equipo usado en la práctica representa efectivamente un sistema de separación por membranas selectivas?.....	91
38.	La práctica complementa la instrucción recibida en el curso de Separación por Membranas Selectivas?.....	92
39.	Cree necesaria la implementación de la práctica de laboratorio para el curso de Separación por Membranas Selectivas?	92

40.	Califique su conocimiento adquirido respecto al parámetro de retención en membranas	93
41.	Califique su conocimiento adquirido respecto al parámetro de saturación en membranas	93
42.	Califique su conocimiento adquirido respecto al parámetro del porcentaje de recuperación en membranas.....	94
43.	Califique su conocimiento adquirido respecto a la aplicación de modelos matemáticos en procesos a membranas.....	94
44.	Califique su conocimiento adquirido respecto la elaboración de curvas de operación en procesos a membranas	95
45.	El equipo cuenta con los instrumentos adecuados para cumplir con los objetivos del práctica?.....	95
46.	Califique su conocimiento adquirido sobre la operación de equipos de separación por membranas selectivas	96
47.	Caudal en tanque no. 1 versus retención	98
48.	Caudal en tanque no. 1 versus porcentaje de recuperación	99
49.	Flujo del permeado versus presión transmembrana	100

TABLAS

I.	Aportes científicos en el estudio de membranas selectivas	1
II.	Desarrollo de procesos a membranas.....	2
III.	Criterios de clasificación de membranas	6
IV.	Ecuaciones de transporte según esquema de la Ley de Ohm.....	29
V.	Ecuaciones prácticas para la cuantificación del transporte.....	31
VI.	Procesos comercializados de membranas	37
VII.	Procesos de filtración o espectro de filtración	39
VIII.	Aplicaciones industriales de la electrodiálisis	40
IX.	Definición operacional de las variables	48

X.	Simbología en diagrama de equipo.....	56
XI.	Modelo de tabla, recolección de datos experimentales	59
XII.	Modelo de tabla, preguntas de nivel de instrucción didáctica	60
XIII.	Modelo de tabla, preguntas de cumplimiento	60
XIV.	Resumen de resultados de encuesta de validación, preguntas de nivel de instrucción didáctica.....	90
XV.	Resumen de resultados de encuesta de validación, preguntas de cumplimiento.....	90
XVI.	Resumen de resultados, mediciones realizadas en la práctica de validación.....	97
XVII.	Resumen de resultados, cálculos realizados en la práctica de validación.....	97

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Área
Q	Caudal volumétrico
r	Coeficiente de correlación de Pearson
k	Coeficiente de permeabilidad
u_i	Coeficiente de proporcionalidad
C_o	Concentración inicial
C_i	Concentración de la especie (i)
C_s	Concentración en la salida
R	Constante universal de los gases ideales
σ	Desviación estándar
α	Factor de separación
J	Flujo
J_i	Flujo de una especie (i)
Fd	Fuerza impulsora
$d\phi/dx$	Gradiente de campo eléctrico
dC_i/dx	Gradiente de concentración
dP/dx	Gradiente de presión
PTM	Presión Transmembrana
p	Página
Pm	Permeabilidad
Pr	Porcentaje de recuperación
%R	Porcentaje de reestracción
%E	Porcentaje de extracción

pH	Potencial de Hidrogeno
μ_i	Potencial electroquímico de la especie (i)
ref	Referencia
Rm	Resistencia
Rt	Retención
T	Temperatura
t	Tiempo
S²	Varianza
v	Velocidad de flujo
V	Volumen

GLOSARIO

Aditivos	Sustancia que se agrega a otras para darles cualidades de que carecen o para mejorar las que poseen en base a determinado uso o aplicación.
Alícuota	Es una parte que se toma de un volumen (alícuota líquida) o de una masa (alícuota sólida) iniciales, para ser usada en una prueba de laboratorio, cuyas propiedades físicas y químicas, así como su composición, representan las de la sustancia original. Normalmente las alícuotas son el resultado de repartir un volumen inicial en varias partes iguales. Se suele medir en mililitros (ml) o gramos (g).
Alimentación	En fenómenos de separación, la alimentación se refiere a la sustancia a ser tratada. Solución problema en bruto, la cual va someterse a un proceso de separación.
Analito	En química analítica, un analito es el componente (elemento, compuesto o ion) de interés analítico de una muestra. Son especies químicas cuya presencia o concentración se desea conocer. El analito es una especie química que puede ser identificado y

cuantificado, es decir, determinar su cantidad y concentración en un proceso de medición química.

Blanco de medición En todo análisis regido por un control de calidad. Se corre un blanco. Esto es el disolvente en un volumen conocido a la cual se le agrega los mismos reactivos que la muestra que se está estudiando. Se usa para comprobar la exactitud de un instrumento de medición o el estado del equipo.

Cebado de bomba Para el correcto funcionamiento de las bombas rotodinámicas, se necesita que estén llenas de fluido incompresible, es decir de líquido, pues en el caso estar llenas de fluido compresible (cualquier gas como el aire) no funcionarían correctamente. El cebado de la bomba consiste en llenar de líquido la tubería de aspiración succión y la carcasa de la bomba, para facilitar la succión de líquido, evitando que queden bolsas de aire en el interior. Al ser necesaria esta operación en las bombas rotodinámicas, se dice que no tienen capacidad autocebante. Sin embargo, las bombas de desplazamiento positivo son autocebantes, es decir aunque estén llenas de aire, son capaces de llenar de fluido el circuito de aspiración.

Celulosa Hidrato de carbono que es el componente básico de la membrana de las células vegetales. Es una fibra vegetal que al ser observada en el microscopio, es

similar a un cabello humano, cuya longitud y espesor varía según el tipo de árbol o planta. Se utiliza en la fabricación de papel, fibras textiles, plásticos, etc.

Correlación

Correspondencia o relación recíproca entre dos o más cosas o series de cosas. Se considera que dos variables cuantitativas están correlacionadas cuando los valores de una de ellas varían sistemáticamente con respecto a los valores homónimos de la otra: si tienen dos variables (A y B) existe correlación si al aumentar los valores de A lo hacen también los de B y viceversa.

Cualitativo

Es un adjetivo que tiene su origen en el latín *qualitativus*. El término se emplea para nombrar a aquello vinculado a la cualidad (el modo de ser o las propiedades de algo). Un análisis cualitativo, por lo tanto, está orientado a revelar cuáles son las características de alguna cosa. De este modo, lo cualitativo se centra en la calidad, a diferencia de lo cuantitativo que está enfocado a las cantidades.

Cuantitativo

Es un término que tiene antecedentes en la lengua latina (*quantitas*). Se trata de un adjetivo que está vinculado a la cantidad. Este concepto, por su parte, hace referencia a una cuantía, una magnitud, una porción o un número de cosas.

Difusión

Es un proceso físico a través del cual las partículas materiales se introducen en un medio que antes estaba ausente, lo que aumenta la entropía del sistema formado por las partículas difundidas y el medio donde se difunden.

Electrolitos

Es una sustancia que puede someterse a la electrolisis (la descomposición en disolución a través de la corriente de electricidad). Los electrolitos contienen iones libres que actúan como conductores eléctricos.

Errores aleatorios

En ingeniería y física, el error aleatorio es aquel error inevitable que se produce por eventos únicos imposibles de controlar durante el proceso de medición. En un estudio de investigación, el error aleatorio viene determinado por el hecho de tomar sólo una muestra de una población para realizar inferencias. Puede disminuirse aumentando el tamaño de la muestra.

Errores de paralaje

Es un error sistemático personal que se debe cuando el punto de vista del observador no es perpendicular a la escala del instrumento que se está usando. Por ejemplo, cuando el observador lee la temperatura de un termómetro, la escala debe estar perpendicular a su visión para apreciar correctamente hasta que valor llega el mercurio. Si lo observa de forma oblicua, ya sea desde arriba o

abajo, la lectura variará. Es un error que influye en el momento de obtener la lectura de la escala de un instrumento.

Espectrofotómetro

Es un instrumento usado en el análisis químico que sirve para medir, en función de la longitud de onda, la relación entre valores de una misma magnitud fotométrica relativos a dos haces de radiaciones y la concentración o reacciones químicas que se miden en una muestra. También es utilizado en los laboratorios de química para la cuantificación de sustancias y microorganismos. Este instrumento tiene la capacidad de proyectar un haz de luz monocromática a través de una muestra y medir la cantidad de luz que es absorbida por dicha muestra.

Espesor

Grosor de determinada materia.

Estación experimental

Una estación experimental, es un módulo de proceso a escala reducida. El fin que se persigue al instalar una estación experimental es obtener información sobre un determinado proceso físico o químico, así como establecer los parámetros de operación óptimos de dicho proceso, además de complementar el estudio teórico del proceso con la experimentación. Fuera de la didáctica permite evaluar la viabilidad económica de un proceso antes de llevarlo a escala industrial.

Factibilidad

Se refiere a la disponibilidad de los recursos necesarios para llevar a cabo los objetivos o metas señaladas. Generalmente la factibilidad se determina sobre un proyecto, (estudio de factibilidad). El estudio de factibilidad, es una de las primeras etapas del desarrollo de un sistema informático. El estudio incluye los objetivos, alcances y restricciones sobre el sistema, además de un modelo lógico de alto nivel del sistema actual (si existe). A partir de esto, se crean soluciones alternativas para el nuevo sistema.

Filtración

Se denomina filtración al proceso de separación de sólidos en suspensión en un líquido mediante un medio poroso, que retiene los sólidos y permite el pasaje del líquido, las aplicaciones de los procesos de filtración son muy extensas, encontrándose en muchos ámbitos de la actividad humana, tanto en la vida doméstica como de la industria general, donde son particularmente importantes aquellos procesos industriales que requieren de las técnicas químicas.

Floculación

La floculación es un proceso químico mediante el cual, con la adición de sustancias denominadas floculantes, se aglutinan las sustancias coloidales presentes en el agua, facilitando de esta forma su decantación y posterior filtrado. Es un paso del proceso de potabilización de aguas de origen superficial y del tratamiento de aguas servidas domésticas, industriales y de la minería.

Heterogéneo

Es aquello que está compuesto de partes de distinta naturaleza. Para la química, un sistema heterogéneo está formado por, al menos dos fases. Esta característica puede detectarse a partir de una simple visualización, cuando se aprecian los distintos componentes del sistema.

Homogéneo

El adjetivo hace referencia a aquello poseedor de caracteres iguales. Una mezcla o una sustancia homogénea, por lo tanto, exhiben composición y estructura uniformes. El sistema homogéneo está formado por una única fase. Esto quiere decir que, desde el punto de vista de la química, exhibe propiedades intensivas del mismo valor en todos sus puntos.

Manómetro

Es un instrumento que se emplea para la medición de la presión en los fluidos y que generalmente procede determinando la diferencia que hay entre la presión del fluido y la presión local.

Membranas

Es una región material que actúa de barrera entre dos fluidos y que restringe o favorece el movimiento de uno o más componentes de los fluidos a través de ella.

Micrones

Medida de longitud que equivale a la millonésima (10^{-6}) parte del metro. (Símbolo μm).

Módulos	Una estructura o bloque de piezas que, en una construcción, se ubican en cantidad a fin de hacerla más sencilla, regular y económica. Todo módulo, por lo tanto, forma parte de un sistema y suele estar conectado de alguna manera con el resto de los componentes.
Morfología	En términos generales cuando se habla de morfología, se está refiriendo al estudio de las formas externas de algo.
Obstrucción	La palabra obstrucción es la que se utiliza para designar a aquellos conductos o espacios que se vean tapados y en los cuales el tránsito de diferentes tipos de elementos no sea posible justamente por ese taponamiento.
Operaciones unitarias	Se llama operación unitaria a una parte indivisible de cualquier proceso de transformación, sea físico, químico o de naturaleza biológica, de una materia prima en otro producto de características diferentes. Se entiende que los procesos de transformación en general y las operaciones unitarias, en lo particular, tienen como objetivo el modificar las condiciones de una determinada cantidad de materia en forma más útil a nuestros fines. Esta transformación puede realizarse de distintas formas: modificando la masa o composición del cuerpo primario ya sea mezclándolo, separándolo o haciéndolo reaccionar

químicamente; modificando la calidad de la energía que posee el cuerpo en cuestión, ya sea por enfriamiento, vaporización, aumento de presión; modificando las condiciones relativas a la cinética del cuerpo primario, ya sea aumentando o disminuyendo su velocidad o modificando la dirección que tiene en el espacio.

Oxidantes

Es un compuesto químico que oxida a otra sustancia en reacciones electroquímicas o de reducción-oxidación. En estas reacciones, el compuesto oxidante se reduce.

Permeabilidad

La permeabilidad, es la capacidad que tiene un material de permitirle a un líquido que lo atraviese sin alterar su estructura interna. Se afirma que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad de fluido es despreciable.

Permeado

En fenómenos de separación, el permeado se refiere a la sustancia tratada. Solución sometida a un proceso de separación.

Pervaporación

Es un proceso de separación con membranas aplicado a mezclas líquidas de compuestos miscibles, en el que a partir de una corriente de alimentación se obtienen dos corrientes líquidas,

cada una de ellas más concentrada en sus componentes que la alimentación inicial. Las membranas utilizadas son no porosas. La separación se consigue mediante la aplicación de vacío en el lado de la membrana, donde se recoge el permeado en forma de vapor, mientras por el otro lado circula el líquido de alimentación cuya separación se busca. Posteriormente se procede a condensar este vapor, generando como producto un líquido permeado.

Polímeros

Los polímeros (del Griego: *poly*: muchos y *mero*: parte, segmento) son macromoléculas (generalmente orgánicas) formadas por la unión de moléculas más pequeñas llamadas monómeros. Los polímeros no son más que unas sustancias formadas por una cantidad finita de moléculas que le confieren un alto peso molecular que es una característica representativa de esta familia de compuestos orgánicos. El almidón, la celulosa, la seda y el ADN son ejemplos de polímeros naturales, entre los más comunes de estos y entre los polímeros sintéticos se encuentra el nailon, el polietileno y la baquelita.

Poros

Espacio pequeño entre las moléculas que forman un cuerpo.

Presión osmótica	Puede definirse como la presión que se debe aplicar a una solución para detener el flujo neto de disolvente a través de una membrana semipermeable. ¹ La presión osmótica es una de las cuatro propiedades coligativas de las soluciones (dependen del número de partículas en disolución, sin importar su naturaleza). Se trata de una de las características principales a tener en cuenta en las relaciones de los líquidos que constituyen el medio interno de los seres vivos, ya que la membrana plasmática regula la entrada y salida de soluto al medio extracelular que la rodea, ejerciendo de barrera de control.
Presión transmembrana	Se define como la diferencia de presión entre la alimentación y el del permeado.
Recuperación	Eficiencia del sistema, medida como el porcentaje de la alimentación que se transforma en producto.
Regresión	Es la tendencia de una medición extrema a presentarse más cercana a la media en una segunda medición. La regresión se utiliza para predecir una medida basándonos, en el conocimiento de otra.
Retención	Parámetro de cuantificación de la selectividad de la membrana.

Saturación	Estado de una cosa que ocupa o usa un espacio por completo o se llena en exceso. En el caso de una membrana se refiere a un exceso de partículas obstruyendo los poros de la membrana.
Scaling	Se refiere al proceso a través del cual como resultado de la acumulación de partículas en la membrana a través de la filtración de agua con una cierta cantidad de sólidos suspendidos, se formará una capa en la membrana. Cuando las partículas obstruyen los poros de la membrana a esto se le llama bloqueo de los poros.
Selectividad	La selectividad indica que la membrana permite el paso de ciertas sustancias que la rodean e impide el paso de otras.
Sinterización	<p>Es el tratamiento térmico de un polvo o compactado metálico o cerámico a una temperatura inferior a la de fusión de la mezcla, para incrementar la fuerza y la resistencia de la pieza creando enlaces fuertes entre las partículas.</p> <p>En la fabricación de cerámicas, este tratamiento térmico transforma de un producto en polvo en otro compacto y coherente. La sinterización se utiliza de modo generalizado para producir formas cerámicas de alúmina, berilia, ferrita y titanatos.</p> <p>En la sinterización las partículas coalescente por difusión al estado sólido a muy altas temperaturas,</p>

pero por debajo del punto de fusión o vitrificación del compuesto que se desea sinterizar. En el proceso, se produce difusión atómica entre las superficies de contacto de las partículas, lo que provoca que resulten químicamente unidas.

Unión universal	Accesorio para conexión mecánica tipo enchufe universal, para unir tuberías de extremo espiga lisa.
Válvula	Es un mecanismo que regula el flujo de la comunicación entre dos partes de una máquina o sistema.
Variable	Información identificada por un nombre o una dirección que puede tomar un valor, o un conjunto de valores, en un dominio dado, en el curso del desarrollo de un programa. La variable es todo aquello que varía y son valores cuantitativos y pueden incluir desde grados de medida hasta nombres. Pueden variar a nivel tanto individual como social. Además toman valores (generalmente numéricos) dentro de un rango delimitado.
Variable dependiente	Es la consecuencia de sucesos, de la combinación de efectos causados por una variable independiente.
Variable independiente	Es considerada como supuesta causa en una relación entre variables; es la condición antecedente.

Velocidad de flujo

Es un vector, el cuál se utiliza para describir matemáticamente el movimiento de un líquido.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación consiste en la instalación de una estación experimental e implementación de una práctica de laboratorio integrada en un equipo de filtración a presión constante por membranas a pequeña escala, con el objetivo principal de complementar los contenidos del curso de Separación por Membranas Selectivas. La metodología a través de una práctica experimental permitió la evaluación de membranas y conocer el funcionamiento del equipo a través de la determinación de parámetros como la retención, la saturación de las membranas, el porcentaje de recuperación, elaborar las curvas de operación y modelar matemáticamente el proceso.

Para la instalación de la estación experimental, se gestionó con los encargados de laboratorio los recursos disponibles. La práctica experimental consistió en un procedimiento de separación por membranas selectivas, separando el hierro aplicado a través de una solución de sulfato ferroso heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) por medio de tratamiento químico y una membrana de microfiltración de 10 micrómetros, fabricada de celulosa. Esta práctica se implementó con un grupo de 24 estudiantes del curso de Separación por Membranas Selectivas, al finalizar la experiencia se investigó por medio de una encuesta entre los estudiantes si la práctica cumple con los objetivos del proyecto.

Según los resultados obtenidos en las encuestas realizadas, al instalar esta estación experimental e implementar la práctica de laboratorio se entregó a la universidad una importante herramienta para la educación de los futuros ingenieros, que permitirá ampliar satisfactoriamente la comprensión de las

tecnologías nuevas en sistemas de filtración, aportando un importante instrumento para su desarrollo y competencia profesional.

OBJETIVOS

General

Instalar una estación experimental e implementar una práctica de laboratorio, que permita la evaluación de membranas para complementar con una experiencia práctica los contenidos del curso de Separación por Membranas Selectivas.

Específicos

1. Instalar una estación de laboratorio para evaluación de membranas.
2. Elaborar el procedimiento de operación y mantenimiento del equipo.
3. Validar con los estudiantes una metodología experimental para efectuar prácticas de laboratorio en dicha estación.
4. Cuantificar la retención, el flujo, la saturación y la recuperación en las membranas.
5. Modelar matemáticamente el proceso de microfiltración.
6. Generar las curvas de operación de las membranas utilizadas con base en datos experimentales.

HIPÓTESIS

Es factible la instalación de una unidad experimental que a través de la implementación de una práctica de laboratorio permita al estudiante de ingeniería química observar los fenómenos y principios estudiados en el curso de Separación por Membranas Selectivas, así como de la operación de equipos industriales y manejo de parámetros de proceso.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de los métodos y sistemas de separación, constituyen un campo de interés para los investigadores. En el último siglo el estudio de la separación por medio de membranas selectivas, ha presentado importantes avances para producir equipos industriales competitivos con otras tecnologías. Este desarrollo hace necesario el estudio de los fenómenos y sistemas relacionados con las membranas selectivas para una preparación actualizada y completa.

En 2008 se abrió el curso de Separación por Membranas Selectivas como parte del pensum de la carrera de Ingeniería Química, en el cual se estudian los procesos a membrana desde los principios sobre los que operan; como las aplicaciones industriales. Sin embargo, dadas las características del tema y siguiendo la aplicación de técnicas didácticas completas, es necesario integrar la práctica experimental por medio de la instalación de una estación experimental e implementación práctica de laboratorio que permita complementar el proceso enseñanza-aprendizaje en la temática.

En el presente proyecto, se estudió la factibilidad de la instalación de una estación experimental que a través de prácticas sencillas permita al estudiante de ingeniería química observar de primera mano los fenómenos y principios estudiados en el curso de Separación por Membranas Selectivas, además de comprobar los efectos de la modificación de parámetros en el funcionamiento de las membranas a fin de generar las curvas de operación, cuantificar las características de la membrana y estudiar su eficiencia. El estudio experimental se desarrolló a través de la recolección de datos y el posterior manejo

estadístico, matemático y gráfico, brindando una importante herramienta didáctica que complementará a través de la práctica experimental el estudio teórico de las membranas selectivas aplicadas a procesos de separación.

1. ANTECEDENTES

Desde mediados del siglo XVIII, los fenómenos a membranas se han estudiado y observado, sobre todo para entender las propiedades de barrera y desarrollar membranas para aplicaciones técnicas e industriales. Tradicionalmente, la investigación sobre las membranas no se ha llevado a cabo, únicamente por químicos y físicos, también otros profesionales como biólogos, bioquímicos, biofísicos y zoólogos que han estudiado el fenómeno. En la tabla I, se presentan algunos de los principales aportes científicos.

Tabla I. **Aportes científicos en el estudio de membranas selectivas**

Aporte	Autor / Año
Observación:	Osmosis: Nollet 1748 Electroosmosis: Reuss 1803, Porret 1816 Diálisis: Graham 1861
Relación:	Difusión: Fick 1855 Presión osmótica: Van 't Hoff 1887 Trasporte de electrolitos: Nernst-Planck 1889
Consideraciones teóricas:	Presión osmótica: Einstein 1905 Potencial de membranas: Henderson 1907 Equilibrio de membrana: Donnan 1911 Osmosis anómala: Sollner 1930 Termodinámica de procesos irreversibles: Kedem, Katchalsky 1964 Membranas iónicas: Teorell 1937, Meyer, Sievers 1936
Modelos de transporte:	Modelo de poro: Schmid 1950, Meares 1956 Modelo solución-disolución: Lonsdale 1965

Fuente: MULDER, Marcel. *Basic Principles of Membrane Technology*. p. 1.

Tabla II. **Desarrollo de procesos a membranas**

Proceso	País	Año	Aplicación
Microfiltración †	Alemania	1920	Uso en laboratorio (filtro de bacterias)
Ultrafiltración †	Países Bajos	1930	Uso en laboratorio
Hemodiálisis †	USA	1950	Riñones artificiales
Electrodialisis #	USA	1955	Desalinización
Osmosis Inversa #	USA	1960	Agua de mar desalinización
Ultrafiltración #	USA	1960	Concentración de macromoléculas
Separación de Gases#	Alemania	1979	Recuperación de hidrogeno
Destilación por Membrana†	Alemania/ Países Bajos	1981	Concentración de solución acuosa
Pervaporación #		1982	Deshidratación de solventes orgánicos
† Pequeña escala # Escala industrial			

Fuente: MULDER, Marcel. *Basic Principles of Membrane Technology*. p. 1.

La tabla II, muestra el desarrollo técnico de algunos procesos de membrana. “Las primeras membranas para las aplicaciones prácticas fueron fabricadas en Alemania después de la Primera Guerra Mundial, la técnica necesaria para preparar estas membranas procede de los primeros trabajos realizados en 1918”¹. Sin embargo, estas membranas de acetato y de nitrato de celulosa se utilizaron sólo en una escala de laboratorio, y lo mismo se aplica las membranas más densas de ultrafiltración. La primera membrana para aplicación práctica fue desarrollada para el proceso de hemodiálisis en Estados Unidos en la década de 1940.

Un gran avance en cuanto a las aplicaciones industriales de membranas fue alcanzado por el desarrollo de las membranas asimétricas (Estados Unidos en 1962). Estas membranas consisten en una capa superior densa muy delgada (grosor menor de 0,5 μm), apoyado por una subcapa porosa (espesor

¹Marcel, Mulder. *Basic Principles of Membrane Technology*. p. 1.

50-200 μ m). “La capa superior o de la piel determina la tarifa de transporte, mientras que la subcapa porosa sólo actúa como soporte”².

El trabajo de Henis y Tripodi, realizado en Alemania en 1981 hizo la separación de gases industriales económicamente viable a través de destilación por membranas. “A pesar de que las membranas de destilación por membrana (membranas porosas hidrofóbicas) han existido por algún tiempo, este proceso sólo se ha aplicado a escala de planta piloto recientemente”³.

La pervaporación, es otro proceso de membrana que se ha desarrollado recientemente. Equipos de trabajo trataron de comercializar el proceso de pervaporación para uso industrial en los años cincuenta, pero a pesar de las intensas investigaciones no tuvieron mucho éxito. Este proceso se convirtió en competitivo con otros métodos de separación, debido al desarrollo de procesos de membranas compuestas específicas.

Los ejemplos que figuran en la tabla II, solo muestran el inicio del desarrollo de los procesos de membrana. La búsqueda de nuevas y mejores membranas aún continúa, no sólo para los procesos de membranas que aún no han alcanzado la etapa de comercialización, sino también para los que ya existen. Por lo que esto refleja la importancia del estudio de membranas a nivel universitario.

En 2008 se constituyó como parte de los cursos optativos de la carrera de Ingeniería Química en el área de Operaciones Unitarias, el curso de Separación por Membranas Selectivas, reconociendo la necesidad de incorporar a dicho pensum los procesos a membrana, tanto los principios sobre los que operan

² Marcel, Mulder. *Basic Principles of Membrane Technology*. p. 1.

³ Ibid.

como las aplicaciones industriales. Pero evidentemente es necesario complementar los contenidos del curso con una práctica de laboratorio que permita al estudiante familiarizarse con ellos a partir de la experimentación y la operación del proceso.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Membranas selectivas

Las membranas selectivas son una tecnología relativamente joven y dinámica que todavía tiene un componente empírico importante. Aún hoy en día es ciertamente difícil encontrar una definición concluyente de membrana que proporcione la idea clara de aquello a lo que se refiere la investigación. Esto deriva de la gran variedad morfológica, estructural y de composición que presentan los distintos materiales o dispositivos agrupados bajo el nombre genérico de membrana. Una definición comúnmente aceptada es la siguiente: "una membrana es una región material que actúa de barrera entre dos fluidos y que restringe o favorece el movimiento de uno o más componentes de los fluidos a través de ella"⁴.

Para completar esta definición general, comúnmente se opta por escoger ciertos criterios de clasificación para esclarecer al máximo las características y propiedades de las membranas. Algunos de los criterios de clasificación más habituales son la naturaleza, la estructura o el mecanismo de transferencia tal y como se puede observar en el resumen general presentado en la tabla III.

Para este trabajo se ha escogido el criterio descriptivo de naturaleza para poder incidir en la importancia de los materiales que forman las membranas, pero también se hará referencia a la clasificación por estructura, ya que esta es fundamental para poder entender que la variabilidad de las membranas, fruto

⁴ MACANÁS DE BENITO, Jorge. Desarrollo de Nuevas Membranas Compuestas para la Separación de Iones Metálicos y Aplicaciones Electroquímicas. P. 26.

de la combinación de diferentes morfologías con diferentes materiales. Esta combinación permite obtener casi infinitas variaciones de membranas de diferente composición química que además presentan diferente espesor, porosidad, simetría, etcétera.

Tabla III. **Criterios de clasificación de membranas**

NATURALEZA	Biológicas		
	Sintéticas	Inorgánicas	Metálicas De 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	Tipo Knudsen De flujo viscoso
		Fase líquida	
		Difusión	
	Densas		
	De cambio iónico	Catiónico Aniónico	

Fuente: MACANÁS DE BENITO, Jorge. Desarrollo de Nuevas Membranas Compuestas para la Separación de Iones Metálicos y Aplicaciones Electroquímicas. p. 27.

En los siguientes apartados, se comentan en detalle las membranas clasificadas según sean inorgánicas, poliméricas, líquidas o compuestas.

2.1.1. Membranas inorgánicas

Desde el punto de vista del material que las compone, las membranas inorgánicas se pueden dividir en dos amplios grupos: el de las membranas cerámicas basadas en óxidos metálicos y el de las membranas metálicas. “Gracias a su composición, las membranas inorgánicas son especialmente estables, térmica y químicamente, son resistentes a las diferencias de presión y son inertes frente a la degradación microbiológica”⁵.

Por su parte, las membranas cerámicas se caracterizan por tener la elevada resistencia a los disolventes, propiedad que, añadida a las anteriormente citadas, las hace especialmente interesantes para procesos de separación de fluidos no acuosos en condiciones extremas. Por lo que se refiere a su preparación, suelen confeccionarse membranas microporosas por la ruta sol-gel de óxidos de aluminio, titanio o silicio, seguida de una sinterización a alta temperatura. El proceso de sinterización consiste en aglutinar un material granulado o en forma de polvo por efecto de la presión y la temperatura con objeto de conseguir una lámina sólida de porosidad variable.

Algunos de los inconvenientes más importantes de este tipo de membranas, son su fragilidad y su baja relación superficie/volumen. Además, como consecuencia del elevado aporte energético implicado en su preparación, el coste de estas membranas es relativamente alto y no se utilizan ampliamente en la industria, a menos de que se trate de aplicaciones específicas en las que el uso de membranas poliméricas no es viable. Un caso especial son las membranas basadas en zeolitas, que gracias a la posibilidad de inmovilizar fácilmente catalizadores en su interior, han tenido un importante desarrollo en los últimos años.

⁵ MACANÁS DE BENITO, Jorge. Desarrollo de Nuevas Membranas Compuestas para la Separación de Iones Metálicos y Aplicaciones Electroquímicas. p. 28.

Por otro lado, algunas membranas metálicas densas tienen como aplicación más característica la separación de hidrógeno. Por ejemplo, mediante el uso de una membrana de paladio de 25 micrómetros de espesor, se puede obtener hidrógeno con una pureza del 99,9 por ciento en un solo ciclo. Un claro inconveniente de estas membranas, es el elevando coste de los metales nobles por lo que se estudia el uso de otros metales como tántalo o vanadio en combinación con paladio.

2.1.2. Membranas poliméricas

Las membranas orgánicas o poliméricas constituyen el campo más amplio y desarrollado de las membranas, tanto desde el punto de vista de volumen de fabricación, como desde el campo de las posibles aplicaciones. El motivo principal que ha llevado a esa situación tiene que ver con la característica versatilidad de los polímeros que los ha hecho también imprescindibles en otras aplicaciones tecnológicas e industriales y que se puede resumir en estas tres aportaciones básicas:

- Existe la posibilidad de ejercer cierto control sobre las configuraciones moleculares de los polímeros, cosa que incide en la permeabilidad y selectividad de las membranas.
- Los polímeros pueden adoptar con facilidad diferentes formas físicas, lo cual presenta una ventaja en el plano tecnológico.
- La gran variedad de polímeros existentes, permite escoger aquellos más interesantes para diseñar una membrana determinada.

Desde el punto de vista estructural, las membranas poliméricas se dividen clásicamente en dos grupos, haciendo referencia a su estructura interna: membranas porosas y no porosas (densas). El límite para pertenecer a una u otra categoría viene dado por la resolución de las técnicas de caracterización de materiales porosos. Así, habitualmente se considera que una membrana es porosa, si tiene poros con un diámetro superior a 0,002 micrómetros. Por el contrario, si no existe evidencia de poros de ese tamaño se considera que la membrana es densa, aunque se admite que puede contener huecos con diámetros comprendidos entre 0,001 y 0,002 micrómetros.

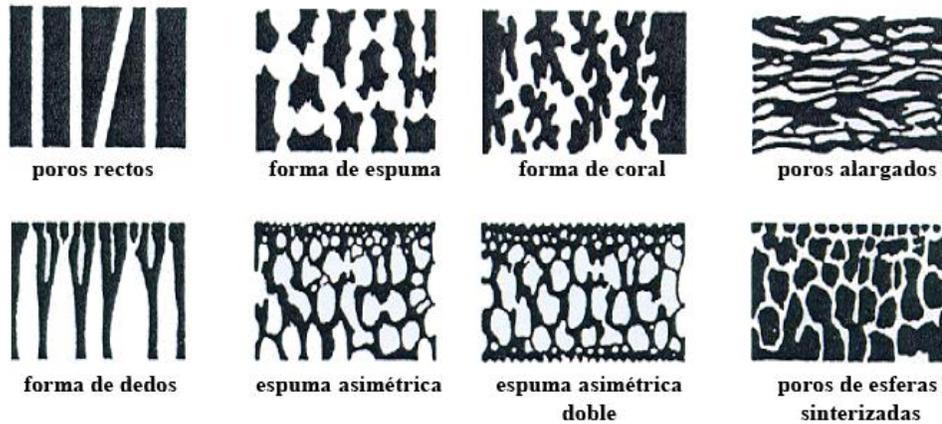
Para las membranas porosas, “son los parámetros característicos definidos por la estructura porosa y no la naturaleza del polímero, los que determinan principalmente el tipo de transporte que pueden ejercer y los que decidirán su grado de selectividad”⁶. Algunos de estos parámetros son la medida de los poros, su distribución y su estructura. En la figura 1, se resumen algunas de las estructuras porosas típicas que a menudo aparecen en las membranas y que vienen determinadas fundamentalmente por el método de preparación utilizado en su fabricación.

De manera contraria, en las membranas densas, “la naturaleza del polímero será el aspecto fundamental que regirá el transporte, ya que las propiedades de solubilidad y difusividad dependen fundamentalmente del material de la membrana, de la naturaleza de los fluidos en contacto y de las posibles interacciones que pueden tener lugar”⁷.

Figura 1. **Diferentes tipos de poros de membranas**

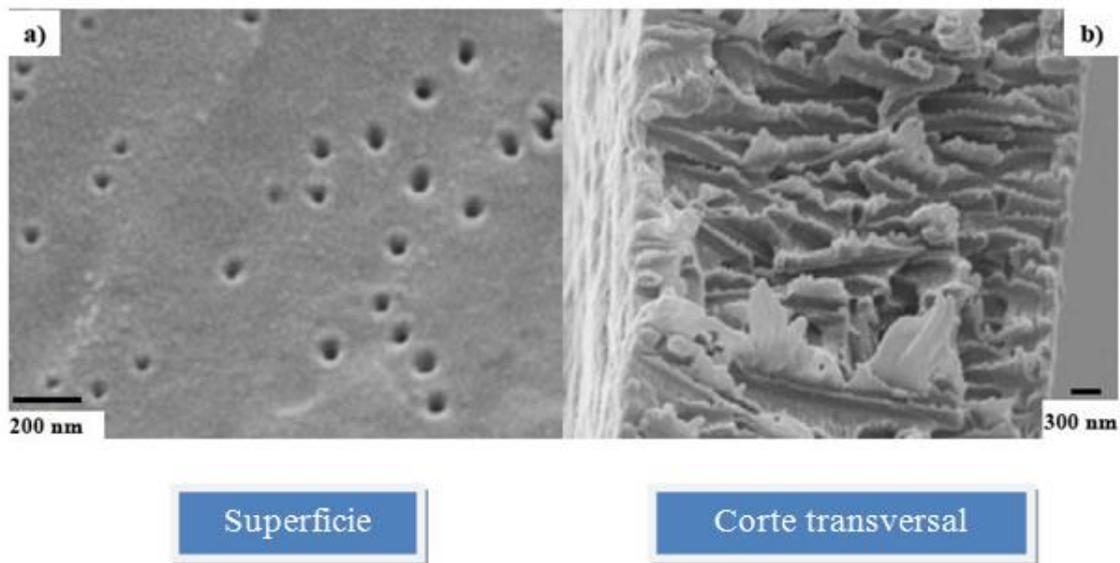
⁶ MACANÁS DE BENITO, Jorge. Desarrollo de Nuevas Membranas Compuestas para la Separación de Iones Metálicos y Aplicaciones Electroquímicas. p. 30.

⁷ Ibid. p. 31.



Fuente: MACANÁS DE BENITO, Jorge. Desarrollo de Nuevas Membranas Compuestas para la Separación de Iones Metálicos y Aplicaciones Electroquímicas. p. 30.

Figura 2. **Imágenes de microscopia electrónica de una membrana**



Fuente: MACANÁS DE BENITO, Jorge. Desarrollo de Nuevas Membranas Compuestas para la Separación de Iones Metálicos y Aplicaciones Electroquímicas. p. 30.

En definitiva., las propiedades de una membrana polimérica, dependerán básicamente de dos factores:

- La naturaleza física y química del polímero.
- El método de preparación de la membrana.

2.1.3. Membranas líquidas

Constituyen una familia especial de membranas, debido a que el material que ejerce de barrera entre dos fluidos, es otro fluido. Son comparables a los sistemas tradicionales de extracción líquido-líquido, pero con la ventaja de que los procesos de extracción y reextracción se producen simultáneamente y no es necesario que se alcance el equilibrio.

Como consecuencia del estado físico de la membrana, los fenómenos de transferencia de masa suelen ser más rápidos, ya que se facilitan los procesos de permeación, disolución y difusión. Imitando los procesos de extracción líquido-líquido modernos que utilizan agentes extractantes, se han desarrollado membranas líquidas en las que la adición de un agente extractante o transportador (*carrier*) soluble, en la fase membrana aumenta la selectividad del transporte por sus interacciones específicas y reversibles con las especies a transportar.

El pequeño volumen de solución orgánica consumido permite que se utilicen sustancias que resultarían demasiado caras para un sistema de extracción líquido-líquido convencional.

Existen diferentes configuraciones de membranas líquidas entre las que destacan las membranas líquidas de volumen (*Bulk Liquid Membranes*, BLM), las membranas líquidas de emulsión (*Emulsion Liquid Membranes*, EML) y las membranas líquidas soportadas (*Supported Liquid Membranes*, SLM), aunque estas últimas pueden entenderse en cierta manera como membranas compuestas, ya que se forman a partir de la combinación de un soporte microporoso inerte y una disolución orgánica que se mantiene gracias a las fuerzas capilares generadas en los poros del soporte. Sin embargo, como el elemento que realmente separa las dos fases, es el líquido que constituye la membrana, es más adecuado clasificarlas como membranas líquidas.

Aunque los sistemas basados en *Bulk Liquid Membranes* son muy sencillos de preparar, ya que sólo es necesario disponer de un receptáculo con la forma deseada (concéntrico, tipo H o tipo U en función de los disolventes implicados) sólo se han utilizado en aplicaciones a escala de laboratorio para realizar estudios de caracterización y modelización de procesos de separación en sistemas de transportadores selectivos y no en procesos industriales, probablemente por la gran cantidad de disolventes necesaria para llevar a cabo aplicaciones de mayor dimensión.

Una cosa parecida sucede en el caso de las *Emulsion Liquid Membranes*. Estas membranas se forman cuando una fase acuosa suspendida en una fase orgánica, gracias a un tensoactivo (Emulsión *water-in-oil*, W/O) se suspende a su vez en otra fase acuosa, dando lugar a un sistema de tres fases (Emulsión *water-in-oil-in-water*, W/O/W), donde la fase acuosa externa ejerce de fase de alimentación, mientras que la fase acuosa atrapada ejerce de fase de recuperación. El mismo esquema podría darse intercambiando las soluciones acuosas y orgánicas. “Debido a su naturaleza, estas membranas son

extremadamente finas y tienen un área superficial inmensa, factores que incrementan considerablemente sus propiedades de transporte”⁸.

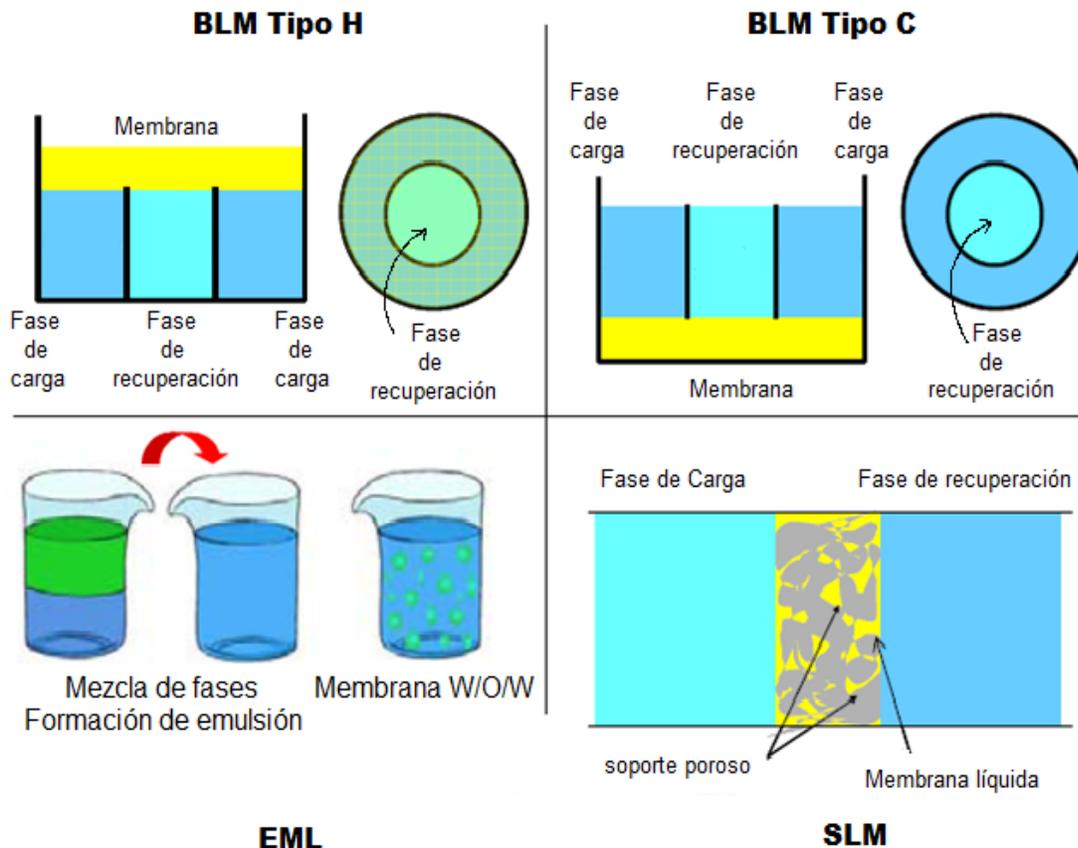
A pesar de que este tipo de membranas son relativamente sencillas de preparar, sufren de una gran irreproducibilidad en su manufactura y presentan grandes dificultades a la hora de recuperar la fase atrapada, por lo que su implementación industrial es casi nula.

De forma similar, la configuración de *Supported Liquid Membranes* plana es la disposición clásica de las membranas líquidas soportadas para el estudio en el laboratorio, donde ofrecen excelentes resultados pero su aplicación práctica está limitada por su baja relación área de membrana/volumen de solución tratada, que hace que el transporte sea lento aunque la membrana sea muy delgada.

Las membranas líquidas soportadas en módulo de fibras huecas (*hollow-fiber supported liquid membrane*, HF-SLM), son en todo similares a las *Supported Liquid Membranes* planas con la excepción que en este caso, el soporte polimérico que constituye el cuerpo de la membrana, es una fibra hueca con paredes porosas que retienen la fase líquida. Estas fibras pueden agruparse dentro de una carcasa para formar módulos de fibras huecas, que aunque aumentan el coste del equipo presentan la ventaja de permitir una introducción y recuperación de las fases líquidas mucho más sencillas en comparación con otro tipo de membranas líquidas.

⁸ MACANÁS DE BENITO, Jorge. Desarrollo de Nuevas Membranas Compuestas para la Separación de Iones Metálicos y Aplicaciones Electroquímicas. p. 39.

Figura 3. **Diferentes tipos de membranas líquidas**



Fuente: MACANÁS DE BENITO, Jorge. Desarrollo de Nuevas Membranas Compuestas para la Separación de Iones Metálicos y Aplicaciones Electroquímicas. p. 40

2.1.4. **Membranas compuestas**

El apelativo general de membrana compuesta (*composite membrane*), se refiere según la *International Unit for Pure and Applied Chemistry* (IUPAC) a las membranas que poseen capas química o estructuralmente diferentes. Quedan excluidas, por tanto, las membranas híbridas, heterogéneas, organo-inorgánicas, etcétera.

En este trabajo, no obstante, se ha decidido integrar todos esos tipos de membranas dentro del concepto de membranas compuestas apelando a la composición de diferentes elementos que al combinarse dan lugar a un nuevo material con propiedades diferentes a las de los elementos de partida. Así, una definición más pertinente de membrana compuesta será la de "una membrana que no está formada por un único material, sino que es el resultado de la combinación de diferentes tipos de materiales en un único producto final"⁹. Se puede decir que las membranas compuestas, están formadas por materiales compuestos que intentan aprovechar las ventajas de los materiales individuales corrigiendo los posibles defectos.

En general las membranas compuestas, mejoran las propiedades de las membranas simples. Así, las típicas membranas compuestas de capas superpuestas están formadas por dos estratos poliméricos con distinta porosidad, denominadas capa porosa y capa fina o densa. Esta estructura hace que las membranas sean capaces de combinar excelentes características selectivas (proporcionadas por la capa fina) con altas permeabilidades (procuradas por la capa porosa).

Estas membranas se preparan siempre mediante un proceso de múltiples etapas y aunque se puede utilizar una gran variedad de polímeros para prepararlas, la polisulfona y sus derivados se utilizan normalmente para este fin, porque combinan una buena resistencia a la compactación con una elevada porosidad superficial que permite secar las membranas sin correr el riesgo de deformarlas.

⁹ MACANÁS DE BENITO, Jorge. Desarrollo de Nuevas Membranas Compuestas para la Separación de Iones Metálicos y Aplicaciones Electroquímicas. p. 42.

Otro ejemplo de membranas compuestas de capas superpuestas, son las membranas bipolares, que están formadas a su vez por una membrana de intercambio catiónico y una membrana de intercambio aniónico combinadas en una única pieza, de manera que cada una de las caras de la membrana presenta propiedades muy diferentes. Este tipo de membranas se utiliza como una alternativa a la electrólisis para la descomposición del agua en hidrógeno e iones hidróxido.

2.2. Tecnología de membrana

La tecnología de membrana, se ha convertido en una parte importante de la tecnología de la separación en los últimos decenios. La fuerza principal de la tecnología de membrana, es el hecho de que trabaja sin la adición de productos químicos, con un uso relativamente bajo de la energía y conducciones de proceso fáciles y bien dispuestas. La tecnología de la membrana, es un término genérico para una serie de procesos de separación; diferentes y muy característicos. Estos procesos son del mismo tipo porque en todos ellos se utiliza una membrana. Las membranas se utilizan cada vez más a menudo para la creación de agua tratada procedente de aguas subterráneas, superficiales o residuales. Actualmente las membranas son competitivas para las técnicas convencionales. “El proceso de la separación por membrana se basa en la utilización de membranas semi- permeables”¹⁰.

El principio es bastante simple: la membrana actúa como un filtro muy específico que dejará pasar el agua, mientras que retiene los sólidos suspendidos y otras sustancias. Hay varios métodos para permitir que las sustancias atraviesen una membrana. Ejemplos de estos métodos son; la

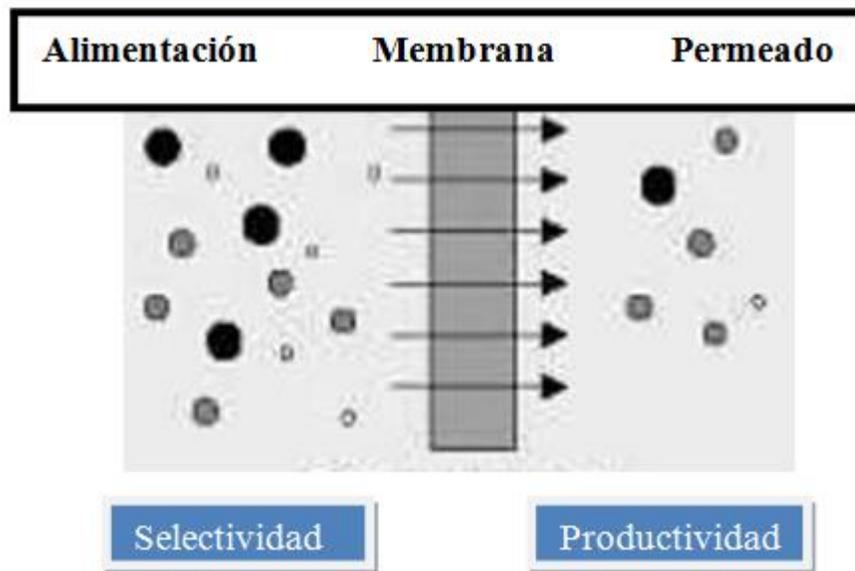
¹⁰ Lenntech. Tecnología de membranas de filtración [en línea]. [ref. de 06 de junio de 2011]. Disponible en web: <http://www.lenntech.es/index.htm>

aplicación de alta presión, el mantenimiento de un gradiente de concentración en ambos lados de la membrana y la introducción de un potencial eléctrico.

La membrana funciona como una pared de separación selectiva. Ciertas sustancias pueden atravesar la membrana, mientras que otras quedan atrapadas en ella.

La filtración de membrana se puede utilizar como una alternativa a la floculación, las técnicas de purificación de sedimentos, la adsorción (filtros de arena y filtros de carbón activado, intercambiadores iónicos), extracción y destilación.

Figura 4. **Esquema de funcionamiento de membranas**



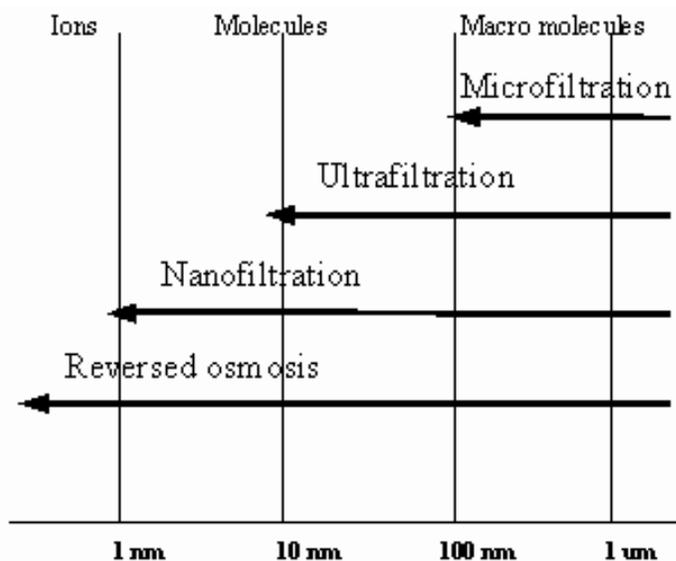
Fuente: Lenntech, BV. Tecnología de Membranas en sistemas de filtración.

<http://www.lenntech.es/index.htm>. [ref. de 06 de junio de 2011].

Hay dos factores que determinan la efectividad de un proceso de filtración de membrana: selectividad y productividad. La selectividad se expresa mediante un parámetro llamado factor de retención o de separación. La productividad se expresa mediante un parámetro llamado flujo. La selectividad y la productividad dependen de la membrana.

La filtración de membrana se puede dividir en micro y ultra filtración, por una parte y en nanofiltración y ósmosis inversa (OI o hiperfiltración) por la otra.

Figura 5. **Clasificación según tamaño de partícula**



Fuente: Lenntech, BV. Tecnología de Membranas en sistemas de filtración.
<http://www.lenntech.es/index.htm>. [ref. de 06 de junio de 2011].

Cuando la filtración de membrana se utiliza para retirar partículas más grandes, se aplican la microfiltración y la ultrafiltración. Debido al carácter abierto de las membranas su productividad es alta, mientras que las diferencias de presión son bajas.

Cuando se necesita desalinizar el agua, se aplican la nanofiltración y la ósmosis inversa. La nanofiltración y las membranas de ósmosis inversa no actúan según el principio de porosidad; la separación ocurre por difusión a través de la membrana. La presión requerida para realizar la nanofiltración y la ósmosis inversa es mucho más alta que la requerida para la micro y ultra filtración, mientras que la productividad es mucho más baja.

La filtración de membrana tiene varias ventajas frente a las técnicas existentes de purificación del agua:

- Es un proceso que puede ocurrir a baja temperatura. Esto es principalmente importante porque permite el tratamiento de los materiales sensibles al calor.
- Es un proceso de bajo coste energético. La mayor parte de la energía requerida es la necesaria para bombear los líquidos a través de la membrana. La cantidad total de energía utilizada es mínima comparada con las técnicas alternativas, tales como evaporación.
- El proceso puede ser fácilmente cambiado de escala.

2.3. Tipos de filtración por membranas

Los sistemas de filtración de membrana, pueden ser manejados tanto en flujo frontal como en flujo tangencial.

El propósito de la optimización de las técnicas de membrana, es el logro de una producción lo más alta posible por un largo período de tiempo, con niveles aceptables de contaminación.

2.3.1. Filtración frontal

Cuando se realiza una filtración frontal, toda el agua que entra en la superficie de la membrana es presionada a través de la membrana. Algunos sólidos y componentes permanecerán en la membrana, mientras que el agua fluye a través de ella. Esto depende en el tamaño de poro de la membrana. En consecuencia, el agua experimentará una mayor resistencia a pasar a través de la membrana. Cuando la presión del agua entrante es continua, esto resultará en un decrecimiento del flujo. Después de un tiempo, el flujo habrá decrecido tanto que la membrana necesitará ser limpiada.

La filtración frontal se aplica porque la pérdida energética es menor que cuando se aplica la filtración tangencial. Esto es porque toda la energía entra en el agua que realmente ha pasado la membrana. Durante la limpieza de una membrana de filtración frontal los componentes son retirados hidráulica, química o físicamente. “Cuando se realiza el proceso de limpieza, un módulo queda temporalmente sin funcionar. Como resultado, la gestión con filtración frontal es un proceso discontinuo”¹¹.

La cantidad de tiempo durante la cual un módulo realiza filtración, se llama tiempo de filtración y la cantidad de tiempo durante la cual un módulo es limpiado, se llama tiempo de limpieza. En la práctica siempre se intenta hacer que el tiempo de filtración sea lo más largo posible, y aplicar el menor tiempo de limpieza posible.

¹¹ SÁNCHEZ FONT, Francesc. “Estudio y Diseño de una Planta de Producción de Membranas Cerámicas de Coste Reducido”. p. 22.

Cuando una membrana es limpiada con el permeado, no tiene una producción continua de agua. Esto resulta en una producción menor. El factor que indica la cantidad de producción se llama recuperación.

2.3.2. Filtración tangencial

Cuando se realiza una filtración tangencial, el agua entrante es reciclada. Durante la recirculación el flujo del agua entrante es paralelo a la membrana. Sólo una pequeña parte del agua entrante se usa para la producción de permeado, la mayor parte dejará el módulo. En consecuencia, la filtración tangencial tiene un alto coste energético. Después de todo, el flujo de agua entrante necesita ser pasado a presión.

La velocidad del flujo de agua paralelo a la membrana, es relativamente alta. El propósito de este flujo es el control del grosor de la capa.

Como consecuencia de la velocidad a la que fluye el agua, las fuerzas de flujo son altas, lo que permite que los sólidos suspendidos sean arrastrados por el flujo de agua. La gestión por filtración tangencial puede alcanzar flujos estables. De todas formas, la limpieza de instalaciones de flujo tangencial debe ser aplicada de cuando en cuando. La limpieza se realiza mediante chorro de agua trasero o mediante limpieza química.

El sistema de flujo tangencial se aplica para ósmosis inversa, nanofiltración, ultrafiltración y microfiltración, dependiendo del tamaño de poro de la membrana.

2.4. Módulos de membrana

La elección de un determinado tipo de sistema de membrana, está determinada por un gran número de aspectos, tales como costes, riesgos de adaptación de las membranas, densidad de embalaje y oportunidades de limpieza. Las membranas nunca son aplicadas como una única placa plana, porque una gran superficie a menudo da lugar a altos costes de inversión. “Es por esto que los sistemas son construidos de forma muy compacta, de manera que se consigue una gran superficie de membrana en el mínimo volumen posible”¹².

Las membranas se aplican en varios tipos de módulos. Hay dos tipos principales, llamados sistema tubular de membrana y sistema placa y marco de membrana. Los sistemas tubulares de membrana se dividen en membranas tubulares, capilares y de fibras huecas. Las membranas de placa y marco se dividen en membranas espirales y membranas almohadiformes.

2.4.1. Membranas de placa y marco

Los módulos de membrana de placa y marco, están constituidos por membranas planas colocadas en paralelo. La filtración es manejada mediante un flujo frontal a través de cada una de las placas. Es la configuración más sencilla en módulos de membrana, sin embargo actualmente no se utiliza en aplicaciones industriales, debido a su elevado coste energético.

Los módulos de membranas de placa y marco han sido desarrollados y servido de base para nuevas configuraciones, entre las que se encuentran las membranas de espiral y las membranas almohadiformes.

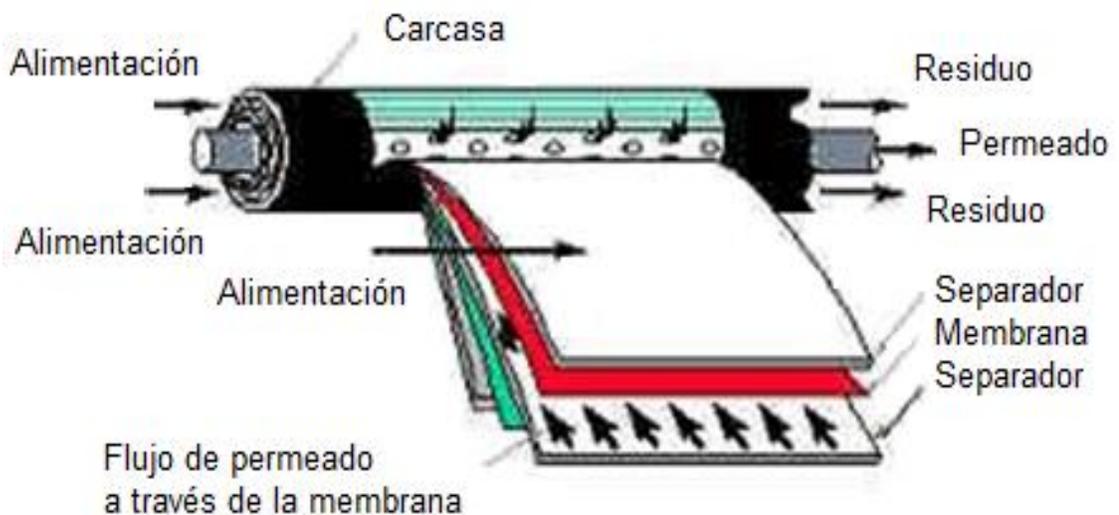
¹² Marcel, Mulder. *Basic Principles of Membrane Technology*. p. 4.

2.4.1.1. Membranas de espiral

Las membranas de espiral, consisten en dos capas de membrana, situadas en un tejido colector de permeados. Esta funda de membrana envuelve a un desagüe de permeados situado en posición central (figura 6). Esto hace que la densidad de embalaje de las membranas sea mayor. El canal de entrada del agua se sitúa a una altura moderada, para prevenir la obstrucción de la unidad de membrana.

“Las membranas de espiral son usadas solamente para aplicaciones de nanofiltración y ósmosis inversa (OI)”¹³.

Figura 6. Membrana de espiral



Fuente: Lenntech, BV. Tecnología de Membranas en sistemas de filtración.

<http://www.lenntech.es/index.htm>. [ref. de 06 de junio de 2011].

¹³ SÁNCHEZ FONT, Francesc. “Estudio y Diseño de una Planta de Producción de Membranas Cerámicas de Coste Reducido”. p. 25.

2.4.1.2. Membranas almohadiformes

Las membranas que constan de placas planas, se llaman membranas almohadiformes. El nombre de almohadiformes viene de la forma de almohada que tienen dos membranas cuando son empaquetadas, juntas en una unidad de membrana. Dentro de la almohada hay una placa de apoyo, que se ocupa de la solidez.

Dentro del módulo se encuentran muchas almohadas con un cierto espacio de separación entre ellas, que depende del contenido en sólidos disueltos del agua residual. El agua fluye de dentro afuera a través de las membranas. Cuando el tratamiento ha sido realizado, el permeado se recoge en el espacio entre las membranas, desde donde es sacado a través de cañerías.

2.4.2. Membranas tubulares

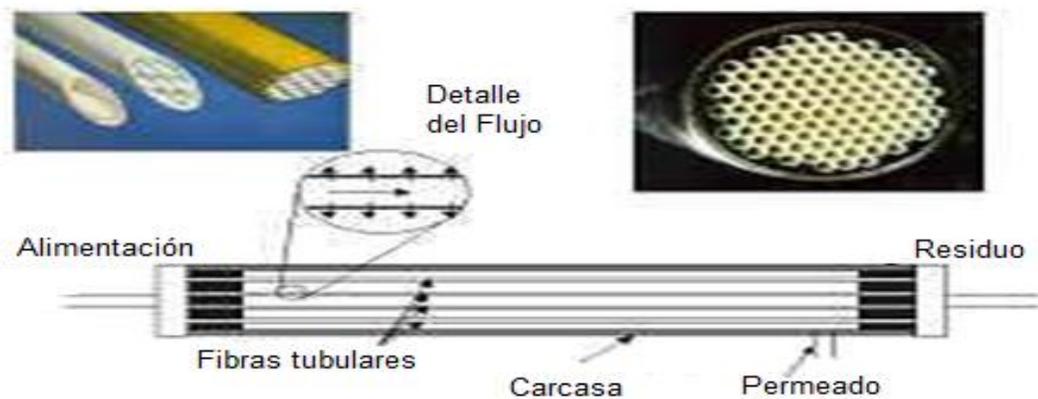
Las membranas tubulares no son membranas autosuficientes. Están situadas dentro de un tubo, hechas de un tipo especial de material. Este material es la capa que sostiene a la membrana. Debido a que las membranas tubulares se localizan dentro de un tubo, el flujo en una membrana tubular es generalmente del revés. “La causa principal de esto, es que la unión de la membrana a la capa que la sostiene, es muy débil”¹⁴.

Las membranas tubulares tienen un diámetro de 5 a 15 milímetros. Debido al tamaño de la superficie de la membrana, no es probable que las membranas tubulares se obstruyan. Un inconveniente de las membranas tubulares, es que

¹⁴ Lenntech. Tecnología de membranas en sistemas de filtración [en línea]. [ref. de 06 de junio de 2011]. Disponible en web: <http://www.lenntech.es/index.htm>

la densidad del empaquetamiento es baja, lo que resulta en un mayor precio por módulo.

Figura 7. **Membranas tubulares**



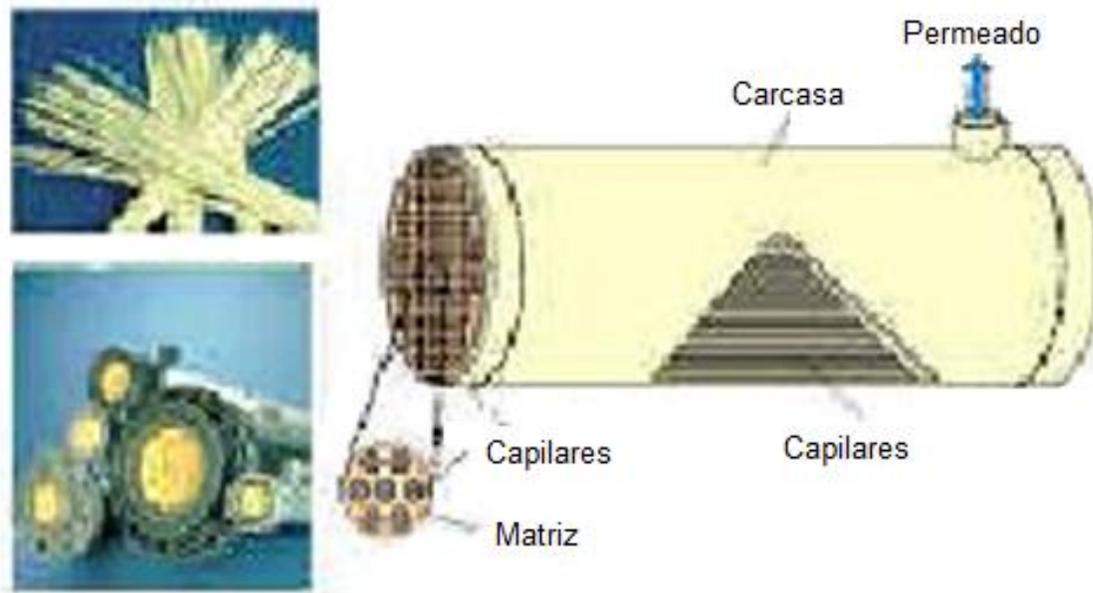
Fuente: Lenntech, BV. Tecnología de Membranas en sistemas de filtración.
<http://www.lenntech.es/index.htm>. [Consulta: de 06 de junio de 2011].

2.4.3. **Membranas capilares**

Con las membranas capilares, la membrana sirve de barrera selectiva, que es suficientemente grande para resistir las presiones de filtración. Debido a esto, el flujo a través de las membranas capilares puede ser tanto de dentro afuera como de afuera a adentro.

El diámetro de las membranas capilares, es mucho más pequeño que el de las membranas tubulares, concretamente de 0,5 a 5 milímetros. Debido al menor diámetro, las probabilidades de obstrucción con una membrana capilar son mucho mayores. Una ventaja es que la densidad de empaquetamiento es mucho mayor.

Figura 8. **Membranas capilares**

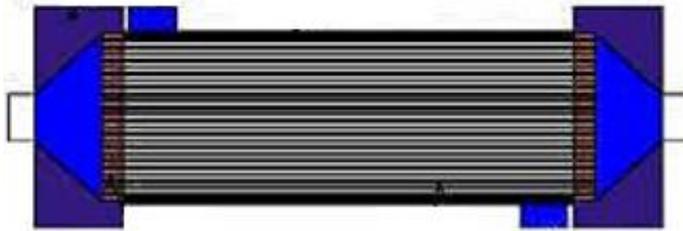


Fuente: Lenntech, BV. Tecnología de Membranas en sistemas de filtración.
<http://www.lenntech.es/index.htm>. [Consulta: 06 de junio de 2011].

2.4.4. Membranas de fibras huecas

Las membranas de fibras huecas tienen un diámetro inferior a 0,1 micrómetros. En consecuencia, las posibilidades de obstrucción de una membrana de fibras huecas son muy elevadas. Las membranas solo pueden ser usadas para el tratamiento de agua con un bajo contenido de sólidos suspendidos. La densidad de empaquetamiento de una membrana de fibras huecas, es muy alta. Las membranas de fibras huecas son casi siempre usadas solamente para nanofiltración y Ósmosis Inversa (OI).

Figura 9. **Membranas de fibras huecas**



Fuente: Lenntech, BV. Tecnología de Membranas en sistemas de filtración.
<http://www.lenntech.es/index.htm>. [ref. de 06 de junio de 2011].

2.5. Modelo matemático de la filtración por membrana

El transporte de partículas a través de una membrana selectiva, es un fenómeno físico e hidráulico, afectado principalmente por los parámetros que gobiernan la transferencia de masas. Para comprender el fenómeno, es necesario construir un modelo matemático, que considere todos los parámetros que influyen en el proceso de transferencia.

2.5.1. Fenómenos de transporte en membranas

Después de hablar de la morfología y configuración de las membranas, se hará énfasis en su principal característica práctica: su habilidad para controlar el paso de sustancias diferentes.

Existen dos modelos principales para explicar este fenómeno: el modelo de disolución-difusión y el modelo de flujo a través de los poros. “Actualmente, el modelo aceptado para el transporte a través de membranas densas, es el primero, el cual considera que las especies permeables se disuelven en el material que forma la membrana y difunden a través de ella, siguiendo un

gradiente de potencial químico como fuerza impulsora”¹⁵. El gradiente de potencial químico se manifiesta como consecuencia de una fuerza impulsora que induce a las moléculas a moverse de un lado a otro de la barrera semipermeable. En el caso de las membranas porosas, la utilización del modelo de flujo a través de los poros resulta más evidente.

Según el modelo de disolución-difusión, se pueden escribir ciertas ecuaciones fenomenológicas en las que el flujo de una especie (i) a través de la membrana, viene descrito por la fórmula general:

$$J_i = -u_i \cdot c_i \cdot \frac{d\mu_i}{dx}$$

Donde u_i es un coeficiente de proporcionalidad denominado movilidad absoluta, c_i la concentración de la especie (i) y μ_i el potencial electroquímico de la especie (i) en una posición dada. El signo negativo indica que el flujo va en sentido contrario a este gradiente.

Los fenómenos de transporte explicados, también se pueden entender a través de una descripción integrada que utiliza ecuaciones similares a la Ley de Ohm en las que se conecta el valor del flujo (J) con la fuerza impulsora (F_d):

$$J = -F_d/R_m = -F_d * P_m$$

Donde R_m y P_m , son la resistencia y permeabilidad de la membrana respectivamente.

¹⁵ MACANÁS DE BENITO, Jorge. Desarrollo de Nuevas Membranas Compuestas para la Separación de Iones Metálicos y Aplicaciones Electroquímicas. p. 49.

Tabla IV. Ecuaciones de transporte según esquema de la Ley de Ohm

Fuerza impulsora	F_d	P_m	R_m
Gradiente de presión	$\frac{dP}{dx}$	$u_i c_i V_i$	$\frac{1}{u_i c_i V_i}$
Gradiente de concentración	$\frac{dc_i}{dx}, \frac{\Delta c_i}{l}$	$D_i = u_i RT$	$\frac{1}{D_i} = \frac{1}{u_i RT}$
Gradiente de campo eléctrico	$\frac{d\phi}{dx}, \frac{\Delta \phi}{l}$	$z_i u_i c_i F$	$\frac{1}{z_i u_i c_i F}$

Fuente: MACANÁS DE BENITO, Jorge. Desarrollo de Nuevas Membranas Compuestas para la Separación de Iones Metálicos y Aplicaciones Electroquímicas. p. 50

En los procesos de filtración, el flujo es función de una fuerza impulsora y de la resistencia al flujo. La presión transmembrana (gradiente de presión), es la fuerza impulsora de los procesos de membranas bajo presión, y se define como la diferencia de presión entre la alimentación y el del permeado.

$$PTM = P_{Alimentación} - P_{Permeado} \quad (\text{Filtración frontal o total})$$

$$PTM = \frac{P_{Alimentación} - P_{Permeado}}{2} \quad (\text{Filtración tangencial})$$

El flujo de permeado aumenta con la PTM, pero disminuye incrementando la resistencia de la membrana. La relación entre el flujo y la resistencia de la membrana se modela según las características del sistema y el proceso de transferencia de masa, describa el paso de las partículas a través de la membrana.

“En el caso de la microfiltración en membranas porosas, la transferencia de masa ocurre debido a la porosidad de la membrana por lo que el proceso se modela mediante la ecuación de Darcy”¹⁶.

$$J = k * PTM$$

Donde J es el flujo del permeado y k es el coeficiente de permeabilidad característico del sistema. En esta ecuación el flujo aumenta linealmente con la PTM siguiendo la Ley de Darcy.

A pesar de esta descripción relativamente simple, en la práctica se utilizan otras ecuaciones más sencillas para cuantificar el transporte a través de las membranas y su selectividad como las que se muestran en la tabla V; donde C, C_i, C_A y C_B representan la concentración de una determinada especie, el subíndice (O) corresponde al tiempo inicial, el subíndice (t) corresponde a un determinado tiempo y los superíndices (s) y (f) corresponden respectivamente a la fase de recuperación y a la fase de alimentación.

¹⁶ SÁNCHEZ FONT, Francesc. “Estudio y Diseño de una Planta de Producción de Membranas Cerámicas de Coste Reducido”. p. 66.

Tabla V. **Ecuaciones prácticas para la cuantificación del transporte**

Parámetro	Ecuación
Porcentaje de extracción (%E)	$E = 100 \cdot \left(\frac{C_{t,i}^f}{C_{0,i}^f} \right)$
Porcentaje de reextracción (%R)	$R = 100 \cdot \left(\frac{C_{t,i}^s}{C_{0,i}^f} \right)$
Retención (R_t)	$R_t = \frac{(C_i^f - C_i^s)}{C_i^f} = 1 - \left(\frac{C_i^s}{C_i^f} \right)$
Factor de separación (α)	$\alpha_{A/B} = \frac{(C_{t,A}^s - C_{t,B}^s)}{(C_{0,A}^f - C_{0,B}^f)}$

Fuente: MACANÁS DE BENITO, Jorge. Desarrollo de Nuevas Membranas Compuestas para la Separación de Iones Metálicos y Aplicaciones Electroquímicas. p. 51

2.6. Obstrucción de la membrana

Durante los procesos de filtración de membrana, la obstrucción de la membrana es inevitable, incluso con un pretratamiento suficiente. Los tipos y las cantidades de suciedad dependen de muchos factores diferentes, tales como la calidad del agua, tipo de membrana, material de la membrana, diseño y control de los procesos.

Partículas, bioobstrucción y *scaling* son los tres tipos principales de suciedad en una membrana. Estos contaminantes hacen que se requiera una

mayor carga de trabajo, para poder garantizar una capacidad continua de las membranas. Llegará el punto en el que la presión aumentará tanto que ya no será rentable, ni económica, ni técnicamente.

2.7. Limpieza de la membrana

Existen varios métodos diferentes de limpieza de membranas, tales como lavado por chorro delantero, lavado por chorro trasero y lavado por chorro de aire.

Cuando se aplica un chorro de agua delantero, las membranas son lavadas desde adelante con el agua entrante o con el permeado. El agua entrante o el permeado fluyen a través del sistema más rápidamente que durante la fase de producción. Debido a la mayor rapidez de flujo y a la turbulencia resultante, las partículas que habían sido absorbidas por la membrana, son liberadas y descargadas. Las partículas que habían sido absorbidas por los poros de la membrana, no son liberadas. Estas partículas solo pueden ser eliminadas por medio del lavado con chorro de agua trasero.

El lavado con chorro de agua trasero, es un proceso de filtración inversa. Se hace fluir el permeado a presión a través de la parte por donde entra el agua, aplicando el doble de flujo que se usa durante la filtración. En caso de que el flujo no se haya restablecido suficientemente después del lavado con chorro de agua trasero, se puede aplicar un proceso de limpieza química.

Durante el proceso de limpieza química, las membranas son empapadas con una solución de lejía clorada, ácido hipoclorhídrico o peróxido de hidrógeno. Primeramente la solución se empapa en las membranas durante unos minutos y después se aplica un chorro de agua delantero o trasero que enjuaga los contaminantes.

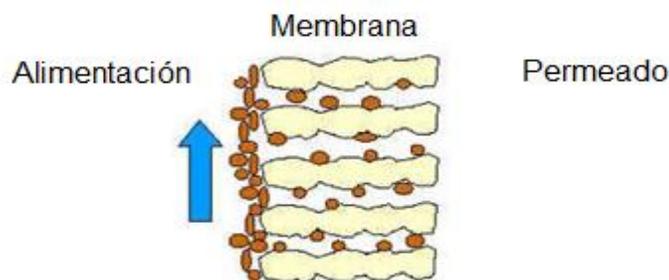
Un método de limpieza más innovador, es el llamado lavado por chorro de aire o por chorro de aire y agua. Este es un lavado por chorro delantero durante el cual se inyecta aire en el tubo de abastecimiento. Debido a la inyección del aire (permaneciendo igual la velocidad del agua), se crea un sistema de limpieza mucho más turbulento.

2.7.1. Lavado con chorro delantero

Cuando se aplica un flujo desde adelante a una membrana, se abre la barrera responsable del manejo de los *dead-end*. Al mismo tiempo la membrana está realizando temporalmente una filtración tangencial, sin la producción de permeado.

“El propósito del chorro de agua delantero, es la eliminación de la capa de contaminantes formada en la membrana por medio de la creación de turbulencias. Durante el lavado con chorro de agua delantero se tiene alto gradiente de presión hidráulica”¹⁷.

Figura 10. Lavado con chorro delantero



Fuente: Lenntech, BV. Tecnología de Membranas en sistemas de filtración.

<http://www.lenntech.es/index.htm>. [ref. de 06 de junio de 2011].

¹⁷ Lenntech. Tecnología de membranas en sistemas de filtración [en línea]. [ref. de 06 de junio de 2011]. Disponible en web: <http://www.lenntech.es/index.htm>

2.7.2. Lavado con chorro trasero

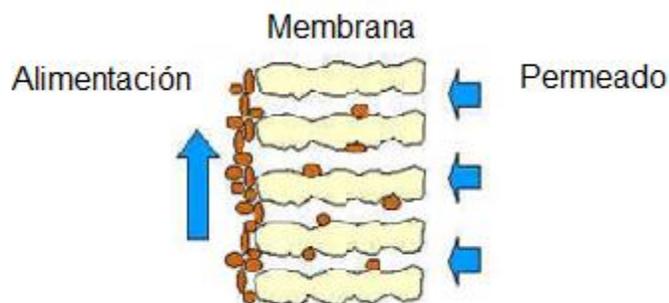
Cuando se aplica un flujo desde atrás, los poros de la membrana son lavados del revés. La presión en la parte del permeado de la membrana, es mayor que la presión dentro de las membranas, haciendo que los poros se limpien. El lavado con chorro trasero, se realiza bajo una presión sobre 2,5 veces mayor que la presión de producción.

El permeado es lo que siempre se usa para lavar desde atrás, porque la cámara del permeado siempre debe estar libre de contaminantes.

Una consecuencia del lavado con chorro trasero, es un decrecimiento en la recuperación del proceso. Debido a esto, el lavado con chorro trasero debe realizarse en el menor tiempo posible.

Sin embargo, el chorro debe ser mantenido el tiempo suficiente para lavar el volumen de un módulo por lo menos una vez.

Figura 11. Lavado con chorro trasero



Fuente: Lenntech, BV. Tecnología de Membranas en sistemas de filtración.

<http://www.lenntech.es/index.htm>. [ref. de 06 de junio de 2011].

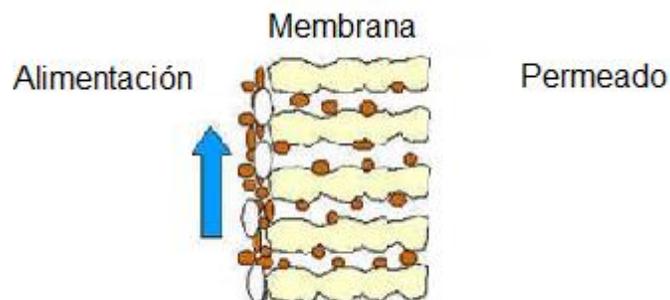
2.7.3. Limpieza por chorro de aire o por chorro de aire y agua

La suciedad de la superficie de la membrana necesita ser eliminada tan efectivamente como sea posible durante la limpieza con chorro trasero. El así llamado lavado con chorro de aire, ha demostrado ser muy útil para la realización de este proceso. El uso de un chorro de aire, significa lavar el interior de las membranas con una mezcla de aire y agua.

Durante el lavado con aire, se añade aire al chorro de agua delantero, provocando la formación de burbujas, que producen una mayor turbulencia. Debido a esta turbulencia, la suciedad se desprende de la superficie de la membrana.

La ventaja del lavado con chorro de aire frente al lavado con chorro de agua delantero, es que usa una menor capacidad de bombeo durante el proceso de limpieza.

Figura 12. Limpieza con chorro de aire



Fuente: Lenntech, BV. Tecnología de Membranas en sistemas de filtración.

<http://www.lenntech.es/index.htm>. [ref. de 06 de junio de 2011].

2.7.4. Limpieza química

Cuando los métodos de limpieza anteriormente mencionados no son suficientemente efectivos para reducir el flujo hasta un nivel aceptable, es necesario limpiar las membranas químicamente.

Durante la limpieza química, productos químicos como el ácido clorhídrico (HCl) y el ácido nítrico (HNO₃), o agentes desinfectantes, como el peróxido de hidrógeno (H₂O₂), son añadidos al permeado durante el flujo trasero.

Tan pronto como el módulo entero está lleno del permeado, los productos químicos tienen que empaparse. Después de que estos químicos se hayan empapado totalmente, el módulo se lava y, finalmente, puestos de nuevo a funcionar.

A menudo se combinan los métodos de limpieza. Por ejemplo, uno puede usar un flujo trasero para la eliminación de la suciedad de los poros, seguido de un lavado de chorro de agua o de aire delanteros.

El método o estrategia de limpieza utilizada, depende de muchos factores. En la práctica, los métodos más adecuados son determinados por prueba y error.

2.8. Aplicaciones de las membranas

Las aplicaciones que involucran membranas, están ampliamente extendidas en el sector industrial. “Tan sólo las ventas anuales de equipos para hemodiálisis superan los 250 millones de euros. Por otro lado, si se tiene en cuenta de manera conjunta los procesos de filtración, la cifra asciende

a 2 000 millones de euros”¹⁸. Son inversiones muy elevadas que dan fé de la importancia del sector. En la tabla VI, se pueden encontrar algunas de las numerosas aplicaciones de las membranas, así como la fuerza impulsora que permite la separación y las especies transportadas o separadas.

Tabla VI. **Procesos comercializados de membranas**

Proceso de separación	Fuerza impulsora (gradiente)	Especies transportadas
Permeación de gases	Presión	Gases
Pervaporación	Concentración Temperatura	Volátiles
Diálisis	Concentración	Solutos
Electrodiálisis	Potencial eléctrico	Especies iónicas
Electrofiltración	Potencial eléctrico	Especies iónicas
Ósmosis inversa	Presión Concentración	Disolventes (agua)
Ultrafiltración	Presión	Soluciones
Microfiltración	Presión	Soluciones
Nanofiltración	Presión	Soluciones
Destilación con membranas	Temperatura	Volátiles
Membranas líquidas (fibra hueca)	Concentración pH	Solutos
Transporte facilitado	Concentración pH	Solutos

Fuente: MACANÁS DE BENITO, Jorge. Desarrollo de Nuevas Membranas Compuestas para la Separación de Iones Metálicos y Aplicaciones Electroquímicas. p. 54

¹⁸ MACANÁS DE BENITO, Jorge. Desarrollo de Nuevas Membranas Compuestas para la Separación de Iones Metálicos y Aplicaciones Electroquímicas. p. 54

A continuación se clasifican las aplicaciones, haciendo referencia a las funciones que las membranas pueden realizar: membranas para aplicaciones, de separación, membranas reactoras, membranas sensoras.

2.8.1. Membranas para aplicaciones de separación

Seguidamente se citan algunas aplicaciones clásicas, en las que el papel de la membrana se centra en la separación independientemente de la fuerza impulsora del proceso. La mayoría de estas aplicaciones, son comerciales desde hace varios años y los mecanismos implicados han sido descritos en profundidad. Algunas de estas aplicaciones ampliamente extendidas, son la separación por filtración (en sus diferentes modalidades), la separación de gases, la pervaporación y la electrodiálisis que se comentan a continuación. Además, se ha realizado un especial énfasis en las aplicaciones de las membranas para liberación controlada de sustancias, debido a un importante auge que ha experimentado, este tipo de proceso en las últimas décadas.

2.8.1.1. Filtración

En las técnicas de filtración y en la ósmosis inversa, la fuerza impulsora es la diferencia de presión. El proceso de selección de los solutos que atraviesan la membrana viene determinado únicamente por el tamaño de poro de la membrana. Tamaños diferentes de poro, implican rangos de presión distintos y permeación de diferentes solutos tal y como se refleja en la tabla VII.

Tabla VII. **Procesos de filtración o espectro de filtración**

Técnica	Siglas	Tamaño de Poro	Rango de presión	Especies que permean
Microfiltración	MF	0,1 a 10 μm	<2 bares	Moléculas de peso molecular (PM) medio
Ultrafiltración	UF	0,01 a 1 μm	2 a 10 bares	Disolventes, iones, moléculas de bajo PM
Nanofiltración	NF	<0,1 μm	10 a 60 bares	Solutos de bajo PM
Ósmosis inversa	OI	Membranas densas	10 a 100 bares	Disolventes

Fuente: MACANÁS DE BENITO, Jorge. Desarrollo de Nuevas Membranas Compuestas para la Separación de Iones Metálicos y Aplicaciones Electroquímicas. p. 54

2.8.1.2. Separación de gases y pervaporación

En los procesos de separación de gases, se utilizan membranas homogéneas asimétricas y membranas compuestas. Algunas de las aplicaciones más destacables, son la separación de los componentes del aire (enriquecimiento en O_2), reajuste de proporciones en el gas de síntesis, deshumidificación del aire y separación de CO_2 de gas natural.

Por su parte, “la pervaporación es un proceso en el cual un componente líquido de una mezcla permea selectivamente a través de una membrana densa, debido a un gradiente de presión de vapor a los dos lados de la membrana”¹⁹. Mediante la pervaporación se pueden realizar separaciones de mezclas azeotrópicas que una destilación sencilla no permitiría resolver. Una aplicación muy extendida, es la deshidratación de disolventes.

¹⁹ MACANÁS DE BENITO, Jorge. Desarrollo de Nuevas Membranas Compuestas para la Separación de Iones Metálicos y Aplicaciones Electroquímicas. p. 55

2.8.1.3. Electrodialisis

En electrodialisis se emplean membranas de intercambio iónico con carga fija, para obtener por ejemplo agua pura de una solución salina. El campo eléctrico aplicado, pone los iones salinos (solutos) en movimiento hacia el electrodo de signo contrario. Como las membranas resultan impermeables a los iones con carga de igual signo que la membrana, se produce un rechazo que finalmente proporciona una solución salina altamente concentrada y otra solución desalada.

Como se puede apreciar en la tabla VIII, existe un gran número de aplicaciones industriales concretas de la electrodialisis pero en todas ellas uno de los principales problemas que restringen su aplicabilidad son los costes de la energía eléctrica necesaria para llevar a cabo la separación.

Tabla VIII. **Aplicaciones industriales de la electrodialisis**

Aplicación industrial	Principal problema
Desalinización de agua salobre	Concentración de la fase de alimentación y costes
Producción de agua para alimentación de calderas	Calidad del agua producida y costes
Tratamiento de aguas residuales	Propiedades de la membrana y costes
Producción de agua ultrapura	Calidad del agua producida y costes
Desmineralización de productos alimenticios	Selectividad de la membrana y costes
Producción de sal de mesa	Costes
Concentración de salmuera de ósmosis inversa	Costes

Fuente: MACANÁS DE BENITO, Jorge. Desarrollo de Nuevas Membranas Compuestas para la Separación de Iones Metálicos y Aplicaciones Electroquímicas. p. 55

2.8.2. Membranas reactoras

Se entiende como membranas reactoras, aquellas cuyo papel fundamental dentro de un proceso es acoger una reacción química. “La combinación de separación y reacción química permite realizar en un solo paso, una gran variedad de operaciones”²⁰. En los últimos años, este tema ha sido objeto de una profunda investigación y se ha generado gran número de publicaciones muy interesantes que demuestran las ventajas de las membranas reactoras o, de los reactores que incorporan membranas sobre los procesos secuenciales como son:

- El incremento de las tasas de reacción.
- La minimización de productos secundarios.
- Los menores requerimientos energéticos.

Sucintamente, las funciones básicas que llevan a cabo las membranas de este tipo son tres:

- Adición de reactivos.
- Recuperación de productos.
- Retención del los catalizadores.

Además, a menudo se da el caso de procesos que combinan dos o incluso las tres funciones en la misma membrana. Así, por un lado existen los reactores de tipo extractivo, en los cuales al menos uno de los productos generados en la reacción química puede atravesar la membrana y ser separado. En

²⁰ MACANÁS DE BENITO, Jorge. Desarrollo de Nuevas Membranas Compuestas para la Separación de Iones Metálicos y Aplicaciones Electroquímicas. p. 57

oposición a los extractores, existen otros reactores de membrana que son catalíticos por sí mismos. En este caso las membranas utilizadas no tienen ninguna propiedad especial de separación, sino que facilitan el contacto de los reactivos separados en los sitios catalíticos en el interior de la membrana. Un ejemplo son las membranas catalíticas de microfiltración de poliestireno sulfonado que han demostrado su potencial como catalizadores heterogéneos ácidos, ya que los sitios activos ácidos del polímero son muy accesibles a las especies reaccionantes.

2.8.3. Membranas sensoras

El desarrollo de sensores para la detección y la determinación cuantitativa de diversas especies orgánicas e inorgánicas, tiene una gran aplicación en campos como el clínico, biomédico o medioambiental. Un buen sensor químico debe tener buena sensibilidad, selectividad, reversibilidad, velocidad de medida y longevidad para que se analice de manera sencilla con un mínimo de gasto energético y de muestra. Muchos de los sensores químicos y biosensores desarrollados hasta el momento se basan en membranas sensoras.

“Entendemos como membranas sensoras aquellas que participan en el reconocimiento o en la detección de una determinada sustancia dentro de un sistema analítico”²¹. Las membranas sensoras cumplen dos funciones básicas: inmovilización y separación. Por un lado, la matriz de la membrana debe alojar y retener en su interior tanto aquellos elementos sensibles (ionóforos, enzimas, anticuerpos, ácidos nucleicos...) como otros elementos necesarios (coenzimas, nanopartículas, plastificantes...) que ejercen de mediadores en la reacción de reconocimiento, facilitan la transferencia de electrones, modifican la

²¹ MACANÁS DE BENITO, Jorge. Desarrollo de Nuevas Membranas Compuestas para la Separación de Iones Metálicos y Aplicaciones Electroquímicas. p. 61

hidrofobicidad de los polímeros empleados o, en definitiva, realizan alguna modificación beneficiosa para el correcto funcionamiento del sensor.

Por otro lado, las membranas sensoras ejercen de barrera físico-química contra las posibles interferencias que podrían modificar la señal analítica. Estas barreras pueden actuar como simples barreras de exclusión (efecto tamiz) o pueden repeler determinadas especies en función de su carga (membranas aniónicas o catiónicas).

2.9. Estaciones experimentales

Una estación experimental, es un módulo de proceso a escala reducida. El fin que se persigue al instalar una estación experimental, es obtener información sobre un determinado proceso físico o químico, así como establecer los parámetros de operación óptimos de dicho proceso, además de complementar el estudio teórico del proceso con la experimentación. Fuera de la didáctica permite evaluar la viabilidad económica de un proceso antes de llevarlo a escala industrial.

2.9.1. Aplicaciones

La investigación para el estudio de nuevos procesos físico-químicos, o para la mejora de procesos ya existente, se lleva a cabo en estaciones experimentales, reduciéndose así los costes asociados a la inversión y a los gastos fijos de operación inherentes a una planta industrial. Igualmente, se utilizan estaciones experimentales para la investigación de bioprocesos, o procesos químicos que involucran organismos o sustancias bioquímicamente activas, derivadas de dichos organismos.

En este caso el biorreactor debe mantener un ambiente biológicamente activo y propicio para el organismo que se cultiva, por lo que el control de las variables de proceso es crítico. En el caso de procesos catalíticos, se emplean estaciones experimentales para el ensayo de nuevos catalizadores, con el objeto de estudiar su actividad y selectividad para una determinada reacción química y de optimizar las variables de proceso.

Por último, también se utilizan estaciones experimentales como equipamiento científico para educación en universidades, o como sistemas para demostración.

El término estación experimental, abarca un amplio rango de escalas, desde estaciones a escala laboratorio, hasta estaciones a escala semi-industrial. Los avances tecnológicos en distintas áreas (electrónica, comunicaciones, micromecanizado, etc.) han hecho posible que hoy día se disponga de instrumentación y dispositivos adecuados para la instalación de estaciones experimentales a escala muy reducida, estaciones a microescala, capaces de operar en idénticas condiciones de presión y temperatura que las plantas industriales.

Estos avances ha conducido igualmente a que estas estaciones a microescala cuenten con sistemas de adquisición de datos, supervisión y control (sistemas SCADA) y puedan ser automatizadas, de manera que la producción experimental se multiplique y se reduzca, así, considerablemente el tiempo necesario para el estudio y la optimización de un proceso físico-químico concreto.

Una estación experimental debe ser mucho más flexible que una planta a escala industrial en cuanto al rango permisible de sus parámetros de operación

o variables de proceso, ya que una planta industrial opera siempre en las mismas condiciones, mientras que una estación experimental, por el hecho de estar destinada a la investigación o estudio de un proceso, debe permitir trabajar en un amplio rango de valores de temperatura, presión, etcétera, de manera que puedan realizarse experimentos o ensayos con valores bien distintos de las variables de proceso, y poder determinar, así, los valores óptimos.

“Aunque, en los últimos años se han desarrollado diversas herramientas para simulación de procesos por ordenador, estos sistemas no pueden sustituir a las estaciones experimentales, ya que no son capaces de predecir el comportamiento de nuevos procesos, de los que no existen datos disponibles, ni de procesos complejos”²².

Las estaciones experimentales, cumplen su función educativa y reducen el riesgo asociado con la construcción de plantas de gran escala, siempre y cuando hayan sido implementadas correctamente.

²² Martha, Libedisnki. *La innovación en la enseñanza [en línea]. [ref. de 05 de Junio del 2011]. Disponible en web: <<http://www.universidadlasallebenavente.edu.mx/investigacion/revista/mayoagosto06/P%20diversas/laexperimentacion.htm>>*

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

En matemáticas y en lógica, una variable es un símbolo constituyente de un predicado, fórmula o algoritmo. El término variable, se utiliza para designar una cantidad susceptible de tomar distintos valores numéricos. Las variables permiten cuantificar la operación de la estación experimental y estudiar el fenómeno de separación por membranas selectivas

En la presente investigación se consideran principalmente 2 tipos de variables, según su relación con otras variables:

- Variable independiente: es una variable cuyo valor puede variar independientemente de otras. Otra manera de indicar esto, es el valor de la variable independiente no depende del valor de cualquier otra variable.
- Variable dependiente: es una variable cuyo valor depende enteramente de otras. Son las variables de respuesta que se observan en la investigación y que podrían estar influenciadas por los valores de las variables independientes.

En la tabla IX, se presenta una definición de cada una de las variables encontradas en la operación de la estación experimental, además se clasificó cada variable en dependientes e independientes, a fin de identificar las variables con las que se trabajó durante la práctica experimental.

Tabla IX. **Definición operacional de las variables**

Variable	Dimensionales	Definición	Tipo
Tiempo	Segundos (s)	Es la magnitud física con la que se mide la duración o separación de acontecimientos sujetos a cambio, de los sistemas sujetos a observación	Dependiente
Volumen	Metros cúbicos (m ³)	Es la magnitud física que expresa la extensión de un cuerpo en tres dimensiones.	Dependiente
Presión	Pascales (Pa)	Es medida de una fuerza perpendicular por unidad de superficie.	Dependiente
Velocidad de flujo	Metros por segundo (m/s)	Es un vector, el cual se utiliza para describir matemáticamente el movimiento de un líquido.	Dependiente
Caudal volumétrico	Metro cubico por segundo (m ³ /s)	Cantidad de fluido que avanza en una unidad de tiempo. Es el volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo.	Dependiente
Retención	Adimensional	Es la medida de la cantidad del soluto retenida por la membrana.	Dependiente
Porcentaje de recuperación	Porcentual (%)	Es la proporción entre el flujo en el permeado y el flujo de la alimentación	Dependiente
Radio de Poro	Micrómetros (µm)	Radio promedio de los poros en una membrana.	Independiente (característica del filtro)
Coficiente de permeabilidad	Metro partido segundo por pascales (m/s * Pa)	Medida de la capacidad de un material para que un fluido lo atraviere sin alterar su estructura interna	Independiente (característica del filtro)
Concentración	Partes por millón (ppm)	Es la proporción o relación que hay entre la cantidad de soluto y la cantidad de disolvente.	Inicial: independiente Final: dependiente
Abertura de válvula	Porcentaje (%)	En la medida de la fracción del recorrido del mecanismo de la válvula de la posición de cerrado a abertura total.	Independiente

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación de campo de estudio

En un trabajo de investigación, antes de recoger información, debe de definirse los límites del estudio, a fin de no correr el riesgo de reunir datos innecesarios. Con el propósito descrito anteriormente, se procedió a delimitar el campo de estudio.

3.2.1. Determinación del problema

En la investigación, el planteamiento y determinación del problema es fundamental para establecer los pasos a seguir y una posible solución. Reducir el problema a términos concretos permite identificar el curso de la investigación.

3.2.1.1. Definición

El curso de separación por membranas selectivas, estudia los principios elementales y específicos del fenómeno de filtración por membranas selectivas. Da una clasificación detallada de los distintos tipos de membranas utilizadas, su funcionamiento y las bases de operación de los procesos a diferentes escalas que se operan en la industria.

A pesar de ello, no cuenta con el complemento que permita instruir al estudiante en los conocimientos obtenidos al observar el fenómeno de primera mano durante la operación de los distintos equipos que se basan en dichos principios en la industria. Estos conocimientos prácticos complementan a la teoría y permiten una mejor base para tratar con los problemas encontrados en la aplicación de los procesos. A fin de brindar una comprensión más completa se debe incorporar un sistema de enseñanza que combine la instrucción teórica con la práctica de laboratorio y de manejo de equipo.

3.2.1.2. Delimitación

El estudio de la separación por membranas selectivas, comprende una amplia gama de factores, los cuales describen el comportamiento del fenómeno. Es posible por medio de una estación experimental aislar dichos factores para establecer un estudio que permita caracterizar el proceso y combinar la instrucción teórica con la práctica de laboratorio y de manejo de equipo.

Aunque el fin de estación experimental, es brindar la posibilidad de aislar todos los posibles factores para prácticas experimentales, el estudio del presente trabajo de investigación se limitará a ensayar el efecto de las variables de operación en el sistema, manteniendo constante las características propias de la membrana y la sustancia que se desea separar durante el experimento.

Para este propósito la delimitación del campo de estudio, se describe de la siguiente manera:

- Universo de estudio: sistemas de filtración a membranas.
- Selección y tamaño de muestra: estación de laboratorio consistente en un equipo de filtración a presión constante por membranas a pequeña escala.
- 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.

3.3. Recursos humanos disponibles

Se define como el número de personas disponibles, para llevar a cabo el trabajo de investigación. Incluye no solo a los investigadores, sino que a la vez cuenta con los estudiantes que conforman el grupo de estudio. Se enumera detalladamente a continuación:

- Investigador: tesista Edgar Alejandro Arana Valenzuela
- Asesor: Ing. Qco. Renato Giovanni Ponciano Sandoval, M.A., M. Sc.
- Grupo de estudio: estudiantes del curso de Ingeniería Química, separación por membranas selectivas.

3.4. Recursos materiales disponibles

Son los medios físicos y concretos que ayudan a conseguir algún objetivo. En el trabajo de investigación incluye, a las instalaciones, el equipo usado durante la práctica experimental y el material de estudio asociado al tema. Se enumera detalladamente a continuación:

- Edificio: laboratorios asignados, edificio T5, Universidad de San Carlos de Guatemala. Laboratorio Biológico Industrial (LABIND).
- Equipo: estación experimental de sistema de filtración a presión constante por membranas donada a la universidad por LABIND, computador y equipo seleccionado para ensayos que incluye:
 - Balanza analítica
 - *Beacker*

- *Earlenmeyer*
 - Balones de aforo
 - Pipetas
 - Pizeta
 - Celdas de cristal
 - *Checker* de análisis de hierro total HANNA HI725
 - Reactivos varios
- Material de estudio: libros, publicaciones y documentos asociados al tema.

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

En el estudio del fenómeno, además de la instalación de una estación experimental se desea comprobar mediante una práctica de laboratorio los efectos de la modificación de parámetros en el funcionamiento de las membranas a fin de generar las curvas de operación, cuantificar las características de la membrana y estudiar su eficiencia. Esto se logró mediante un Estudio Experimental que combina elementos cuantitativos y cualitativos, como se describe a continuación:

3.5.1. Cuantitativo

A través del estudio de los cambios percibidos, en el fenómeno al alterar los valores de las variables del mismo. Variables como la concentración de la sustancia problema, presiones y velocidades de flujo.

3.5.2. Cualitativo

La factibilidad de la práctica se evaluó con base a la experiencia adquirida por los estudiantes que integraron el grupo de estudio. Esto se logró mediante el uso de encuestas que evalúan el nivel del aprendizaje adquirido en la práctica y la eficacia con que el equipo representa el fenómeno estudiado.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Para alcanzar los propósitos establecidos en el estudio experimental, la recolección de los datos se realizó por medio de un procedimiento experimental, con el que se busca generar las curvas de operacionales del equipo. El grupo de estudio fue integrado por 24 estudiantes del curso de separación por membranas selectivas en el primer semestre del 2012.

Como primer paso, se realizaron las gestiones administrativas necesarias con el coordinador del Laboratorio de Operaciones Unitarias y el coordinador del Laboratorio de Físicoquímica para la habilitación del espacio físico para la estación experimental.

Para el estudio experimental, se ensayó el efecto de las variables de operación en el sistema, manteniendo constante las características propias de la membrana y la sustancia que se desea separar durante el experimento. Se ha seleccionado una membrana de microfiltración marca USFILTER, modelo CP-5 de Plymouth Products con un diámetro de poro de 10 micrómetros, fabricada de celulosa. Las características principales para la selección son su capacidad de filtración, fácil manejo y su fácil limpieza al saturarse extendiendo su tiempo de vida.

Durante el desarrollo de la práctica experimental, se estableció la medición de parámetros como la concentración de entrada y de salida en el sistema de membranas a diferentes caudales para calcular las propiedades de la membrana. Para dicho propósito se requirió de una sustancia problema de fácil determinación, por lo que se preparó a partir de diferentes concentraciones de hierro la solución con que se alimentó el sistema. La solución de hierro se elaboró partir de sulfato ferroso heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) debido su estabilidad, fácil manipulación y bajo costo.

El hierro como sustancia problema presentó complicaciones debido a que por el diámetro de la partícula se requiere en una separación efectiva de una membrana de ultrafiltración. Para este propósito se trató con soda caustica y floculantes (sulfato de aluminio) comerciales a fin de formar partículas de mayor tamaño fácilmente separables con la membrana de microfiltración.

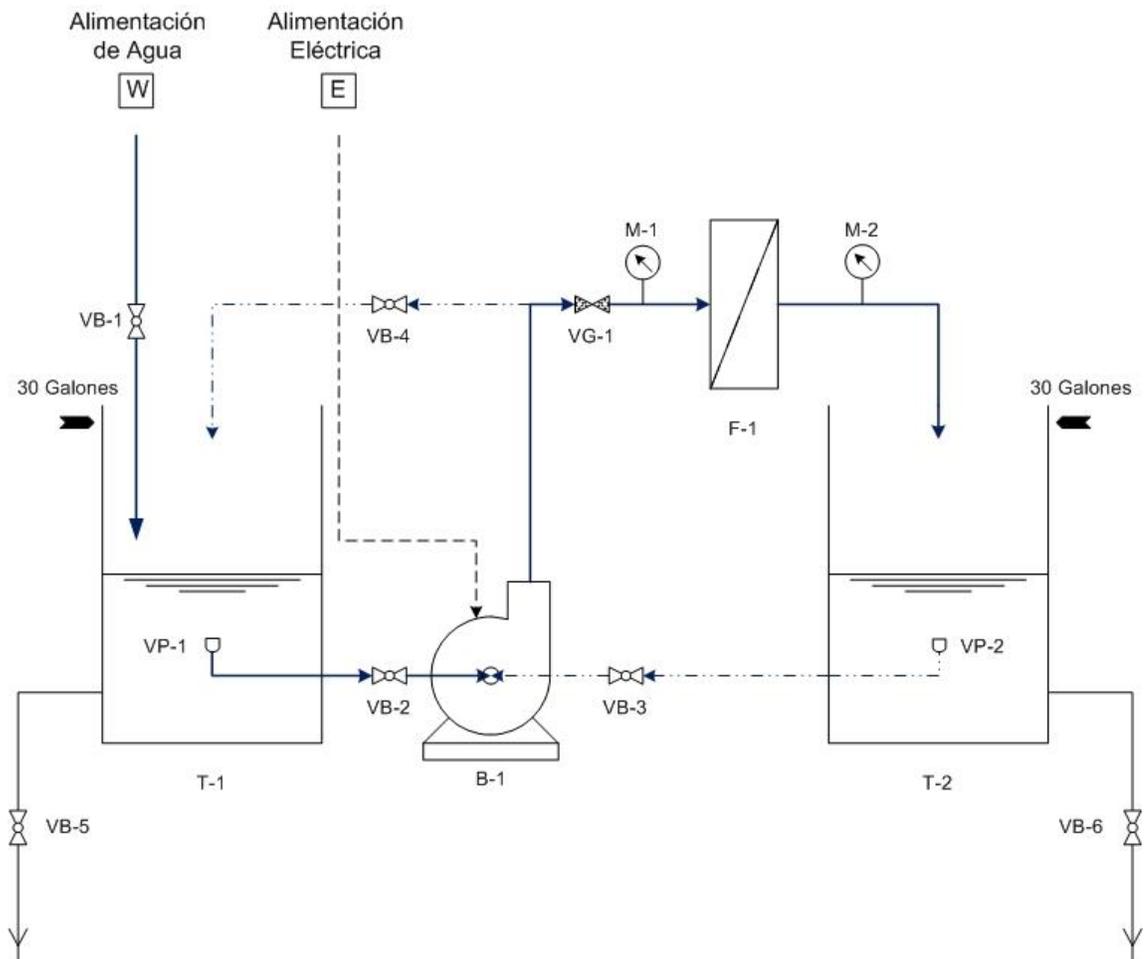
Para la determinación de la concentración de hierro en la entrada y salida del sistema, se implementó un procedimiento de análisis acorde a los recursos disponibles. Para dicho propósito se contó con dos posibles procedimientos, el primero por espectrofotometría análogo al método de la fenantrolina del *Standards Methods For Examination Of Waters And Wastewaters* 3500-Fe B²³ y un segundo procedimiento cuantitativo de Volumetría redox con dicromato de potasio²⁴. Finalmente se optó por el procedimiento por espectrofotometría análogo al método de la fenantrolina con un *Checker* HANNA HI721 debido a que brinda resultados rápidos a través de un tratamiento químico sencillo, sin generación de desechos que deban ser tratados antes de descartarse en el alcantarillado.

²³ H. FRANSON, Mary Ann. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. p. 3-75 – 3-79.

²⁴ Ayres, Gilbert, *Análisis Químico Cuantitativo*. p. 655 - 658

En la figura 13, se observa el diagrama de la estación experimental, en el se describe el tanque no.1, donde se realizó el tratamiento con el floculante y la soda caustica a la alimentación, el sistema de bombeo, el módulo de membrana y el tanque no.2 donde se recibió el permeado. Adicionalmente cuenta con un sistema de válvulas para la recirculación del permeado.

Figura 13. Diagrama de la estación experimental



Fuente: elaboración propia, con programa Autocad

Tabla X. **Simbología en diagrama de equipo**

Abreviatura	Equipo
T	Tanque de 30 Galones
VB	Válvula de bola ø ½ pulgada
VG	Válvula de globo ø ½ pulgada
VP	Válvula de pie ø ½ pulgada
M	Manómetro de Bourdon de 0 – 100 psi
B	Bomba centrífuga de ½ hp y 120 v.
F	Módulo de membrana de celulosa de 10 µm
W	Alimentación de agua
E	Alimentación eléctrica
	Tubería de agua ø ½ pulgada
	Tubería de agua de recirculación ø ½ pulgada
	Cableado eléctrico de calibre 10
	Drenaje ø ½ pulgada

Fuente: elaboración propia.

Con los datos experimentales se procedió a generar las curvas de operación y modelar matemáticamente el proceso, determinando el coeficiente de permeabilidad k del sistema, haciendo uso 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)

La validación de la práctica de laboratorio se realizó con los estudiantes que en el momento de ejecución de las pruebas estuvieren llevando el curso de Separación por Membranas Selectivas, divididos en grupos de trabajo. Al finalizar la experiencia se investigó por medio de una encuesta entre los estudiantes, si la práctica cumple con los objetivos del proyecto.

3.6.1. Limpieza y cambio de membrana

Para establecer el momento en que la membrana debe de limpiarse o reemplazarse, se determinó la presión transmembrana inicial, filtrando agua limpia al momento de instalar la estación experimental. Este procedimiento de filtrado de agua limpia se repetirá al inicio y final de cada práctica para determinar el cambio en la PTM y comprobar el estado de la membrana filtrante.

Según recomendaciones del fabricante cuando la PTM al filtrar agua limpia aumente en un valor de 68 947,59 Pascales (10 libras por pulgada cuadrada) de su valor inicial, la membrana debe someterse a limpieza. “Si el cambio en la PTM aun supera este límite luego de la limpieza debe reemplazarse la membrana.”²⁵

3.6.2. Limpieza y tratamiento de desechos

La sustancia problema, preparada a partir de sulfato ferroso heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) al finalizar el procedimiento, podría contener hierro en niveles nocivos para el medio ambiente. “Según la ficha de seguridad del sulfato ferroso heptahidratado, al finalizar el proceso de filtración la

²⁵ PENTEK, Pentair Water. *Información de Productos [en línea]. [ref. de 20 de Septiembre del 2012]. Disponible en web: <http://www.pentekfiltration.com/en-us/Products>*

concentración final de hierro debe ser menor a las 0,9 partes por millón, a fin de no presentar peligro para el medio ambiente y ser descartada en el sumidero.”²⁶

Si la concentración final del sistema no cumple con el límite establecido, se recirculará a través de la membrana hasta reducir la concentración a valores aceptables para la eliminación de los desechos.

Adicionalmente se presenta en el trabajo de investigación (Apéndice 7) un “procedimiento de limpieza y disposición de desechos”, basado en normas, toxicidades, propiedades físicas y químicas de los desechos, con el fin de instruir al estudiante sobre el correcto manejo de los desechos producidos durante la operación y el mantenimiento del equipo.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

El ensayo realizado, consistió en una serie de pruebas sobre muestras de soluciones problema con base, a las cuales midió las variables del proceso como:

- Retención
- Flujo (caudal)
- Porcentaje de recuperación

Estos parámetros se estudiaron mediante la medición en la entrada y la salida de la concentración de soluciones problema y la medición de caudal. Los

²⁶ MERCK, KGaA. Hojas de datos de seguridad [en línea]. [ref. de 14 de Septiembre del 2012]. Disponible en web: http://www.merck-chemicals.com/Merck-ES-Site/es_ES/-/EUR/ViewSearch-SearchFormMSDS

resultados obtenidos en las diferentes corridas experimentales se recolectaron con base a un modelo de tabla de datos empleando el siguiente esquema:

Tabla XI. **Modelo de tabla, recolección de datos experimentales**

Concentración de alimentación					
No. de Corrida	Abertura válvula de globo [%]	Concentración en permeado	Cambio de presión (PTM)	Caudal en tanque no. 1	Caudal en tanque no. 2
1					
2					
3					
4					
5					

Fuente: elaboración propia.

La información obtenida en las encuestas a contestar por los estudiantes, se tabuló siguiendo dos modelos de tabla, según las características de la pregunta.

Tabla XII. **Modelo de tabla, preguntas de nivel de instrucción didáctica**

Pregunta no. Xi				
Estudiante	Nivel de instrucción didáctica			
	Deficiente	Bajo	Medio	Alto
1				
2				
*				
*				
n				
Totales				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Modelo de tabla, preguntas de cumplimiento**

Pregunta no. Xi		
Estudiante	Si	No
1		
2		
*		
*		
n		
Totales		

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

Los datos obtenidos en las distintas corridas, se sometieron al análisis estadístico, valiéndose de los siguientes cálculos:

3.8.1. Promedio

En matemáticas y estadística, el promedio o media aritmética de un conjunto finito de números, es igual a la suma de todos sus valores dividida entre el número de sumandos. Permitirá en la práctica eliminar los errores aleatorios y de paralaje.

“También la media aritmética puede ser denominada como centro de gravedad de una distribución, el cual no está necesariamente en la mitad”²⁷.

Dados los n números $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, el promedio se define simplemente como:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n}$$

3.8.2. Desviación estándar

La desviación estándar, también llamada desviación típica, es una medida de dispersión usada en estadística, que dice cuánto tienden a alejarse los valores concretos del promedio en una distribución. De hecho, específicamente

²⁷ J.C., Miller. *Estadística para Química Analítica*. p. 10.

la desviación estándar es, el promedio de la distancia de cada punto respecto del promedio. Se suele representar por una **S** o con la letra sigma, σ .

“La desviación estándar de un conjunto de datos, es una medida de cuánto se desvían los datos de su media. Esta medida es más estable que el recorrido y toma en consideración el valor de cada dato”²⁸.

Expresión de la desviación estándar:

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

3.8.2.1. Interpretación y aplicación

La desviación estándar puede ser interpretada como una medida de incertidumbre. La desviación estándar de un grupo repetido de medidas, da la precisión de estas. Cuando se va a determinar si un grupo de medidas está de acuerdo con el modelo teórico, la desviación estándar de esas medidas es de vital importancia: si la media de las medidas está demasiado alejada de la predicción (con la distancia medida en desviaciones estándar), entonces se considera que las medidas contradicen la teoría.

Esto es coherente, ya que las mediciones caen fuera del rango de valores, en el cual sería razonable esperar que ocurrieran si el modelo teórico fuera correcto.

²⁸ J.C., Miller. *Estadística para Química Analítica*. p. 12.

3.8.3. Regresión y correlación

La regresión y la correlación, son dos técnicas estrechamente relacionadas y comprenden una forma de estimación. Estas técnicas permitirán en la práctica el análisis de las curvas de operación y la modelación matemática del proceso.

En forma más específica, el análisis de correlación y regresión comprende el análisis de los datos muestrales para saber qué es y cómo se relacionan entre sí dos o más variables en una población. “El análisis de correlación produce un número que resume el grado de la correlación entre dos variables; y el análisis de regresión da lugar a una ecuación matemática que describe dicha relación”²⁹.

3.8.4. Coeficiente de correlación de Pearson

En estadística, el coeficiente de correlación de Pearson es un índice que mide la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas. La correlación de Pearson es independiente de la escala de medida de las variables. El coeficiente de correlación de Pearson, es un índice de fácil ejecución e interpretación.

De manera menos formal, se puede definir el coeficiente de correlación de Pearson como “un índice que puede utilizarse para medir el grado de relación de dos variables siempre y cuando ambas sean cuantitativas”³⁰.

²⁹ J.C., Miller. *Estadística para Química Analítica*. p. 24.

³⁰ *Ibid.*

3.8.4.1. Interpretación del coeficiente de correlación de Pearson

Los coeficientes de correlación, son medidas que indican la situación relativa de los mismos sucesos respecto a las dos variables, es decir, son la expresión numérica que indica el grado de relación existente entre las 2 variables y en qué medida se relacionan. El valor del índice de correlación varía en el intervalo $[-1,1]$ y se interpreta con base a las siguientes normas:

- Si $r = 1$, existe una correlación positiva perfecta. Relación directa: cuando una de ellas aumenta, la otra también lo hace en proporción constante.
- Si $0 < r < 1$, existe una correlación positiva.
- Si $r = 0$, no existe relación lineal. Pero esto no necesariamente implica que las variables son independientes: pueden existir todavía relaciones no lineales entre las dos variables.
- Si $-1 < r < 0$, existe una correlación negativa.
- Si $r = -1$, existe una correlación negativa perfecta. Relación inversa: cuando una de ellas aumenta, la otra disminuye en proporción constante.

4. RESULTADOS

4.1. Reconocimiento del área de trabajo y construcción de la estación experimental

Para la instalación de la estación experimental, se realizaron las gestiones administrativas necesarias con el coordinador del Laboratorio de Operaciones Unitarias y el coordinador del Laboratorio de Fisicoquímica, para la habilitación del espacio físico para la estación experimental.

Luego de este proceso fue asignada un área de trabajo que cuenta con las características necesarias de espacio físico, servicios y una localización adecuada para el tránsito de los estudiantes durante su operación sin verse obstaculizado por los equipos previamente instalados en el laboratorio. A continuación se presenta el área de trabajo asignada.

Figura 14. Área de trabajo asignada



Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias T-5, USAC.

Cuenta con un espacio de 1,7 metros de largo por 1,14 metros de fondo. Además como lo muestra la siguiente serie de imágenes, el área asignada cuenta con las instalaciones de agua, electricidad y drenaje necesarias para el funcionamiento de la estación experimental.

Figura 15. **Conexión a la red de agua potable encontrada en el área de trabajo**



Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias T-5, USAC.

Figura 16. **Conexión a la red eléctrica encontrada en el área de trabajo**



Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias T-5, USAC.

Figura 17. **Conexión a la red de drenaje encontrada en el área de trabajo**



Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias T-5, USAC.

Posteriormente al haberse finalizado el reconocimiento del área asignada, se procedió a la construcción de la Estación Experimental. Para facilitar el transporte se construyeron las distintas secciones o módulos separados que forman la estación, siguiendo el diagrama mostrado en la figura 13. Estas secciones se montaron en el área de trabajo y conectaron para finalizar la construcción de la Estación Experimental.

A continuación se muestra una serie de imágenes que muestran el desarrollo de la construcción. Nótese el montaje modular que permite que durante el mantenimiento o el remplazo de un elemento de la estación, este sea separado del resto para que no sea necesario desmantelar todo el sistema. Este montaje también permitirá que en futuros trabajos donde se necesite el uso de elementos específicos distintos de los instalados, estas puedan adaptarse al sistema, brindando una amplia versatilidad en el uso de la estación experimental.

Figura 18. **Secciones de la estación experimental elaboradas de forma individual para su instalación**



Fuente: Laboratorio Biológico Industrial, zona 10.

Figura 19. **Estación experimental con sus distintos elementos ya conectados**



Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias T-5, USAC.

Figura 20. **Conexión a la red eléctrica**



Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias T-5, USAC.

Figura 21. **Conexión a la red de drenaje**



Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias T-5, USAC.

4.2. Estación experimental para el curso de separación por membranas selectivas

Los equipos de filtración a membranas, representan un sistema de separación que a diferencia de otras operaciones unitarias de fines similares no requiere un cambio de fase (producidas generalmente por enfriamiento o calentamiento), en base a este concepto, se efectuó la instalación de una estación experimental, cuya operación consiste en el transporte de la solución problema a través de una membrana selectiva. El equipo resultante se presenta a continuación:

Figura 22. Estación experimental para el curso de separación por membranas selectivas



Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias T-5, USAC.

Como se describió anteriormente, dicho equipo consiste en el transporte de la solución problema a través de una membrana selectiva, dicho transporte es posible gracias a la instalación de una bomba centrífuga de ½ caballo de fuerza.

Figura 23. **Bomba centrífuga de ½ hp**



Fuente: Laboratorio Biológico Industrial, zona 10.

La bomba utiliza corriente alterna de 120 voltios, por lo que requirió una acometida eléctrica, así como una caja de control para su operación durante la práctica.

Figura 24. **Caja de control de la bomba centrífuga**



Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias T-5, USAC.

La solución problema, es contenida en dos tanques, los cuales permiten el almacenamiento de las distintas etapas del tratamiento (alimentación y permeado), así como el análisis de los parámetros y la determinación del caudal a través de una escala numérica que representa el volumen de solución contenido en el tanque, esta escala se encuentra colocada en el interior de ambos tanques.

Figura 25. **Tanques no. 1 y 2**



Fuente: Laboratorio Biológico Industrial, zona 10.

Figura 26. **Escala interna de los tanques, para determinación de volumen (galones)**



Fuente: Laboratorio Biológico Industrial, zona 10.

El elemento más importante de la estación experimental, es el módulo de membrana, este es el que efectúa la separación a través de la membrana selectiva, colocada en el cartucho. Para este proyecto se seleccionó una membrana de microfiltración con un diámetro de poro de 10 micrómetros, fabricada de celulosa. Esta permite la separación de los flóculos formados en el tanque no. 1 del permeado que se transporta hacia el tanque no. 2.

Figura 27. **Módulo de membranas selectivas, membrana de microfiltración instalada**



Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias T-5, USAC.

Como parte de la operación y el mantenimiento de la estación experimental, es necesaria la determinación de la Presión Transmembrana (PTM), para esta tarea el equipo cuenta con un par de manómetros en la entrada y la salida del módulo de membrana respectivamente. Estos manómetros entregan resultados de presión de entrada y salida del módulo, permitiendo la determinación de la PTM en tiempo real durante la operación del equipo.

Figura 28. **Equipo de medición de PTM, manómetros**



Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias T-5, USAC.

Finalmente para la operación de la estación experimental, el equipo cuenta con un sistema de válvulas, las cuales se dividen en 3 tipos dependiendo de su uso y configuración:

- Válvula de bola: se utilizan en función de apertura/cierre para controlar la dirección del flujo en la estación experimental, para la alimentación y las purgas.
- Válvula de pie: se emplea como elemento de seguridad para la bomba centrífuga, evitando la entrada de partículas de gran tamaño a la misma y para evitar el retorno del flujo cuando la bomba se encuentra apagada.

- Válvula de globo: se emplea como regulador de flujo para controlar el caudal del sistema.

En la figura 29, se muestran los diferentes tipos de válvulas empleados en la estación experimental:

Figura 29. **Válvulas de estación experimental**



Válvula de
bola

Válvula de
pie

Válvula de
globo

Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias T-5, USAC.

4.3. Procedimiento de la práctica de laboratorio para la estación experimental

Contando con la estación experimental, se implementó una práctica de laboratorio que permita a través de su realización, cumplir con los objetivos del presente trabajo de investigación. El procedimiento se divide básicamente en tres secciones:

- Prueba de flujo de agua
- Procedimiento experimental
- Mantenimiento del equipo

La prueba de flujo de agua y el mantenimiento del equipo ayudan a comprobar el estado del equipo al inicio y final de la práctica respectivamente. Esto a través de la medición de la presión transmembrana y comparándola con la presión transmembrana inicial de filtro, ya que como se definió en secciones anteriores, el aumento en la presión transmembrana define el momento de limpieza o recambio del filtro utilizado en el equipo.

La sección de procedimiento experimental corresponde al proceso, a través del cual se logran los objetivos de la presente investigación y es en el cual los estudiantes experimentan con el funcionamiento y la operación de los equipos de separación por membranas selectivas. A continuación se detallan los pasos a realizar en cada una de estas secciones, en el apéndice de este informe se encuentra una copia del procedimiento entregado a los estudiantes como guía para la realización de la práctica.

4.3.1. Prueba de flujo de agua

Como primer paso para garantizar el correcto funcionamiento del módulo de membrana, se necesita determinar un blanco de medición y compararlo con el blanco inicial determinado al instalar la membrana en el módulo. Realizar el blanco de medición según el siguiente procedimiento:

- Abrir la válvula de bola no. 1 de la alimentación y llenar el tanque no. 1 con agua hasta la marca de 30 galones.

- Abrir la válvula de bola no. 2 y la válvula de globo no. 1. Con esto permitirá la entrada de agua al sistema, lo que cebará la bomba centrífuga.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *ON*. Esto permitirá el flujo de agua desde el tanque no. 1 al tanque no. 2.
- Permitir que el flujo se estabilice y anotar el cambio de presión (PTM). Anotar esta medida con el objeto de tener un blanco para medir en cada práctica el nivel de ensuciamiento de la membrana.
- Comparar la medición con el valor del blanco Inicial. Reportar la diferencia al instructor.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *OFF*.
- Cerrar la válvula de globo no. 1 y abrir la válvula de bola no. 4.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *ON*. Esto permitirá el flujo de agua desde el tanque no. 2 al tanque no. 1.
- Permitir que el flujo circule hacia el tanque no. 1 evitando que la bomba succione aire.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *off* y cerrar todas las válvulas.
- Abrir la válvula de bola no. 6 en el tanque no. 2 para la purga del mismo.

4.3.2. Procedimiento experimental

El procedimiento experimental, permitirá obtener los datos necesarios para cumplir con los objetivos del trabajo de investigación. Simultáneamente dicho procedimiento, permitirá a los estudiantes conocer el funcionamiento y la operación de la estación experimental, siguiendo los pasos descritos a continuación:

- Abrir la válvula de bola no. 1 de la alimentación y ajustar el nivel de agua en el tanque no. 1 a la marca de 30 galones.
- Agregar 0,6127 gramos de sulfato ferroso heptahidratado para obtener una concentración de 2 partes por millón en 30 galones de agua.
- Abrir la válvula de bola no. 2 y la válvula de bola no. 4. con esto permitirá la entrada de agua al sistema, lo que cebara la bomba centrífuga.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *ON*. Esto permitirá que la solución en el tanque no. 1 se mezcle homogéneamente.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *OFF*
- Tomar una alícuota de la solución en el tanque no. 1.
- Haciendo uso del medidor de hierro total *Checker* determinar el contenido de hierro en la alícuota. El resultado será la concentración inicial.

- Agregar la solución de soda caustica al 20 por ciento peso/volumen hasta que la solución en el tanque se ponga turbia, posteriormente agregar la solución de floculante al 20 por ciento peso/volumen hasta formar floculos en la solución contenida en el tanque no. 1.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *ON*. esto permitirá nuevamente que la solución en el tanque no. 1 se mezcle homogéneamente.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *OFF*. No permitir que los floculos formados precipiten antes de continuar el siguiente paso. En el caso de que precipitaran mezcle nuevamente la solución.
- Cerrar la válvula de bola no. 4 y abrir totalmente la válvula de globo no. 1. La apertura de la válvula de globo no. 1 controlara el caudal del sistema. Es importante tomar nota de esta apertura en cada medición.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *ON*. Esto permitirá que la solución pase del tanque no. 1 al tanque no. 2 a través del módulo de membranas.
- Anotar la presión registrada en los manómetros 1 y 2. La diferencia entre ambos representa la presión transmembrana (PTM).
- Con la ayuda del cronómetro y las marcas en los tanques, determinar el caudal volumétrico en el tanque no. 1 y el tanque no. 2.
- Tomar una alícuota del agua que entra en el tanque no. 2.

- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *OFF*.
- Haciendo uso del medidor de hierro total *Checker* determinar el contenido de hierro en la alícuota. El resultado será la concentración final relacionada con la apertura de la válvula de globo no. 1 y el caudal del sistema.
- Cerrar la válvula de globo no. 1 y abrir la válvula de bola no. 4.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *ON*. Esto permitirá que la solución en el tanque no. 1 se agite y evita que los floculos formados se precipiten por completo.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *OFF*.
- Cerrar la válvula de bola no. 4 y abrir nuevamente la válvula de bola no. 3. En esta ocasión la abertura en la válvula de globo no. 1 debe ser ligeramente menor a la de la medición anterior.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición *ON*.
- Repita los últimos 10 pasos, para continuar y obtener 5 mediciones con caudales (posiciones de la válvula de globo no. 1) diferentes.
- Al finalizar la práctica siga el procedimiento de limpieza y disposición de desechos.

Nota: si la solución en el tanque no. 1 se agota antes de completar las 5 mediciones, recircule la solución cerrando las válvulas de bola no. 2 y la válvula

de globo no. 1, y abriendo las válvulas de bola no. 3 y 4. Tomar una alícuota de la solución en el tanque no. 1 y determinar la nueva concentración inicial.

4.3.2.1. Cálculos y reporte

Con los datos obtenidos en el procedimiento experimental, se procederá a determinar diferentes parámetros de operación para posteriormente caracterizar el funcionamiento de la membrana selectiva.

Con los datos obtenidos a los diferentes caudales determinar:

- La retención
- El porcentaje de recuperación
- La presión transmembrana (PTM)

Posteriormente a efectuar los cálculos anteriores grafique:

- La retención versus el caudal volumétrico
- El porcentaje de recuperación versus el caudal volumétrico
- El caudal volumétrico versus la presión transmembrana (PTM). Utilice la pendiente de la gráfica para calcular el coeficiente de permeabilidad

Concluya acerca del efecto del caudal en la operación y las características de la membrana con base al comportamiento observado en las gráficas operacionales realizadas.

4.3.3. Mantenimiento del equipo

Al finalizar un ciclo de prácticas y haber completado el procedimiento de limpieza y disposición de desechos, es necesario determinar un nuevo blanco de medición, a fin de cuantificar el desgaste sufrido por la membrana durante el procedimiento experimental. Realizar el siguiente control del equipo:

- Abrir la válvula de bola no. 1 de la alimentación y llenar el tanque no. 1 con agua hasta la marca de 30 galones.
- Abrir la válvula de bola no. 2 y la válvula de globo no. 1. Con esto permitirá la entrada de agua al sistema, lo que cebará la bomba centrífuga.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *ON*. esto permitirá el flujo de agua desde el tanque no. 1 al tanque no. 2.
- Permitir que el flujo se estabilice y anotar el cambio de presión (PTM). Esta medida con el objeto de tener un blanco para medir con cada práctica el nivel de ensuciamiento de la membrana.
- Comparar la medición con el valor del blanco inicial. Reportar la diferencia al instructor.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *OFF*.
- Cerrar las válvulas de bola no. 2 y la válvula de globo no. 1, y abrir las válvulas de bola no. 3 y 4.

- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *ON*. Esto permitirá el flujo de agua desde el tanque no. 2 al tanque no. 1.
- Permitir que el flujo circule hasta que el agua llegue en el tanque no. 1 a la marca de 15 galones.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *OFF* y cerrar todas las válvulas.
- Abrir las válvulas de bola no. 5 y 6 para la purga de los tanques.

Nota: según recomendaciones del fabricante cuando la PTM al filtrar agua limpia aumente en un valor de 10 libras por pulgada cuadrada (68 947,59 Pa) de su valor inicial, la membrana debe someterse a limpieza. Si el cambio en la PTM aún supera este límite, luego de la limpieza debe remplazarse la membrana

4.4. Validación de la práctica de laboratorio

Con el propósito de comprobar, que la estación experimental y la práctica de laboratorio cumplen con los objetivos del trabajo de investigación, se procedió a realizar una práctica de validación y una encuesta entre los estudiantes del curso de separación por membranas selectivas.

4.4.1. Implementación de la práctica de laboratorio

Posteriormente a establecer el procedimiento a seguir durante la práctica de laboratorio, se procedió a dividir a los estudiantes del curso de separación por membranas selectivas en dos grupos de trabajo de 12 integrantes cada

uno. Cada uno de estos grupos participó en una práctica de laboratorio contando, con el ingeniero químico y catedrático del curso Renato Ponciano y del tesista Edgar Arana para dirigir la experiencia. Previamente a la fecha de la realización de la práctica, se hizo entrega a los estudiantes de una copia del procedimiento experimental descrito en el anexo del presente informe, de manera que estuvieran familiarizados con la rutina a realizar y se facilitara la instrucción.

Figura 30. **Estudiantes del curso de separación por membranas selectivas**

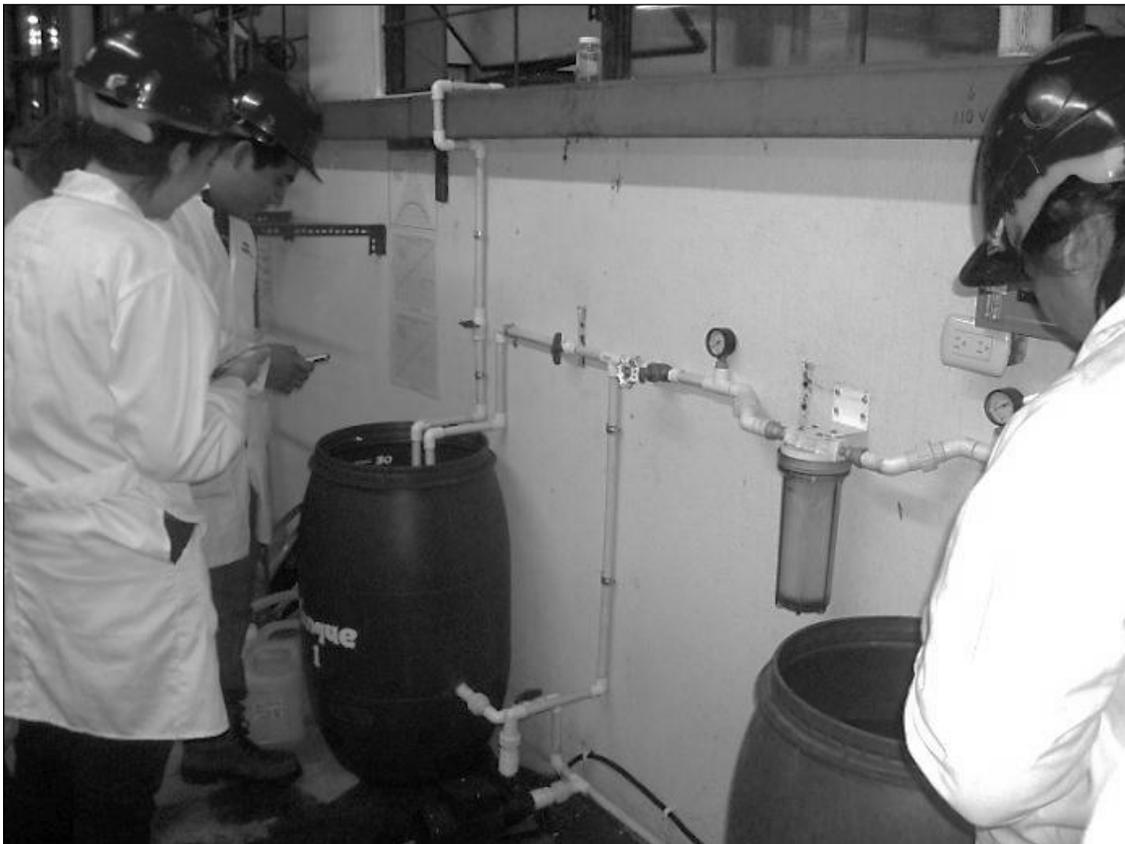


Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias T-5, USAC.

A continuación se presenta una serie de imágenes captadas durante una de las sesiones realizadas. En las mismas se muestra la participación directa de los estudiantes, donde se les permitió interactuar con cada uno de los elementos que conforman el equipo instalado.

Los estudiantes tuvieron la oportunidad de familiarizarse con el equipo, antes de dar inicio a la práctica de validación y de realizar las consultas pertinentes.

Figura 31. **Estudiantes familiarizándose con la estación experimental**



Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias T-5, USAC.

Figura 32. Estudiantes recibiendo instrucciones por parte del catedrático del curso



Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias T-5, USAC.

La instrucción directa, por parte del catedrático y del tesista encargado del trabajo de investigación fue fundamental, atendiendo a las consultas y opiniones de los estudiantes. Al mismo tiempo mostrando la operación de los instrumentos utilizados para la medición de los parámetros de interés y en lo posible, permitiendo que todos los estudiantes participaran en cada paso del procedimiento experimental.

Figura 33. **Estudiantes siendo instruidos en el uso de equipos de medición**



Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias T-5, USAC.

Figura 34. **Estudiantes realizando mediciones con el instrumento proporcionado**



Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias T-5, USAC.

4.4.2. Encuesta de validación

Finalizada la práctica, se procedió a solicitar a los estudiantes su colaboración, a través de una encuesta que buscó cuantificar el enriquecimiento adquirido en el conocimiento del cursos de Separación por Membranas Selectivas. Esta encuesta, detallada en el anexo de este informe, fórmula 11 interrogantes, de las cuales los resultados se presentan a continuación.

Figura 35. Encuesta de validación realizada al final de la práctica



Fuente: laboratorio de operaciones unitarias T-5, USAC.

Tabla XIV. **Resumen de resultados de encuesta de validación, preguntas de nivel de instrucción didáctica**

Pregunta no.	Nivel de instrucción didáctica			
	Deficiente	Básico	Medio	Alto
1	3	8	10	3
5	0	8	11	5
6	0	6	12	6
7	1	7	10	6
8	3	9	11	1
9	4	6	10	4
11	0	7	9	8

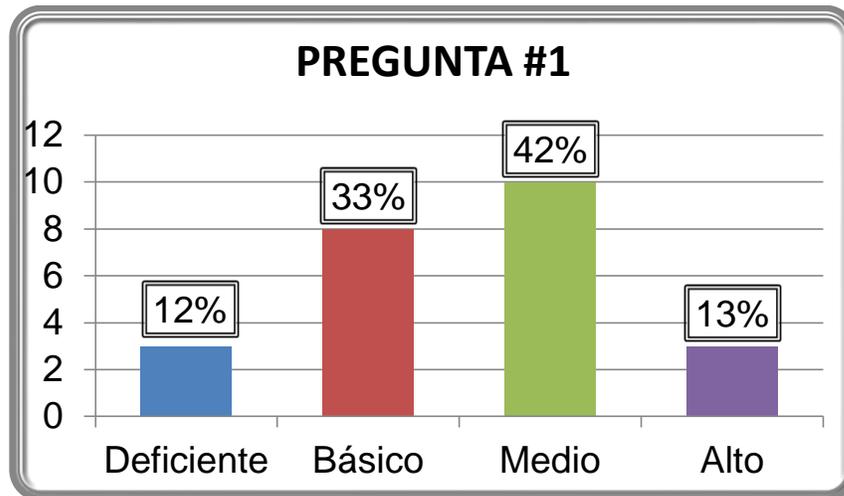
Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Resumen de resultados de encuesta de validación, preguntas de cumplimiento**

Pregunta no.	OPCIÓN	
	Si	No
2	22	2
3	24	0
4	23	1
10	24	0

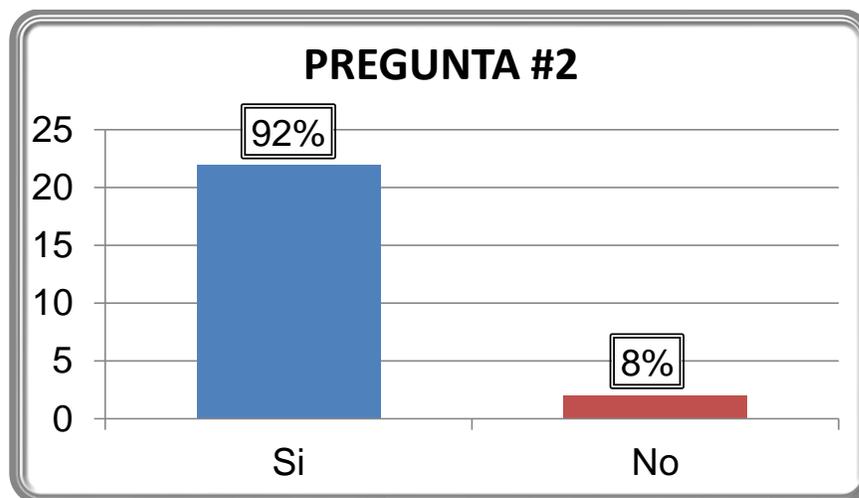
Fuente: elaboración propia.

Figura 36. **Califique su conocimiento previo sobre la operación de equipos de separación por membranas selectivas**



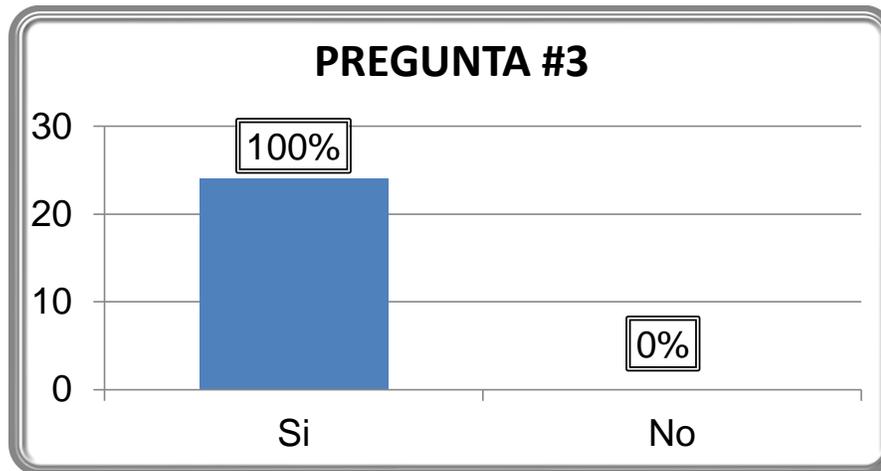
Fuente: elaboración propia.

Figura 37. **El equipo usado en la práctica representa efectivamente un sistema de separación por membranas selectivas?**



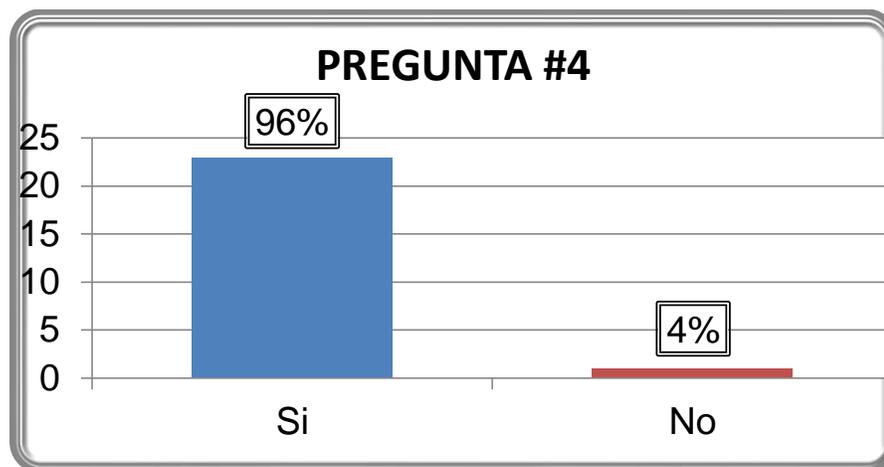
Fuente: elaboración propia.

Figura 38. **La práctica complementa la instrucción recibida en el curso de Separación por Membranas Selectivas?**



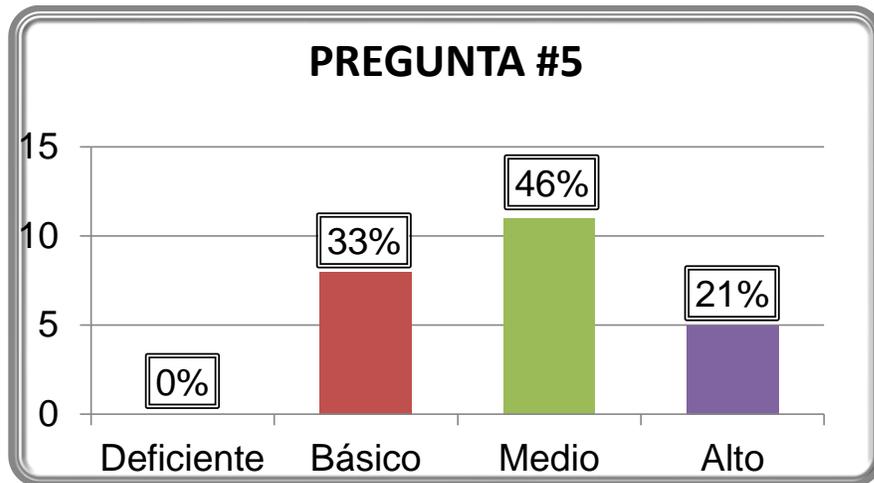
Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Cree necesaria la implementación de la práctica de laboratorio para el curso de Separación por Membranas Selectivas?**



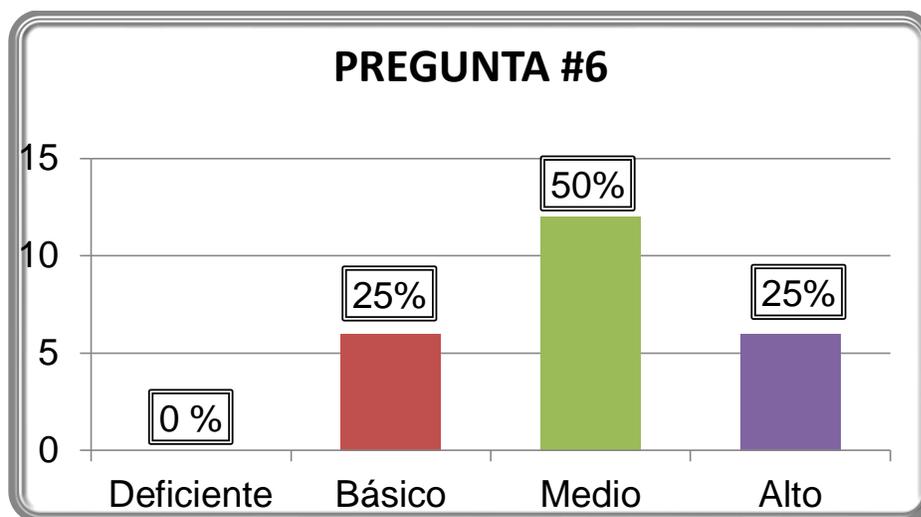
Fuente: elaboración propia.

Figura 40. **Califique su conocimiento adquirido respecto al parámetro de retención en membranas**



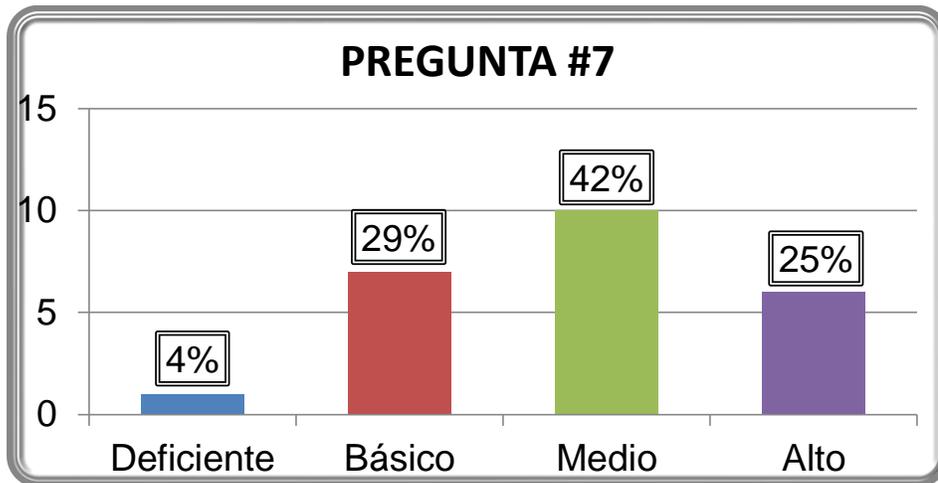
Fuente: elaboración propia.

Figura 41. **Califique su conocimiento adquirido respecto al parámetro de saturación en membranas**



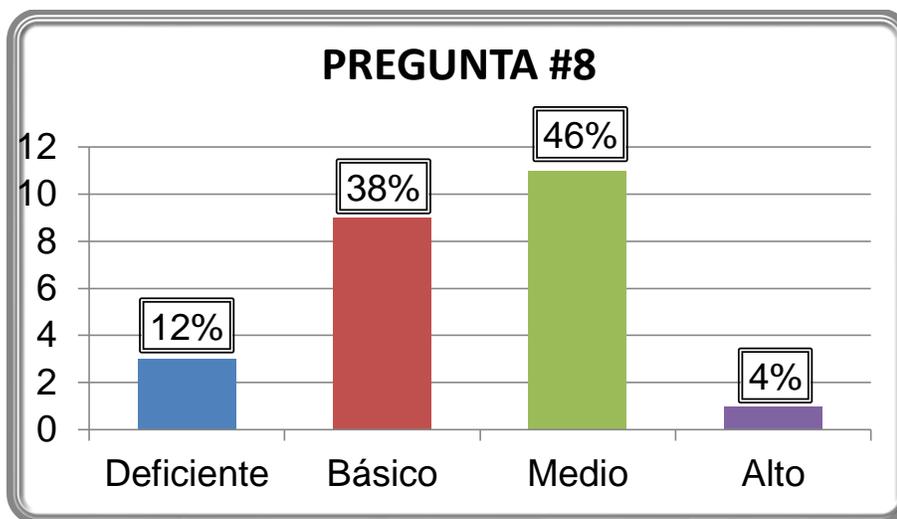
Fuente: elaboración propia.

Figura 42. **Califique su conocimiento adquirido respecto al parámetro del porcentaje de recuperación en membranas**



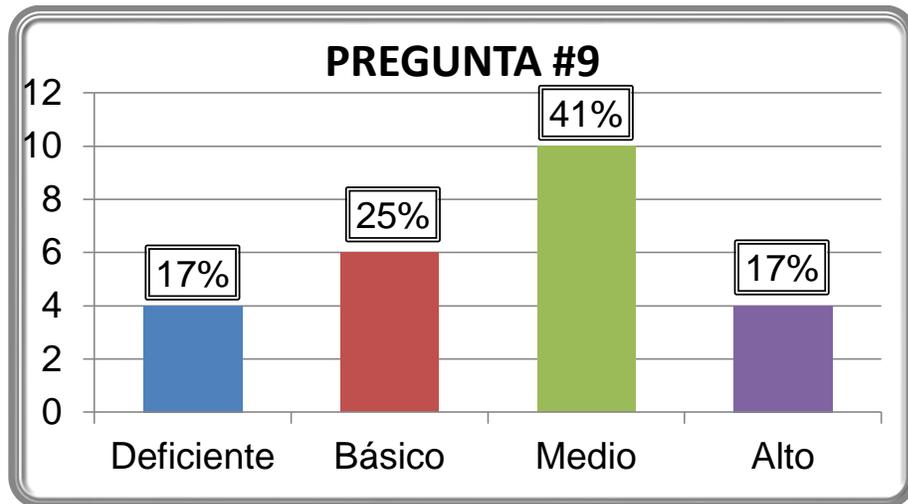
Fuente: elaboración propia.

Figura 43. **Califique su conocimiento adquirido respecto a la aplicación de modelos matemáticos en procesos a membranas**



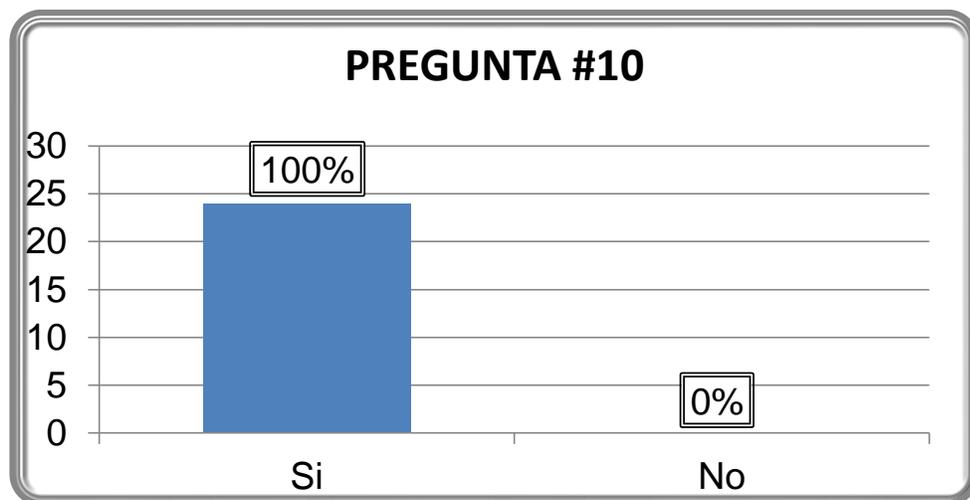
Fuente: elaboración propia.

Figura 44. **Califique su conocimiento adquirido respecto la elaboración de curvas de operación en procesos a membranas**



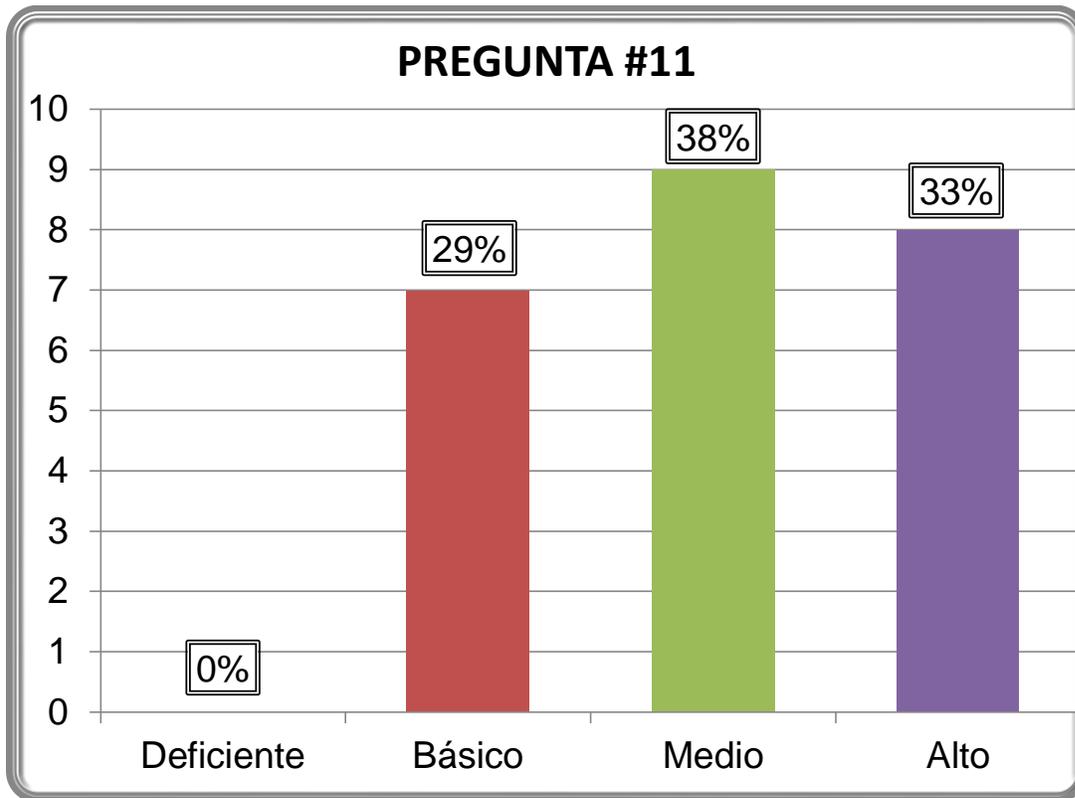
Fuente: elaboración propia.

Figura 45. **El equipo cuenta con los instrumentos adecuados para cumplir con los objetivos del práctica?**



Fuente: elaboración propia.

Figura 46. **Califique su conocimiento adquirido sobre la operación de equipos de separación por membranas selectivas**



Fuente: elaboración propia.

4.5. **Resultados obtenidos en la práctica de validación**

Con los resultados obtenidos en las mediciones realizadas durante las sesiones de validación de la práctica de laboratorio, los estudiantes realizaron los cálculos necesarios y presentaron un informe de los mismos. A continuación se detallan los resultados presentados por los estudiantes, los cuales muestran el uso del equipo instalado para el dimensionamiento y caracterización de las membranas selectivas.

Tabla XVI. **Resumen de resultados, mediciones realizadas en la práctica de validación**

Concentración de alimentación [ppm]		2.00			
No. de corrida	Abertura válvula de globo [%]	Concentración en permeado [ppm]	Cambio de presión (PTM) [Pa]	Caudal en tanque no.1 [m3/s]	Caudal en tanque no.2 [m3/s]
1	100	1,15	85 495,02	3,41E-04	1,97E-04
2	80	1,1	81 358,17	2,46E-04	1,86E-04
3	60	1,25	84 116,07	2,04E-04	1,97E-04
4	40	0,85	77 910,79	1,36E-04	1,05E-04
5	20	0,35	74 463,41	6,82E-05	4,12E-05

Fuente: elaboración propia.

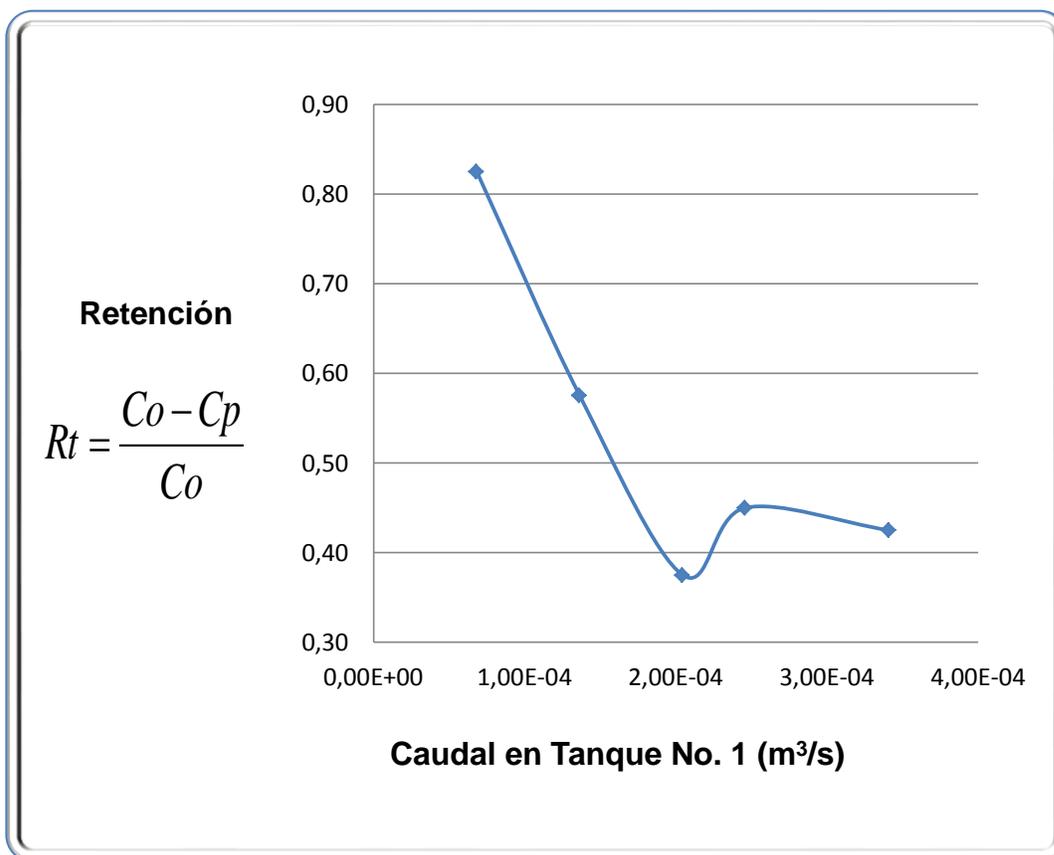
Tabla XVII. **Resumen de resultados, cálculos realizados en la práctica de validación**

No. de corrida	Abertura válvula de globo [%]	Retención	Porcentaje de recuperación [%]	Flujo en el permeado [m/s]
1	100	0,425	57,92	0,39
2	80	0,450	75,64	0,37
3	60	0,375	96,44	0,39
4	40	0,575	77,17	0,21
5	20	0,825	60,41	0,08

Fuente: elaboración propia.

En base a los resultados anteriores, se procedió a elaborar las curvas de operación de la membrana selectiva. La figura 47, muestra el comportamiento de la retención en la membrana a diferentes caudales en la alimentación de la estación experimental (tanque no. 1).

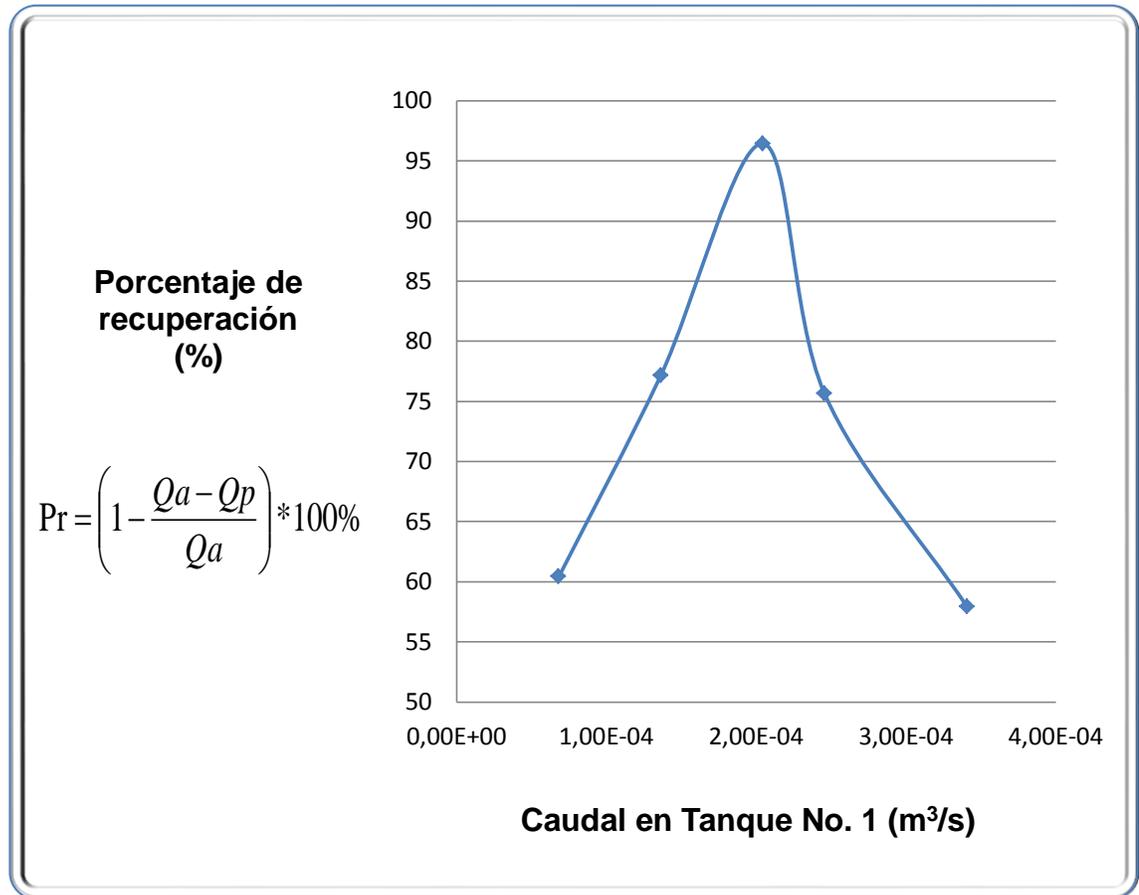
Figura 47. **Caudal en tanque no. 1 versus retención**



Fuente: elaboración propia.

La figura 48, muestra el efecto de diferentes caudales en la alimentación de la estación experimental (tanque no. 1), sobre el porcentaje de recuperación de la membrana selectiva.

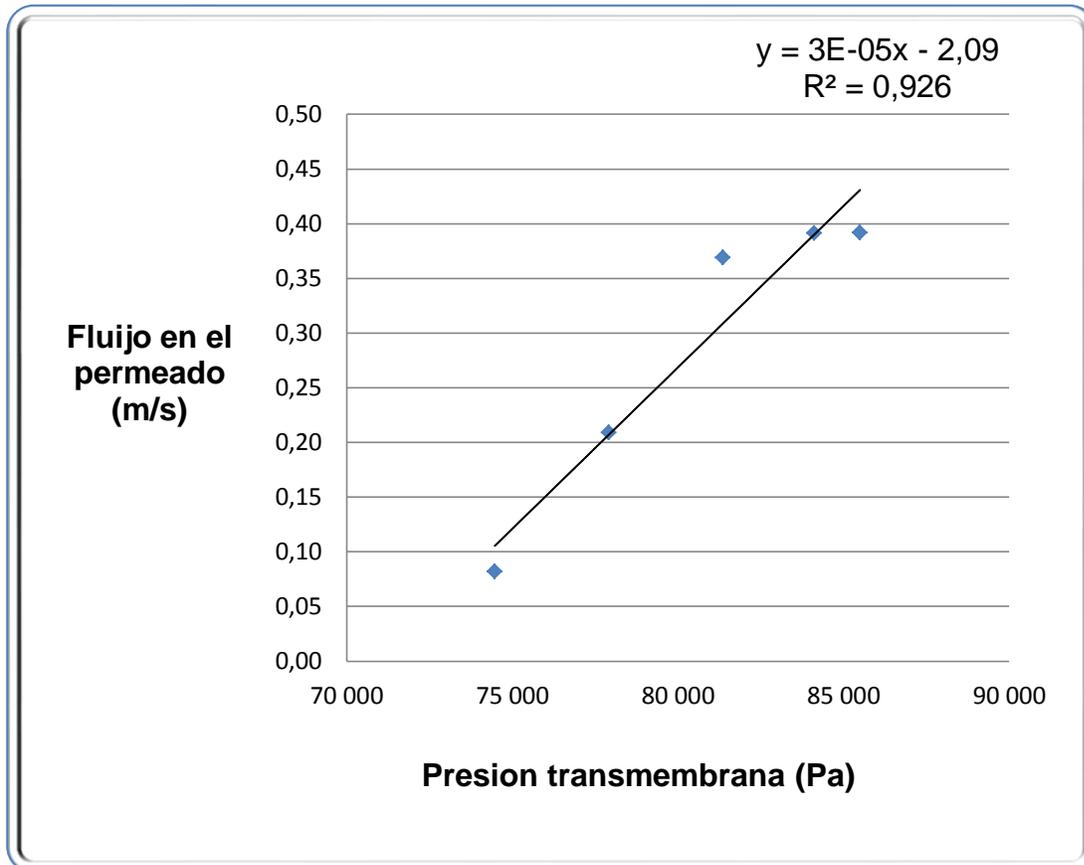
Figura 48. Caudal en tanque no. 1 versus porcentaje de recuperación



Fuente: elaboración propia.

Finalmente se procedió a comparar el comportamiento del sistema contra la Ley de Darcy. Para lo cual se realizó la gráfica que relaciona el flujo en el permeado (tanque no. 2) contra la fuerza impulsora de los sistemas de microfiltración, la presión transmembrana. Además se procedió a efectuar una regresión lineal de la gráfica obtenida, de modo que pueda evaluarse el comportamiento del sistema y determinar el coeficiente de permeabilidad.

Figura 49. **Flujo del permeado versus presión transmembrana**



Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Para la instalación de una estación experimental, es importante considerar diversos factores que definirán el curso del proyecto, así como la operación del equipo ya instalado. Considerando lo anterior, se realizaron las gestiones administrativas necesarias con el coordinador del Laboratorio de Operaciones Unitarias y el coordinador del Laboratorio de Físicoquímica para habilitar el espacio físico para la estación experimental, para el proyecto fue asignada un área de 1,7x1,14 metros (1,93 m²).

El área asignada además de contar con el espacio y ubicación convenientes, se observó contaba con los servicios de agua, electricidad y drenaje, indispensables para operación del equipo. De estos servicios el drenaje, es el más conveniente, ya que no requirió instalación de tubería adicional. En el caso de la electricidad, este servicio constituyó un factor determinante en la selección de la bomba a fin de evitar instalaciones complejas y costosas, el uso de una bomba de 120 voltios, permitió que la única instalación necesaria fuera la caja de control de encendido además del cableado.

Finalmente en el servicio de agua, la tubería instalada correspondió al diámetro de la empleada en el equipo (1/2 pulgada) y no requirió mayores modificaciones. La única característica que requirió atención especial, fue la altura de la misma ya que se encontraba colocada a 3,31 metros de altura, por lo que se necesitó la instalación de tubería para situarla a una altura apropiada. De todo lo anterior, pudo observarse la importancia de las consideraciones preliminares a la instalación de un equipo, ya que de las características de este

espacio depende gran parte de la inversión, tanto económica como del tiempo utilizado en la construcción.

Durante la construcción se optó por un montaje modular, el cual divide el equipo en secciones a través de uniones universales. La selección del montaje modular cumplió con dos objetivos, el primero es facilitar la construcción, ya que cada una de las secciones fue prearmada y transportada al sitio de su instalación. El segundo objetivo fue otorgarle al equipo ventajas en su mantenimiento, ya que al dañarse una sección esta puede separarse y repararse sin necesidad de desmontar toda la estación experimental. Otro beneficio obtenido del montaje modular, aunque no es parte de los objetivos del presente informe, es que en futuros trabajos donde se necesite el uso de elementos específicos distintos de los instalados, estas puedan adaptarse al sistema, brindando una amplia versatilidad en el uso de la estación experimental.

La parte más importante observada en el equipo instalado, es el módulo de membrana. En la figura 27, se observó la membrana de microfiltración con un diámetro de poro de 10 micrómetros, fabricada de celulosa. La microfiltración maneja rangos de diámetro de partícula mayores al del hierro de la sustancia problema, por lo cual fue necesario el tratamiento para formar floculos de mayor tamaño que fueron atrapados por la membrana selectiva. Este procedimiento parece ignorar una de las ventajas de los procesos a membrana, ya que el uso de aditivos químicos, es generalmente evitado. Sin embargo, este es un procedimiento común en la industria donde el costo de los aditivos compite con el costo de los materiales, para los iones de hierro una membrana de ultrafiltración sería la idónea, pero el costo de una bomba de mayor capacidad y de tuberías de altas presiones incrementaría significativamente el costo de la estación experimental.

Al finalizar la construcción de la estación experimental, se procedió a establecer un procedimiento experimental que cumpla los objetivos del presente trabajo, principalmente instruyendo a los estudiantes y completando su conocimiento sobre membranas selectivas. Este procedimiento se dividió en 3 etapas, la primera haciendo el uso de los manómetros instalados en el equipo y haciendo pasar agua a la que no se ha agregado ninguna sustancia por el equipo, se determinó la Presión Transmembrana (PTM). Esta presión además de ser la fuerza impulsora de este caso de filtración, muestra el grado de saturación de la membrana ya que tiende a aumentar conforme la membrana se satura. Por ser la primera medición de este parámetro representó la presión transmembrana inicial de la membrana instalada, obteniéndose un valor de PTM inicial de 12 libras por pulgada cuadrada (82 737,11 Pa).

Posteriormente en el procedimiento se corrieron las pruebas experimentales, en este a través de 5 corridas a caudales diferentes, los estudiantes obtuvieron los datos necesarios para la realización de los cálculos y cumplir con los objetivos que se les fueron asignados en la práctica. Esta como todas las etapas del procedimientos, buscó no solo el cumplimiento de los objetivos sino que a la vez buscó el ahorro de agua, evitando alimentar nuevamente el equipo recirculando el agua del tanque no.1 al tanque no. 2 cuando fuere necesario y evitando desperdicios.

Finalmente en el procedimiento se incluyó una etapa de mantenimiento, donde se volvió a circular agua sin sustancias aditivas por el equipo de modo que las tuberías se purgaran de los aditivos empleados en la práctica, y al mismo tiempo midiendo al PTM y comparándola contra la obtenida, inicialmente se cuantificó el grado de saturación que ha alcanzado la membrana.

Durante la implementación de la práctica en la que participó un panel de 24 estudiantes dividido en 2 grupos, se observó un conocimiento teórico idóneo sobre los fenómenos a membrana y los equipos de filtración en los participantes. Esto facilitó la interacción de los estudiantes con los instructores en las explicaciones y la solución de dudas. Esto mostró no solo la capacidad de la estación experimental para reforzar el estudio teórico de las membranas selectivas, sino además la efectividad de este para la comprensión del fenómeno. Otro punto importante que se observó durante la implementación de la práctica, es la efectividad de los datos aportados por el medidor de hierro total *Checker*, este instrumento como parte de la estación experimental facilitó la comprensión del problema y la descripción del fenómeno.

Posteriormente al procedimiento experimental de la práctica, se realizó la encuesta de validación. Los resultados de la encuesta descritos de la figura 36 a la figura 46, mostraron no solo la efectividad de la estación experimental para enriquecer los conocimientos del fenómeno de membranas selectivas, sino que a la vez comprobaron el conocimiento adquirido por los estudiantes en el curso teórico. En su mayoría los resultados observados mostraron una tendencia positiva, donde los estudiantes calificaron sus conocimientos como satisfactorios, además de que la encuesta concluye que la práctica de laboratorio cumplió con los objetivos establecidos.

La efectividad de la práctica en la instrucción de las membranas selectivas, se observó de manera más significativa al comparar los resultados de la pregunta no. 1 y los de la pregunta no. 11. En la pregunta no. 1, la tendencia se observó en su mayoría a un conocimiento en el nivel medio-bajo, en cambio en la pregunta no. 11 la tendencia se observó de un conocimiento medio-alto, lo cual mostró como la practica implementada reforzó el contenido del curso de Separación por Membranas Selectivas.

Finalizada la implementación de la práctica, los estudiantes procedieron a elaborar un informe de los resultados obtenidos. Los resultados obtenidos se observan de la figura 46 a la figura 49, estas mostraron de forma gráfica las tendencias que se observaron en la separación por membranas selectivas. En la figura 47, se observó que la retención desciende conforme se aumenta el caudal de la alimentación (tanque no. 1). Esto se debe probablemente a que un mayor caudal empuja con mayor fuerza los floculos a través de la membrana, forzando a que una mayor concentración de hierro pase al permeado.

La figura 48, permitió observar que la tendencia en el porcentaje de recuperación siguió un comportamiento cuadrático, mostrando su punto máximo en un caudal medio. Este comportamiento radica en que al inicio, el aumento en el caudal empuja en una manera efectiva la solución a través de la membrana, sin embargo, al aumentarse más la fuerza con la que los floculos son empujados hacia las paredes de la membrana, estos obstruyen la pared de la misma produciendo una pérdida mayor en el empuje y la reducción observada en el porcentaje de recuperación. Comparando este resultado con el de la figura 47, se hizo patente la necesidad de seleccionar un caudal en el tanque no. 1 en el cual se obtenga la mayor retención y porcentaje de recuperación posible.

Finalmente en la figura 49, se observó el comportamiento de la estación experimental respecto a la Ley de Darcy. El resultado muestra la relación entre la fuerza impulsora, la Presión Transmembrana (PTM) y el flujo en el permeado. Como era esperado con base a la ecuación de la Ley de Darcy, el aumento en la fuerza impulsora ocasiona un incremento proporcional en el flujo del permeado siguiendo una correlación positiva.

Con la ayuda del gráfico en la figura 49, se obtuvo una aproximación del valor del coeficiente de permeabilidad de la membrana ($3 \times 10^{-5} m/s * Pa$), así

como una ecuación matemática útil para el análisis y la interpolación de datos. Estos resultados experimentales obtenidos durante la rutina trabajada conjuntamente con los estudiantes, muestran que la estación experimental instalada y de la práctica de laboratorio implementada, son adecuadas para el estudio y la descripción de los fenómenos de separación por membranas selectivas.

CONCLUSIONES

1. Según la encuesta de validación más del 80 por ciento de los estudiantes considera que la práctica de laboratorio implementada y la estación experimental instalada cumplen sus objetivos didácticos.
2. La presión transmembrana inicial es de 12 pulgadas por pie cuadrado (82 737,11 Pa), la comparación con la presión transmembrana al final de cada práctica permite cuantificar la saturación de la membrana.
3. Al incrementarse el caudal en el tanque no. 1, el porcentaje de recuperación siguió un comportamiento cuadrático mostrando su punto máximo de 96,44 por ciento en un caudal de $2,04 \times 10^{-4}$ metros cúbicos por segundo.
4. Aplicando regresión matemática entre el flujo del permeado y la presión transmembrana, se obtuvo una aproximación del valor del coeficiente de permeabilidad de la membrana ($3 \times 10^{-5} \text{ m/s} * \text{Pa}$), así como un modelo matemático útil para el análisis y la interpolación de datos.

RECOMENDACIONES

1. Implementar en el curso de Separación por Membranas Selectivas prácticas adicionales a la propuesta, usando esta estación experimental, para aumentar el conocimiento práctico de los estudiantes del curso.
2. Promover el uso de la estación experimental, no sólo para fines didácticos sino también para proyectos de investigación.
3. Aprovechar el montaje modular, que permite reemplazar las partes que conforman la estación experimental por las adecuadas según las características de nuevos proyectos.
4. Al implementar futuros proyectos, debe considerarse la accesibilidad de los servicios que este requerirá en comparación con los disponibles, así como la reactividad de nuevos reactivos con los materiales que conforman el equipo.
5. El módulo de la membrana puede reemplazarse como futura línea de investigación para estudiar diferentes membranas o inclusive ensayar métodos de elaboración de membranas selectivas y evaluar su funcionamiento en comparación a membranas comerciales.
6. Implementar como práctica para el curso de separación por membranas selectivas, evaluar la selectividad de membranas respecto a dos componentes distintos presentes en la misma solución.

BIBLIOGRAFÍA

1. AYRES, Gilbert. *Análisis químico cuantitativo*. 2a ed. Madrid: HARLA, 1970. 854 p.
2. CHÁVEZ, Julio; GALVÁN, Manuel. *Balance de materiales y energía*. Guatemala: Editorial Universitaria, USAC 1998. 256 p.
3. FRANSON, Mary Ann. Fenantroline Method. En: FRANSON, Mary Ann. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 20th ed. USA: American Public Health Associations, 1998. p. 3-75 – 3-79.
4. HANNA INSTRUMENTS. *Manual de Producto* [en línea]. Estados Unidos: Woonsocket, 2012, <https://hannachecker.com/manuals/manual_721_02_04_10.pdf> [Consulta: 20 de septiembre del 2012].
5. HERNÁNDEZ GIRÓN, Lizandro Danilo. *Implementación de una práctica experimental de refrigeración por compresión en el laboratorio de ingeniería química en un intercambiador de calor para agua por medio gas R134A*. Trabajo de graduación de Ing. Químico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2010. 165 p.
6. KENNETH, George. *Las ciencias naturales en la educación básica: Fundamentos y métodos*. 3a ed. Bogotá: Santillana, 2002. 75 p.

7. LENNTECH, B.V. *Tecnología de membranas en sistemas de filtración* [en línea]. Rotterdamseweg, Holanda: <<http://www.lenntech.es>> [Consulta: 06 de junio del 2011].
8. LIBEDISNKI, Martha. La innovación en la enseñanza [en línea]. México: <<http://www.universidadlasallebenavente.edu.mx/investigacion/revisita/mayo06/P%20diversas/laexperimentacion.htm>> [Consulta: 05 de junio del 2011].
9. MACANÁS DE BENITO, Jorge. *Desarrollo de nuevas membranas compuestas para la separación de iones metálicos y aplicaciones electroquímicas*. Trabajo de graduación de Ing. Químico. Universidad Autónoma de Barcelona, España: 2006. 104 p.
10. MERCK. *Hojas de datos de seguridad* [en línea]. Darmstadt, Alemania: <http://www.merck-chemicals.com/Merck-ES-Site/es_ES/EUR/ViewSearch-SearchFormMSDS> [Consulta: 14 de septiembre del 2012].
11. MILLER, José Carlos. *Estadística para química analítica*. 2a ed. Londres Inglaterra: Addison-Wesley, 1998. 135 p.
12. MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos aplicada*. 4a ed. México: Prentice Hall, 1996. 528 p.
13. MULDER, Marcel. *Basic principles of membrane technology*. 2nd ed. The Netherlands: University of Twente, Enschede, Center for Membrane Science and Technology. 2008. 75 p.

14. PENTEK, Pentair Water. *Información de productos* [en línea]. Estados Unidos: Pentek, 2012, <<http://www.pentekfiltration.com/en-us/Products>> [Consulta: 20 de septiembre del 2012].

15. SÁNCHEZ FONT, Francesc. *Estudio y diseño de una planta de producción de membranas cerámicas de coste reducido*. Trabajo de graduación de Ing. Industrial. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona, España: 2007. 115 p.

ANEXOS

1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL MÓDULO DE MEMBRANA

El módulo de membrana, instalado en la estación experimental descrita en el presente informe, se divide en la carcasa y la membrana selectiva.

1.1. Especificaciones de carcasa de módulo de membrana (*slim line filter housing*)

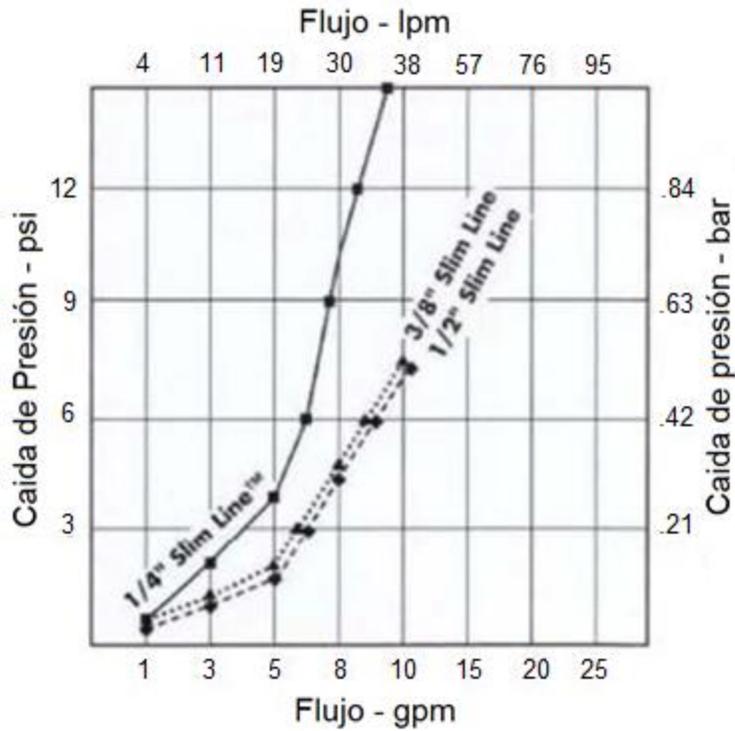
Brinda soporte y protección a la membrana, aislándola de los elementos externos. La carcasa, cumple además la función de dirigir el flujo de agua a través de la membrana.

1.1.1. Características

La carcasa cuenta con características físicas y estructurales que determinan su manejo y operación. A continuación se describen las características principales:

- Material del cilindro: estireno acrilonitrilo.
- Material de capucha: polipropileno reforzado.
- Temperatura máxima de operación: 50 °C.
- Presión máxima de operación: 8,6 bares.

Figura 50. Especificaciones de carcasa de módulo de membrana



Fuente: PENTEK, Pentair Water. *Información de Productos*
<http://www.pentekfiltration.com/en-us/Products>

Tabla XVIII. Especificaciones de carcasa y datos de desempeño

Modelo	Dimensiones máximas	Cambio inicial de presión (bar) / Velocidad de flujo (lpm)
5 Claro	187 mm x 118 mm	0,14 bar / 11 lpm
10 Claro	308 mm x 118 mm	0,14 bar / 19 lpm
5 Opaco	178 mm x 111 mm	0,14 bar / 11 lpm
10 Opaco	299 mm x 111 mm	0,14 bar / 19 lpm
20 Opaco	556 mm x 111 mm	0,14 bar / 19 lpm

Fuente: PENTEK, Pentair Water. *Información de Productos*
<http://www.pentekfiltration.com/en-us/Products>

1.2. Especificaciones de membrana selectiva (*CP series pleated cellulose polyester cartridges*)

La membrana selectiva, es el elemento principal del módulo de membrana. Es la barrera selectiva que hace posible el fenómeno de separación.

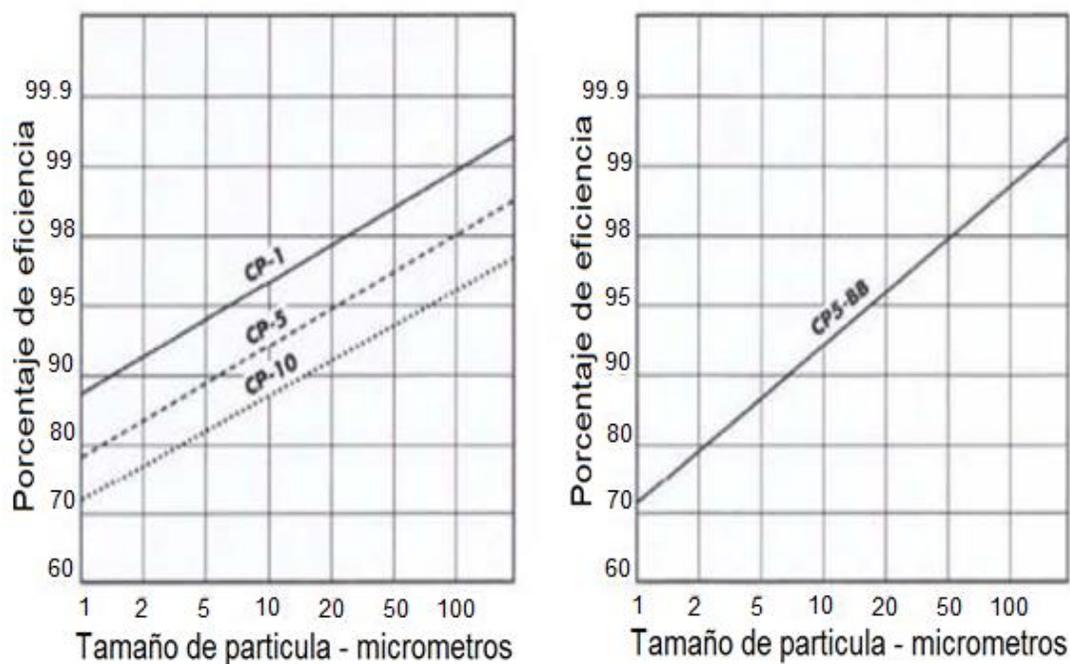
1.2.1. Características

El módulo cuenta con características físicas y estructurales que determinan su manejo y operación. A continuación se describen las características principales:

- Material del medio: celulosa polyester.
- Material del núcleo: polipropileno.
- Temperatura máxima de operación: 52 °C.
- Diámetro de poro: 10 micrones.
- Altura del cilindro: 10 pulgadas.
- Modelo: CP-10.

La ventaja principal del modelo seleccionado, es el material de celulosa, que permite la limpieza de la membrana. Esta propiedad permite extender el tiempo de la membrana considerablemente.

Figura 51. Especificaciones de membrana selectiva



Fuente: PENTEK, Pentair Water. *Información de Productos*

<http://www.pentekfiltration.com/en-us/Products>

Tabla XIX. Especificaciones del cartucho y datos de desempeño

Modelo	Dimensiones máximas	Cambio inicial de presión (bar) / Velocidad de flujo (lpm)
CP-1	67 mm x 249 mm	<0,1 bar / 38 lpm
CP-5	67 mm x 249 mm	<0,1 bar / 38 lpm
CP-10	67 mm x 249 mm	<0,1 bar / 38 lpm
CP5-20	67 mm x 508 mm	<0,1 bar / 38 lpm
CP5-BB	144 mm x 249 mm	<0,1 bar / 76 lpm
CP5-20BB	144 mm x 508 mm	<0,1 bar / 76 lpm

Fuente: PENTEK, Pentair Water. *Información de Productos*

<http://www.pentekfiltration.com/en-us/Products>

2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y MANUAL DEL *CHECKER* HANNA HI725

El *Checker* Hanna HI725, es un instrumento de medición que permitió durante el trabajo de investigación, agilizar los resultados y evitar la necesidad de análisis extensos para caracterizar la membrana selectiva.

2.1. Especificaciones Técnicas del *Checker* Hanna HI725

El *Checker* HANNA HI725, es un instrumento de medición específico para la determinación de hierro total en muestras de agua. .

2.1.1. Características

El *Checker* Hanna HI725 cuenta con características físicas y estructurales que determinan su manejo y operación. A continuación se describen las características principales:

- Dimensiones: 81,5 x 61 x 37,5 mm.
- Peso: 64 g.
- Batería: 1,5 V.
- Apagado automático: después de 3 minutos de inactividad y 10 segundos después de mostrar lectura.

- Método de análisis: adaptación de método de la Fenantrolina del *Standars Methods For Examination Of Wathers And Wastewaters 3500-Fe B*.

Figura 52. **Checker Hanna HI725**



Fuente: HANNA INSTRUMENTS. *Manual de Producto Checker Hanna HI725*
https://hannachecker.com/manuals/manual721_02_04_10.pdf

Tabla XX. **Especificaciones del Checker Hanna HI725**

Especificación	Dimensiones	Valor
Rango	ppm	0,00 – 5,00
Exactitud a 25°C	ppm	±0,04 ± 2%
Lámpara	nm	LED @ 525
Detector de luz	-	Protocelda de Silicón
Temperatura ambiental optima	°C	0 - 50
Humedad ambiental optima	%	95 sin condensación

Fuente: HANNA INSTRUMENTS. *Manual de Producto Checker Hanna HI725*
https://hannachecker.com/manuals/manual721_02_04_10.pdf

2.2. Manual del *Checker* Hanna HI725

El *Checker* HANNA HI725, como un instrumento de medición, cuenta con un manual de usuario describe el siguiente procedimiento:

2.2.1. Materiales

El método de análisis empleado por *Checker* HANNA HI725, requiere de los siguientes materiales. Estos materiales están incluidos con el equipo.

- Medidor de hierro total *Checker* HI 721.
- Cubetas de cristal HI 731321 (incluido con el *Checker*).
- Paño de limpieza HI 731318 (incluido con el *Checker*).

2.2.2. Reactivos y Soluciones

El método de análisis empleado por *Checker* HANNA HI725, 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.

2.2.3. Procedimiento

El método de análisis empleado por *Checker* HANNA HI725, se basa en el método espectrofotométrico de la fenantrolina, El procedimiento incluye una autocalibración que permite el análisis de muestras con turbidez.

- Llene ambas cubetas con la solución a analizar.
- Agregue a una de las cubetas el reactivo contenido en el sobre HI 721.
- La cubeta sin reactivo y a la que se le ha agregado el reactivo corresponden a las soluciones C1 y C2 respectivamente.
- Oprima y suelte el interruptor. El instrumento solicitará la solución C1.
- Coloque la solución C1 en el *Checker*, secando la cubeta con el paño de limpieza.
- Oprima y suelte el interruptor. El instrumento iniciará la calibración, al finalizar solicitará la solución C2.
- Seque y coloque la cubeta con la solución C2 en el *Checker*.
- Oprima el interruptor hasta que la cuenta regresiva inicie.
- Al finalizar la cuenta regresiva, el aparato mostrará el resultado de la medición.
- Anote el resultado.

- El resultado aparece en la pantalla por 10 segundos, luego de este tiempo el aparato se reiniciara y estará listo para la próxima medición.
- Limpie las cubetas con agua destilada y continúe con la próxima medición.

3. HOJAS DE DATOS DE SEGURIDAD DE MATERIALES

Una hoja de datos de seguridad de materiales (MSDS por sus siglas en inglés de *Material Safety Data Sheet*) es un documento que contiene información sobre los compuestos químicos.

A continuación, se presentan los datos más relevantes, extraídos de las hojas de datos de seguridad de materiales, para los reactivos usados en el trabajo de investigación.

3.1. Hoja de datos de seguridad del hidróxido de sodio

El hidróxido de sodio (NaOH) ó hidróxido sódico, también conocido como soda cáustica o sosa cáustica es un hidróxido cáustico usado en la industria principalmente como una base química) en la fabricación de papel, tejidos, y detergentes.

3.1.1. Identificación

El hidróxido de sodio, es nombrado según la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC). Es importante conocer además los nombres comerciales y la nomenclatura química del compuesto.

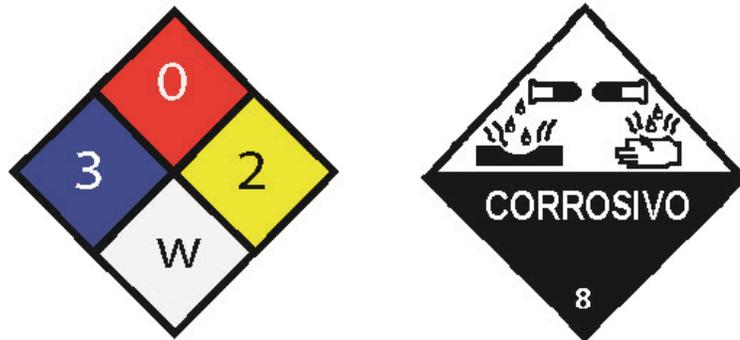
- Nombre: hidróxido de sodio
- Sinónimos: sosa caustica, lejía.
- Fórmula: NaOH

3.1.2. Propiedades físicas y químicas

El hidróxido de sodio, como toda sustancia química, se caracterizan por sus propiedades físicas o químicas, es decir cómo reaccionan a los cambios sobre del entorno sobre ella.

- Apariencia, olor y estado físico: solido blanco, inodoro en forma de escamas
- Densidad: 2,13 g/ml (25°C)
- Punto de ebullición: 1390 °C
- Punto de fusión: 318 °C
- pH: 14 (solución al 5% p/v)
- Solubilidad: soluble en agua, alcohol y glicerol

Figura 53. **Rombo de seguridad del hidróxido de sodio**



Fuente: MERCK, KGaA. *Hojas de datos de seguridad*. http://www.merck-chemicals.com/Merck-ES-Site/es_ES/-/EUR/ViewSearch-SearchFormMSDS

3.1.3. Identificación de peligros

El hidróxido de sodio, es irritante y corrosivo de los tejidos. Los casos más comunes de accidente son por contacto con la piel y ojos, así como inhalación de neblinas o polvo.

- Inhalación: la inhalación de polvo o neblina causa irritación y daño del tracto respiratorio. En caso de exposición a concentraciones altas, se presenta ulceración nasal.
- Contacto con ojos: el NaOH es extremadamente corrosivo a los ojos por lo que las salpicaduras son muy peligrosas, pueden provocar desde una gran irritación en la córnea, ulceración, nubosidades y finalmente, su desintegración. En casos más severos puede haber ceguera permanente, por lo que los primeros auxilios inmediatos son vitales.

- Contacto con la piel: tanto el NaOH sólido, como en disoluciones concentradas es altamente corrosivo a la piel.
- Ingestión: causa quemaduras severas en la boca, si se traga el daño es, además, en el esófago produciendo vómito y colapso.

3.1.4. Primeros auxilios

El hidróxido de sodio, cuenta con primeros auxilios especiales según el modo en que el individuo haya entrado en contacto con el producto químico. A continuación se describen los primeros auxilios esenciales.

- Inhalación: retirar del área de exposición hacia una bien ventilada. Si el accidentado se encuentra inconsciente, no dar a beber nada, dar respiración artificial y rehabilitación cardiopulmonar. Si se encuentra consciente, levantarlo o sentarlo lentamente, suministrar oxígeno, si es necesario.
- Ojos: lavar con abundante agua corriente, asegurándose de levantar los párpados, hasta eliminación total del producto.
- Piel: quitar la ropa contaminada inmediatamente. Lavar el área afectada con abundante agua corriente.
- Ingestión: no provocar vómito. Si el accidentado se encuentra inconsciente, tratar como en el caso de inhalación. Si está consciente, dar a beber una cucharada de agua inmediatamente y después, cada 10 minutos.

3.1.5. Desechos

Para el manejo de desechos de hidróxido de sodio, ya sea por material sobrante o derrames, deben de seguirse las siguientes recomendaciones:

- Para pequeñas cantidades, agregar lentamente y con agitación, agua y hielo. Ajustar el pH a neutro con HCl diluido. La disolución acuosa resultante, puede tirarse al drenaje diluyéndola con agua.
- Durante la neutralización se desprende calor y vapores, por lo que debe hacerse lentamente y en un lugar ventilado adecuadamente.

3.2. Hoja de datos de seguridad del ácido clorhídrico

El ácido clorhídrico, es una disolución acuosa del gas cloruro de hidrógeno (HCl). Es un muy corrosivo y ácido. Se emplea comúnmente como reactivo químico y se trata de un ácido fuerte que se disocia completamente en disolución acuosa.

3.2.1. Identificación

El ácido clorhídrico, es nombrado según la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC). Es importante conocer además los nombres comerciales y la nomenclatura química del compuesto.

- Nombre: ácido clorhídrico
- Sinónimos: cloruro de hidrogeno en solución, ácido muriático, ácido hidroclórico

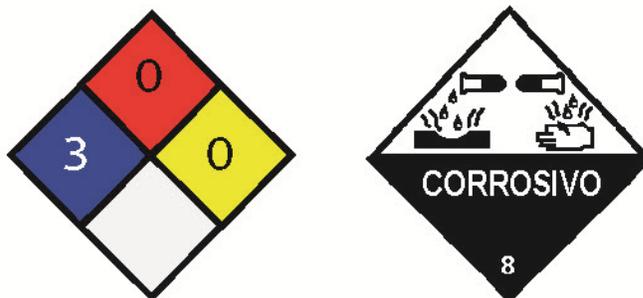
- Fórmula: HCl

3.2.2. Propiedades físicas y químicas

El ácido clorhídrico, como toda sustancia química, se caracterizan por sus propiedades físicas o químicas, es decir cómo reaccionan a los cambios sobre del entorno sobre ella.

- Apariencia, olor y estado físico: líquido humeante incoloro o amarillo claro con olor penetrante e irritante.
- Densidad: 1,2 g/ml (25°C)
- Punto de ebullición: 85 °C
- Punto de fusión: -25 °C
- pH: <1 (concentrado)
- Solubilidad: soluble en agua

Figura 54. Rombo de seguridad del ácido clorhídrico



Fuente: MERCK, KGaA. Hojas de datos de seguridad. http://www.merck-chemicals.com/Merck-ES-Site/es_ES/-/EUR/ViewSearch-SearchFormMSDS

3.2.3. Identificación de peligros

El cloruro de hidrógeno, es irritante y corrosivo para cualquier tejido con el que tenga contacto. Algunas personas pueden sufrir una reacción inflamatoria al cloruro de hidrógeno.

- Inhalación: la inhalación de los vapores puede producir tos, asfixia, inflamación de la nariz, garganta y tracto respiratorio superior y en casos severos, edema pulmonar, fallo circulatorio y muerte.
- Contacto con ojos: los vapores son irritantes y pueden causar daño ocular. El contacto puede causar severas quemaduras y daño ocular permanente.
- Contacto con la piel: corrosivo. Puede causar enrojecimiento, dolor y quemaduras severas de la piel. Las soluciones concentradas causan úlceras profundas y decoloración de la piel.
- Ingestión: la ingestión de ácido clorhídrico puede causar dolor inmediato y quemaduras en la boca, garganta, esófago y tracto gastrointestinal. Puede causar náuseas, vómitos y diarrea. La ingestión puede ser fatal.

3.2.4. Primeros auxilios

El ácido clorhídrico, cuenta con primeros auxilios especiales según el modo en que el individuo haya entrado en contacto con el producto químico. A continuación se describen los primeros auxilios esenciales.

- Inhalación: trasladar a la víctima al aire fresco. Si la respiración es difícil, suministrar oxígeno. Si la respiración se ha detenido, dar respiración artificial. Buscar atención médica inmediatamente.
- Ojos: lave bien los ojos inmediatamente al menos durante 15 minutos, elevando los párpados superior e inferior ocasionalmente. Busque atención médica inmediata.
- Piel: lave la piel inmediatamente con abundante agua por lo menos durante 15 minutos mientras se retira la ropa y zapatos contaminados. Lave la ropa antes de usarla nuevamente. Busque atención médica inmediata.
- Ingestión: ¡no induzca el vómito! Administre grandes cantidades de agua o leche si se encuentra disponible. Nunca administre nada por la boca a una persona inconsciente. Buscar atención médica inmediata.

3.2.5. Desechos

Para el manejo de desechos de ácido clorhídrico, ya sea por material sobrante o derrames, deben de seguirse las siguientes recomendaciones:

- Considerar el uso del ácido diluido para neutralizar residuos alcalinos
- Adicionar cuidadosamente ceniza de soda o cal, los productos de la reacción se pueden conducir a un lugar seguro donde no tenga contacto con el ser humano, la disposición en tierra es aceptable.

- Neutralizar (ajuste el pH a 7) la solución restante con una base diluida antes de limpiar con un chorro de agua para su posterior vertimiento al alcantarillado en las concentraciones aprobadas por las entidades locales.

3.3. Hoja de datos de seguridad del sulfato ferroso heptahidratado

El sulfato de hierro (II) es un compuesto químico iónico de fórmula (FeSO_4). También llamado sulfato ferroso, se encuentra casi siempre en forma de sal heptahidratada, de color azul-verdoso.

3.3.1. Identificación

El sulfato ferroso heptahidratado, es nombrado según la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC). Es importante conocer además los nombres comerciales y la nomenclatura química del compuesto.

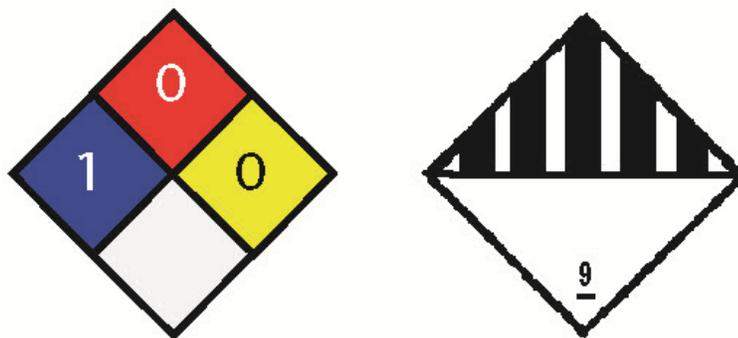
- Nombre: sulfato ferroso heptahidratado
- Sinónimos: sulfato de hierro, sulfato ácido de hierro (2+) sal (1:1), heptahidratado
- Fórmula: $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

3.3.2. Propiedades físicas y químicas

El sulfato ferroso heptahidratado, como toda sustancia química, se caracterizan por sus propiedades físicas o químicas, es decir cómo reaccionan a los cambios sobre del entorno sobre ella.

- Apariencia, olor y estado físico: cristales azules - verdosos, Inodoro
- Densidad: 1,9 g/ml (25°C)
- Punto de ebullición: se descompone > 300 °C
- Punto de fusión: 57 °C
- pH: 4 (solución al 5% v/v)
- Solubilidad: soluble en agua

Figura 55. **Rombo de seguridad del sulfato ferroso heptahidratado**



Fuente: MERCK, KGaA. *Hojas de datos de seguridad.* http://www.merck-chemicals.com/Merck-ES-Site/es_ES/-/EUR/ViewSearch-SearchFormMSDS

3.3.3. Identificación de peligros

El sulfato ferroso, se usa para tratar la anemia ferropénica. Efectos secundarios de esta terapia pueden incluir náuseas y molestias epigástricas después de tomar el hierro. Estos efectos pueden minimizarse si se toma antes

de ir a dormir o también se puede consumir después del almuerzo, puesto que el estómago se encuentra lleno.

Cuenta con baja toxicidad, pero deben aplicarse medidas de seguridad estándares como material de laboratorio.

- Inhalación: causa irritación al tracto respiratorio. Los síntomas pueden incluir tos, dificultad para respirar.
- Contacto con ojos: causa irritación, enrojecimiento y dolor.
- Contacto con la piel: causa irritación a la piel. Los síntomas incluyen enrojecimiento, picazón y dolor.
- Ingestión: baja toxicidad en pequeñas cantidades, pero grandes dosis pueden causar náuseas, vómitos, diarrea y heces negras. Una coloración rosada en la orina es un fuerte indicador de intoxicación por hierro. Daño al hígado, coma y muerte por envenenamiento de hierro han sido reportados. Pequeñas dosis son mucho más tóxicas para los niños.

3.3.4. Primeros auxilios

El sulfato ferroso heptahidratado, cuenta con primeros auxilios especiales según el modo en que el individuo haya entrado en contacto con el producto químico. A continuación se describen los primeros auxilios esenciales.

- Inhalación: trasladar al aire fresco. Si no respira, dar respiración artificial. Si la respiración es difícil, dar oxígeno. Conseguir atención médica.

- Ojos: lavar los ojos inmediatamente con abundante agua durante al menos 15 minutos, abriendo y cerrando los párpados ocasionalmente. Conseguir atención médica inmediatamente.
- Piel: lavar la piel inmediatamente con abundante agua y jabón durante al menos 15 minutos. Quítese la ropa y zapatos contaminados. Lave la ropa y los zapatos antes de usarlos nuevamente. Conseguir atención médica.
- Ingestión: provocar el vómito inmediatamente con indicación de personal médico. No dar nada por boca a una persona inconsciente. Conseguir atención médica.

3.3.5. Desechos

Para el manejo de desechos de sulfato ferroso heptahidratado, ya sea por material sobrante o derrames, deben de seguirse las siguientes recomendaciones:

- Tratar el material de desecho en solución con hidróxido de sodio diluido o soda caustica, con el objetivo de precipitar el hierro. Separar el precipitado y enterrarlo en un relleno sanitario aprobado.
- Neutralizar (ajuste el pH a 7) la solución restante con ácido diluido antes de limpiar con un chorro de agua para su posterior vertimiento al alcantarillado en las concentraciones aprobadas por las entidades locales.

3.4. Hoja de datos de seguridad del sulfato de aluminio

El sulfato de aluminio es una sal de fórmula $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, es sólido y blanco. Es ampliamente usada en la industria, comúnmente como floculante en la purificación de agua potable y en la industria del papel.

3.4.1. Identificación

El sulfato de aluminio, es nombrado según la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC). Es importante conocer además los nombres comerciales y la nomenclatura química del compuesto.

- Nombre: sulfato de aluminio
- Sinónimos: alumbre, torta de alumbre, salmuera de alumbre, alumbre de perla
- Fórmula: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$

3.4.2. Propiedades físicas y químicas

El sulfato de aluminio, como toda sustancia química, se caracterizan por sus propiedades físicas o químicas, es decir cómo reaccionan a los cambios sobre del entorno sobre ella.

- Apariencia, olor y estado físico: polvo de color blanco, inodoro
- Densidad: 1,2 g/ml (25°C)
- Punto de ebullición: 115 °C

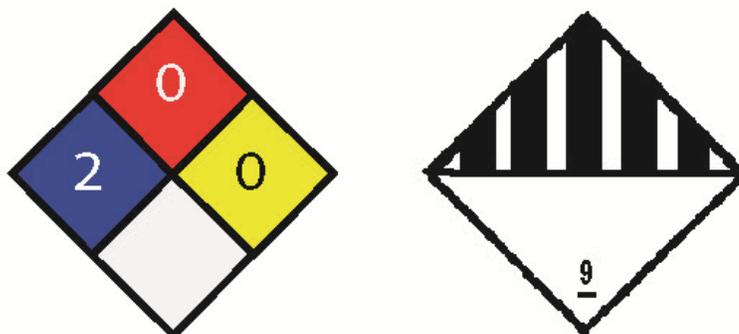
- Punto de descomposición: 650 °C
- pH: 3,5 (solución al 1% v/v)
- Solubilidad: soluble en agua

3.4.3. Identificación de peligros

El sulfato de aluminio, pueden ser irritantes para la piel, los ojos, y el tracto respiratorio. Al contacto con el agua o en solución es corrosivo al hierro. Usar el equipo de protección personal que consta de ropa de hule y equipo de respiración.

- Inhalación: el polvo puede causar carraspera, tos, irritación de la nariz y la garganta.
- Contacto con ojos: irritación con posibles heridas permanentes. En casos más severos puede haber ceguera permanente, por lo que los primeros auxilios inmediatos son vitales.
- Contacto con la piel: irritación.
- Ingestión: náuseas, vómito.

Figura 56. **Rombo de seguridad del sulfato de aluminio**



Fuente: MERCK, KGaA. *Hojas de datos de seguridad*. http://www.merck-chemicals.com/Merck-ES-Site/es_ES/-/EUR/ViewSearch-SearchFormMSDS

3.4.4. **Primeros auxilios**

El sulfato de aluminio, cuenta con primeros auxilios especiales según el modo en que el individuo haya entrado en contacto con el producto químico. A continuación se describen los primeros auxilios esenciales.

- Inhalación: trasladar al aire fresco. Si no respira administrar respiración artificial. Si respira con dificultad suministrar oxígeno. Mantener la persona abrigada y en reposo. Buscar atención médica.
- Ojos: lavar con abundante agua, mínimo durante 15 minutos. Levantar y separar los párpados para asegurar la remoción del químico.
- Piel: retirar la ropa y calzado contaminados. Lavar la zona afectada con abundante agua y jabón, mínimo durante 15 minutos. Si la irritación persiste repetir el lavado. Buscar Atención médica.

- Ingestión: lavar la boca con agua. Si está consciente, suministrar abundante agua. No inducir al vómito, si este se presenta inclinar la víctima hacia adelante.

3.4.5. Desechos

Para el manejo de desechos de sulfato de aluminio, ya sea por material sobrante o derrames, deben de seguirse las siguientes recomendaciones:

- Agua contaminada con sulfato de aluminio es fácilmente tratada ajustando el pH hasta 7. El aluminio precipitará como hidróxido de aluminio, mientras que los sulfatos permanecen en solución.
- El sólido puede ser enterrado en un relleno especial para sustancias químicas.

APÉNDICE

1. INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Tabla XXI. Instrumentos de medición a utilizar en la fase experimental

Variable	Dimensionales	Instrumento
Tiempo	Segundos (s)	Cronometro electrónico.
Volumen	Galones (galones)	Escala graduada en los tanques
Masa	Gramos (g)	Balanza analítica
Presión	Libras por pulgada cuadrada (psi)	Manómetro
Concentración	Partes por millón (ppm)	<i>Checker</i> de análisis de hierro total HANNA HI721.

Fuente: elaboración propia.

2. MUESTRA DE CÁLCULO

Ecuación no. 1 Caudal volumétrico

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

Donde:

Q = Caudal volumétrico (m^3/s)

V = Volumen (m^3)

t = Tiempo (s)

Fuente: MOTT, Robert. *Mecánica de Fluidos Aplicada* p. 161

Ejemplo:

Cálculo del caudal volumétrico en la primera posición de la válvula de globo.

$$Q = \frac{6,10 \times 10^{-3} m^3}{17,9 s} = 3,40 \times 10^{-4} m^3 / s$$

Nota: de la misma forma se calculó el caudal en el tanque no. 1 en el resto de los puntos, véase tabla XXII del anexo de datos calculados.

Ecuación no. 2 **Velocidad de flujo**

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

Donde:

v = Velocidad de flujo (m/s)

Q = Caudal volumétrico (m^3/s)

A = Área (m^2)

Fuente: MOTT, Robert. *Mecánica de Fluidos Aplicada* p. 162

Ejemplo:

Cálculo de la velocidad de flujo en el permeado a un caudal de $1,97 \times 10^{-4} m^3/s$.

$$v = \frac{1,97 \times 10^{-4} m^3 / s}{5,04 \times 10^{-4} m^2} = 0,39 m / s$$

Nota: de la misma forma se calculó la velocidad de flujo en el permeado en el resto de los puntos, véase tabla XXII del anexo de datos calculados.

Ecuación no. 3 **Retención**

$$R_t = \frac{C_o - C_p}{C_o}$$

Donde:

R_t = Retención (adimensional)

C_o = Concentración de inicial (ppm)

C_p = Concentración de permeado (ppm)

Fuente: MULDER, Marcel. *Basic Principles of Membrane Technology*. p. 5

Ejemplo:

Cálculo del caudal volumétrico en la primera posición de la válvula de globo.

$$R_t = \frac{2 \text{ ppm} - 1,15 \text{ ppm}}{2 \text{ ppm}} = 0,425$$

Nota: de la misma forma se calculó la retención en el resto de los puntos, véase tabla XXII del anexo de datos calculados.

Ecuación no. 4 **Porcentaje de recuperación**

$$Pr = \left(1 - \frac{Qa - Qp}{Qa} \right) * 100\%$$

Donde:

Pr = Porcentaje de recuperación (%)

Qa = Caudal de alimentación (m^3/s)

Qp = Caudal de permeado (m^3/s)

Fuente: MULDER, Marcel. *Basic Principles of Membrane Technology*. p. 8

Ejemplo:

Cálculo del porcentaje de recuperación en la primera posición de la válvula de globo.

$$Pr = \left(1 - \frac{3,41 \times 10^{-4} m^3 / s - 1,97 \times 10^{-4} m^3 / s}{3,41 \times 10^{-4} m^3 / s} \right) * 100\% = 59,92\%$$

Nota: de la misma forma se calculó el porcentaje de recuperación en el resto de los puntos, véase tabla XXII del anexo de datos calculados.

Ecuación no. 5 **Media aritmética**

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

Donde:

\bar{X} = Media aritmética.

X_i = Dato.

N = Numero de datos.

Fuente: MILLER, J.C. *Estadística para Química Analítica*. p. 10

Ejemplo:

Cálculo del promedio del caudal en el tanque no. 1 en la primera posición de la válvula de globo.

$$\bar{X} = \left(\frac{3,40 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s} + 3,44 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s} + 3,39 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s}}{3} \right) = 3,41 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s}$$

Nota: de la misma forma se calculó el promedio del caudal en el tanque no. 1 en el resto de los puntos, véase tabla XXIII y tabla XXIV del análisis estadístico.

Ecuación no. 6 **Desviación estándar:**

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

Donde:

S = Desviación estándar.

\bar{X} = Media aritmética.

X_i = Dato.

N = Numero de datos.

Fuente: MILLER, J.C. *Estadística para Química Analítica*. p. 12

Ejemplo:

Cálculo del promedio del caudal en el tanque no. 1 en la primera posición de la válvula de globo.

$$s = \sqrt{\frac{(3,40 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} - 3,41 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s})^2 + (3,40 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} - 3,41 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s})^2 + (3,39 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} - 3,41 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s})^2}{3}}$$

$$S = 2,62 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

Nota: de la misma forma se calculó la desviación estándar en el resto de los puntos, véase tabla XXIII y tabla XXIV del análisis estadístico.

Ecuación no. 7 **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)

Fuente: SÁNCHEZ FONT, Francisc. "Estudio y Diseño de una Planta de Producción de Membranas Cerámicas de Coste Reducido". p. 66

3. DATOS CALCULADOS

Tabla XXII. Datos calculados

No. de corrida	Cambio de presión (PTM) [Pa]	Caudal en tanque no. 1 [m ³ /s]	Caudal en tanque no. 2 [m ³ /s]	Retención	Porcentaje de recuperación [%]	Flujo en el permeado [m/s]
1	85 495,02	3,41E-04	1,97E-04	0,425	57,92	0,39
2	81 358,17	2,46E-04	1,86E-04	0,450	75,64	0,37
3	84 116,07	2,04E-04	1,97E-04	0,375	96,44	0,39
4	77 910,79	1,36E-04	1,05E-04	0,575	77,17	0,21
5	74 463,41	6,82E-05	4,12E-05	0,825	60,41	0,08

Fuente: elaboración propia.

4. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICO

Tabla XXIII. **Análisis de estadístico del caudal en tanque no. 1**

Caudal en tanque no.1 [m³/s]				
Medición 1	Medición 2	Medición 3	Promedio	Desviación Estándar
3,39E-04	3,40E-04	3,44E-04	3,41E-04	2,62E-06
2,44E-04	2,52E-04	2,41E-04	2,46E-04	5,66E-06
2,09E-04	2,00E-04	2,04E-04	2,04E-04	4,43E-06
1,35E-04	1,41E-04	1,34E-04	1,36E-04	3,94E-06
6,84E-05	6,79E-05	6,83E-05	6,82E-05	2,49E-07

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Análisis de estadístico del caudal en tanque no. 2**

Caudal en tanque no.2 [m³/s]				
Medición 1	Medición 2	Medición 3	Promedio	Desviación Estándar
1,93E-04	2,05E-04	1,94E-04	1,97E-04	6,35E-06
1,83E-04	1,89E-04	1,85E-04	1,86E-04	2,92E-06
1,97E-04	2,02E-04	1,93E-04	1,97E-04	4,91E-06
1,07E-04	1,03E-04	1,07E-04	1,05E-04	2,31E-06
4,12E-05	4,08E-05	4,15E-05	4,12E-05	3,62E-07

Fuente: elaboración propia.

5. MANUAL DE PRÁCTICA DE LABORATORIO

A continuación se presenta el manual entregado a los estudiantes para la realización de la práctica de validación. Dicho manual va acompañado de la instrucción directa por parte del catedrático del curso y el tesista encargado del trabajo de investigación.

5.1. Caracterización de un filtro de membranas a trabes de la separación del hierro del agua.

5.1.1. Objetivos

- Cuantificar la retención, el flujo, la saturación y la recuperación de las membranas.
- Modelar matemáticamente el proceso de microfiltración.
- Generar las curvas de operación de las membranas utilizadas con base a datos experimentales.

5.1.2. Materiales

- Estación experimental para el curso de separación por membranas selectivas.
- Medidor de hierro total “Checker” HI721.
- Cronómetro.
- Balanza.

- Vidrio de reloj.
- *Beacker.*
- Frascos para toma de muestras.
- Guantes.
- Gafas de seguridad.

5.1.3. Reactivos y soluciones

- Solución 20 por ciento peso/volumen de soda caustica.
- Solución 20 por ciento peso/volumen de sulfato de aluminio (floculante).
- 0,6127 gramos de sulfato ferroso heptahidratado. (para una concentración de 2 ppm de Fe en 30 galones de Agua).
- Agua.
- Kit de reactivos para medidor de hierro total “Checker” HI721.

5.1.4. Procedimiento

5.1.4.1. Prueba de flujo de agua

- Abrir la válvula de bola no. 1 de la alimentación y llenar el tanque no. 1 con agua hasta la marca de 30 galones.
- Abrir la válvula de bola no. 2 y la válvula de globo no. 1. Con esto permitirá la entrada de agua al sistema, lo que cebará la bomba centrífuga.

- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *ON*. Esto permitirá el flujo de agua desde el tanque no. 1 al tanque no. 2.
- Permitir que el flujo se estabilice y anotar el cambio de presión (PTM). Anotar esta medida con el objeto de tener un blanco para medir en cada práctica el nivel de ensuciamiento de la membrana.
- Comparar la medición con el valor del blanco Inicial. Reportar la diferencia al instructor.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *OFF*.
- Cerrar la válvula de globo no. 1 y abrir la válvula de bola no. 4.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *ON*. Esto permitirá el flujo de agua desde el tanque no. 2 al tanque no. 1.
- Permitir que el flujo circule hacia el tanque no. 1 evitando que la bomba succione aire.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *off* y cerrar todas las válvulas.
- Abrir la válvula de bola no. 6 en el tanque no. 2 para la purga del mismo.

5.1.4.2. Procedimiento experimental

- Abrir la válvula de bola no. 1 de la alimentación y ajustar el nivel de agua en el tanque no. 1 a la marca de 30 galones.

- Agregar 0,6127 gramos de sulfato ferroso heptahidratado para obtener una concentración de 2 partes por millón en 30 galones de agua.
- Abrir la válvula de bola no. 2 y la válvula de bola no. 4. con esto permitirá la entrada de agua al sistema, lo que cebara la bomba centrífuga.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *ON*. Esto permitirá que la solución en el tanque no. 1 se mezcle homogéneamente.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *OFF*
- Tomar una alícuota de la solución en el tanque no. 1.
- Haciendo uso del medidor de hierro total *Checker* determinar el contenido de hierro en la alícuota. El resultado será la concentración inicial.
- Agregar la solución de soda caustica al 20 por ciento peso/volumen hasta que la solución en el tanque se ponga turbia, posteriormente agregar la solución de floculante al 20 por ciento peso/volumen hasta formar floculos en la solución contenida en el tanque no. 1.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *ON*. esto permitirá nuevamente que la solución en el tanque no. 1 se mezcle homogéneamente.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *OFF*. No permitir que los floculos formados precipiten antes de continuar el siguiente pasó. En el caso de que precipitaran mezcle nuevamente la solución.

- Cerrar la válvula de bola no. 4 y abrir totalmente la válvula de globo no. 1. La apertura de la válvula de globo no. 1 controlara el caudal del sistema. Es importante tomar nota de esta apertura en cada medición.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *ON*. Esto permitirá que la solución pase del tanque no. 1 al tanque no. 2 a través del módulo de membranas.
- Anotar la presión registrada en los manómetros 1 y 2. La diferencia entre ambos representa la presión transmembrana (PTM).
- Con la ayuda del cronometro y las marcas en los tanques determinar el caudal volumétrico en el tanque no. 1 y el tanque no. 2.
- Tomar una alícuota del agua que entra en el tanque no. 2.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *OFF*.
- Haciendo uso del medidor de hierro total *Checker* determinar el contenido de hierro en la alícuota. El resultado será la concentración final relacionada con la apertura de la válvula de globo no. 1 y el caudal del sistema.
- Cerrar la válvula de globo no. 1 y abrir la válvula de bola no. 4.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *ON*. Esto permitirá que la solución en el tanque no. 1 se agite y evita que los floculos formados se precipiten por completo.

- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *OFF*.
- Cerrar la válvula de bola no. 4 y abrir nuevamente la válvula de bola no. 3. En esta ocasión la abertura en la válvula de globo no. 1 debe ser ligeramente menor a la de la medición anterior.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición *ON*.
- Repita los últimos 10 pasos, para continuar y obtener 5 mediciones con caudales (posiciones de la válvula de globo no. 1) diferentes.
- Al finalizar la práctica siga el procedimiento de limpieza y disposición de desechos.

Nota: si la solución en el tanque no. 1 se agota antes de completar las 5 mediciones, recircule la solución cerrando las válvulas de bola no. 2 y la válvula de globo no. 1, y abriendo las válvulas de bola no. 3 y 4. Tomar una alícuota de la solución en el tanque no. 1 y determinar la nueva concentración inicial.

5.1.4.3. Cálculos y reporte

Con los datos obtenidos a los diferentes caudales determinar:

- La retención.
- El porcentaje de recuperación.
- La presión transmembrana (PTM).

Posteriormente a efectuar los cálculos anteriores grafique:

- La retención versus el caudal volumétrico.
- El porcentaje de recuperación versus el caudal volumétrico.
- El Caudal volumétrico versus la presión transmembrana (PTM). Utilice la pendiente de la gráfica para calcular el coeficiente de permeabilidad.

Concluya acerca del efecto del caudal en la operación y las características de la membrana en base al comportamiento observado en las gráficas operacionales realizadas.

5.1.4.4. Mantenimiento del equipo

- Abrir la válvula de bola no. 1 de la alimentación y llenar el tanque no. 1 con agua hasta la marca de 30 galones.
- Abrir la válvula de bola no. 2 y la válvula de globo no. 1. Con esto permitirá la entrada de agua al sistema, lo que cebará la bomba centrífuga.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *ON*. esto permitirá el flujo de agua desde el tanque no. 1 al tanque no. 2.
- Permitir que el flujo se estabilice y anotar el cambio de presión (PTM). Esta medida con el objeto de tener un blanco para medir con cada práctica el nivel de ensuciamiento de la membrana.

- Comparar la medición con el valor del blanco inicial. Reportar la diferencia al instructor.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *OFF*.
- Cerrar las válvulas de bola no. 2 y la válvula de globo no. 1, y abrir las válvulas de bola no. 3 y 4.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *ON*. Esto permitirá el flujo de agua desde el tanque no. 2 al tanque no. 1.
- Permitir que el flujo circule hasta que el agua llegue en el tanque no. 1 a la marca de 15 galones.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *OFF* y cerrar todas las válvulas.
- Abrir las válvulas de bola no. 5 y 6 para la purga de los tanques.

Nota: según recomendaciones del fabricante cuando la PTM al filtrar agua limpia aumente en un valor de 10 libras por pulgada cuadrada (68 947,59 Pa) de su valor inicial, la membrana debe someterse a limpieza. Si el cambio en la PTM aún supera este límite, luego de la limpieza debe remplazarse la membrana

6. ENCUESTA DE VALIDACIÓN DE PRÁCTICA DE LABORATORIO

La siguiente encuesta, fue entregada a los estudiantes que participaron en la práctica de validación. Los resultados de dicha encuesta fueron usados para validar la práctica de laboratorio y comprobar que la estación experimental y la práctica de laboratorio, cumplen con los objetivos del trabajo de investigación.

6.1. Encuesta de validación de práctica de laboratorio del curso de separación por membranas selectivas

La información que amablemente nos proporcione será utilizada para la validación de la práctica de laboratorio de curso de separación por membranas selectivas.

Sus respuestas serán tratadas de forma confidencial y no serán utilizadas para ningún propósito más que el expuesto y completar el trabajo de investigación.

1. Califique su conocimiento previo sobre la operación de equipos de separación por membranas selectivas.

- Deficiente Básico Medio Alto

2. El equipo usado en la práctica representa efectivamente un sistema de separación por membranas selectivas?

- Si No

3. La práctica complementa la instrucción recibida en el curso de separación por membranas selectivas?

- Si No

4. Cree necesaria la implementación de la práctica de laboratorio para el curso de separación por membranas selectivas?

- Si No

5. Califique su conocimiento adquirido respecto al parámetro de retención en membranas.

- Deficiente Básico Medio Alto

6. Califique su conocimiento adquirido respecto al parámetro de saturación en membranas.

- Deficiente Básico Medio Alto

7. Califique su conocimiento adquirido respecto al parámetro del porcentaje de recuperación en membranas.

- Deficiente Básico Medio Alto

8. Califique su conocimiento adquirido respecto a la aplicación de modelos matemáticos en procesos a membranas.

- Deficiente Básico Medio Alto

9. Califique su conocimiento adquirido respecto la elaboración de curvas de operación en procesos a membranas.

- Deficiente Básico Medio Alto

10. El equipo cuenta con los instrumentos adecuados para cumplir con los objetivos de la práctica?

- Si No

11. Califique su conocimiento adquirido sobre la operación de equipos de separación por membranas selectivas.

- Deficiente Básico Medio Alto

7. PROCEDIMIENTO DE LIMPIEZA Y DISPOSICIÓN DE DESECHOS

A continuación se presenta el procedimiento entregado a los estudiantes para la limpieza y disposición de desechos. Tiene como objetivo eliminar de manera responsable y segura los desechos generados en la práctica de laboratorio.

7.1. Limpieza y disposición de desechos

7.1.1. Objetivos

- Eliminar de forma responsable y segura los desechos generados en la práctica de laboratorio.
- Motivar la cultura de manejo de desechos en los estudiantes.

7.1.2. Materiales

- Estación experimental para el curso de Separación por Membranas Selectivas.
- 2 cubetas de 20 litros.
- Guantes.
- Gafas de seguridad.
- Tiras de medición de Ph.

7.1.3. Reactivos y Soluciones

- Solución 20 por ciento peso/volumen de ácido clorhídrico.
- Agua.
- Cemento puzolana (opcional).

7.1.4. Procedimiento

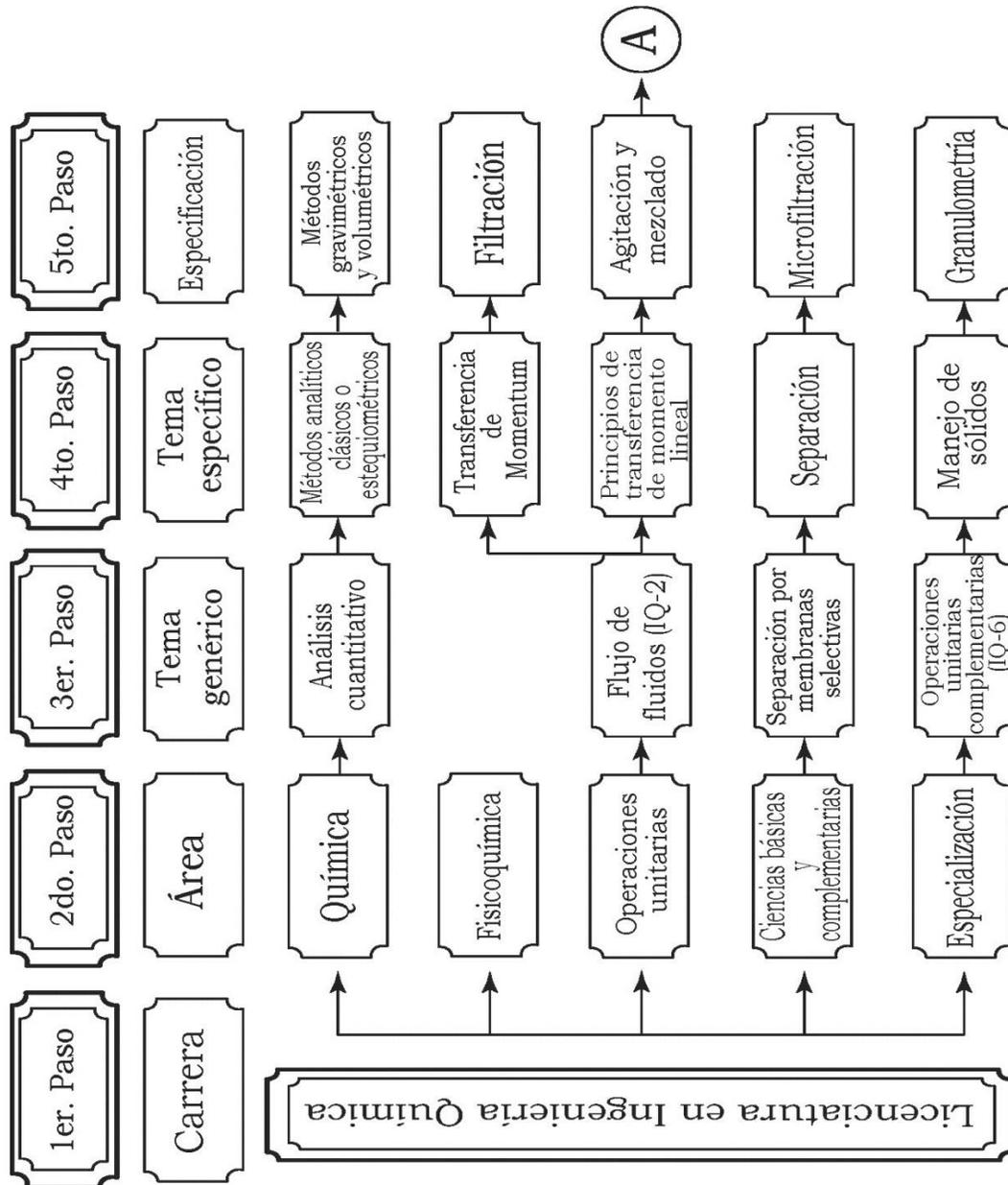
- Abrir la válvula de bola no. 2 y la válvula de globo no. 1. Con esto permitirá la entrada de agua al sistema, lo que cebara la bomba centrífuga.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *ON*. Esto permitirá el flujo de agua desde el tanque no. 1 al tanque no. 2.
- Permitir que la mayor cantidad posible de agua pase del tanque no. 1 al tanque no. 2.
- Colocar el interruptor de la bomba en la posición de *OFF*.
- Desconectar el tanque no. 1 del sistema y verter su contenido en el tanque no. 2.
- Haciendo uso de la solución de ácido clorhídrico ajustar el pH del agua en el tanque no. 2 hasta la neutralidad (pH 7).

- Permitir la formación del precipitado. La fase líquida de la solución contenida en el tanque no. 2 ha completado su tratamiento y puede descartarse en el drenaje.
- Abrir la válvula de bola no. 6 en el tanque no. 2 para la purga del mismo. Durante la purga no se debe permitir que el precipitado llegue al drenaje, solamente la fase líquida.
- Recolectar el precipitado y los residuos de la fase líquida en las cubetas de 20 litros. De ser necesario utilizar agua para arrastrar todo el precipitado.
- Colocar la cubeta abierta en un espacio protegido de la lluvia y permitir que se evapore toda el agua. El precipitado obtenido ha completado su tratamiento.
- Recolectar todo el precipitado de las paredes de la cubeta y enterrarlo en un relleno sanitario o un espacio designado para enterrar residuos de laboratorio químico.

Nota: si no se cuenta con un espacio adecuado para enterrar los precipitados obtenidos, mezclarlos con agua y cemento puzolana y colocarlo en un molde. El bloque obtenido luego de secarse el cemento encapsulara los desechos evitando la producción de lixiviados dañinos para el medio ambiente y puede descartarse en un relleno sanitario común.

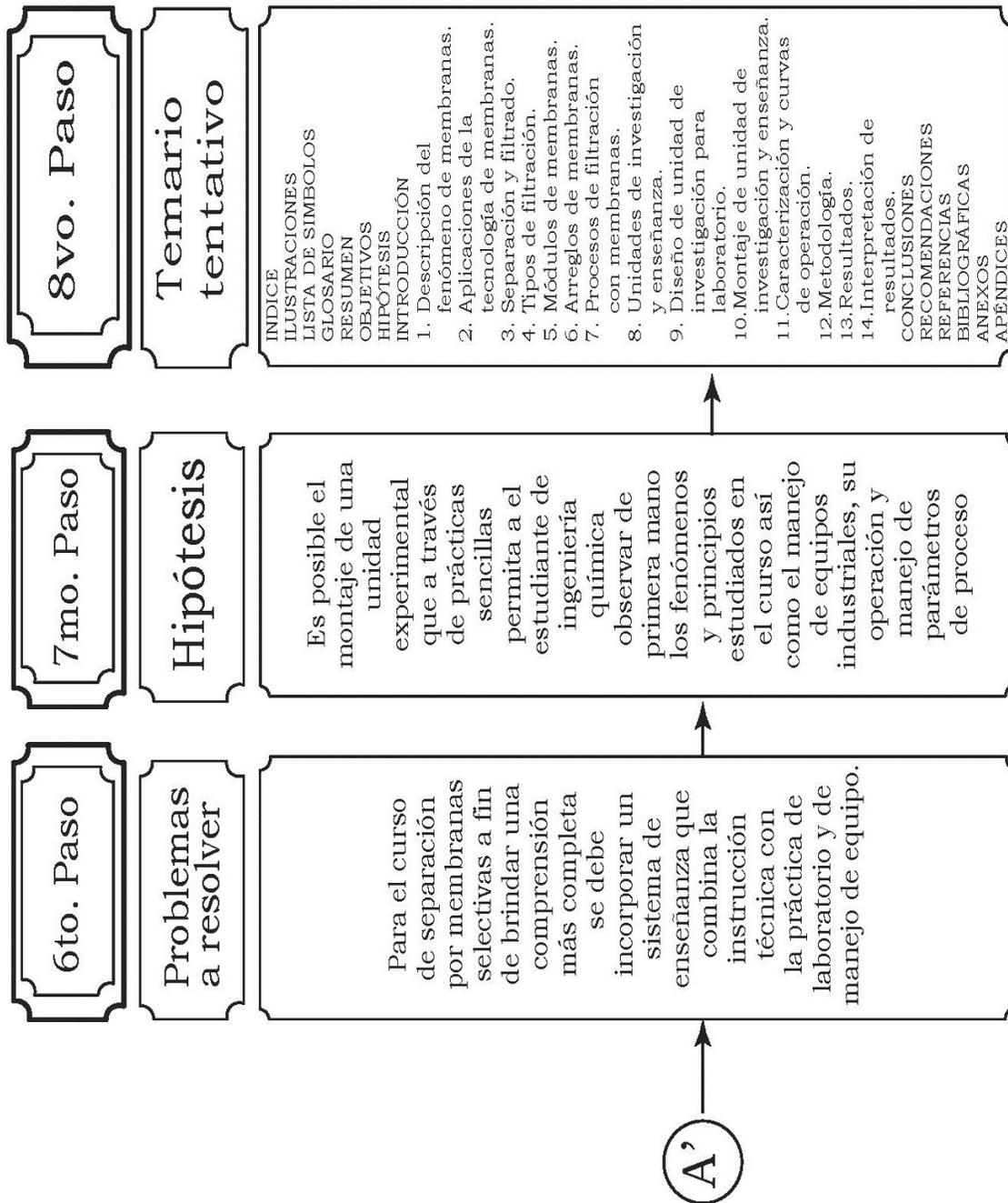
8. TABLA DE REQUISITOS ACADÉMICOS

Figura 57. Tabla de requisitos académicos, parte no. 1



Fuente: elaboración propia, con programa Adobe Illustrator CS6.

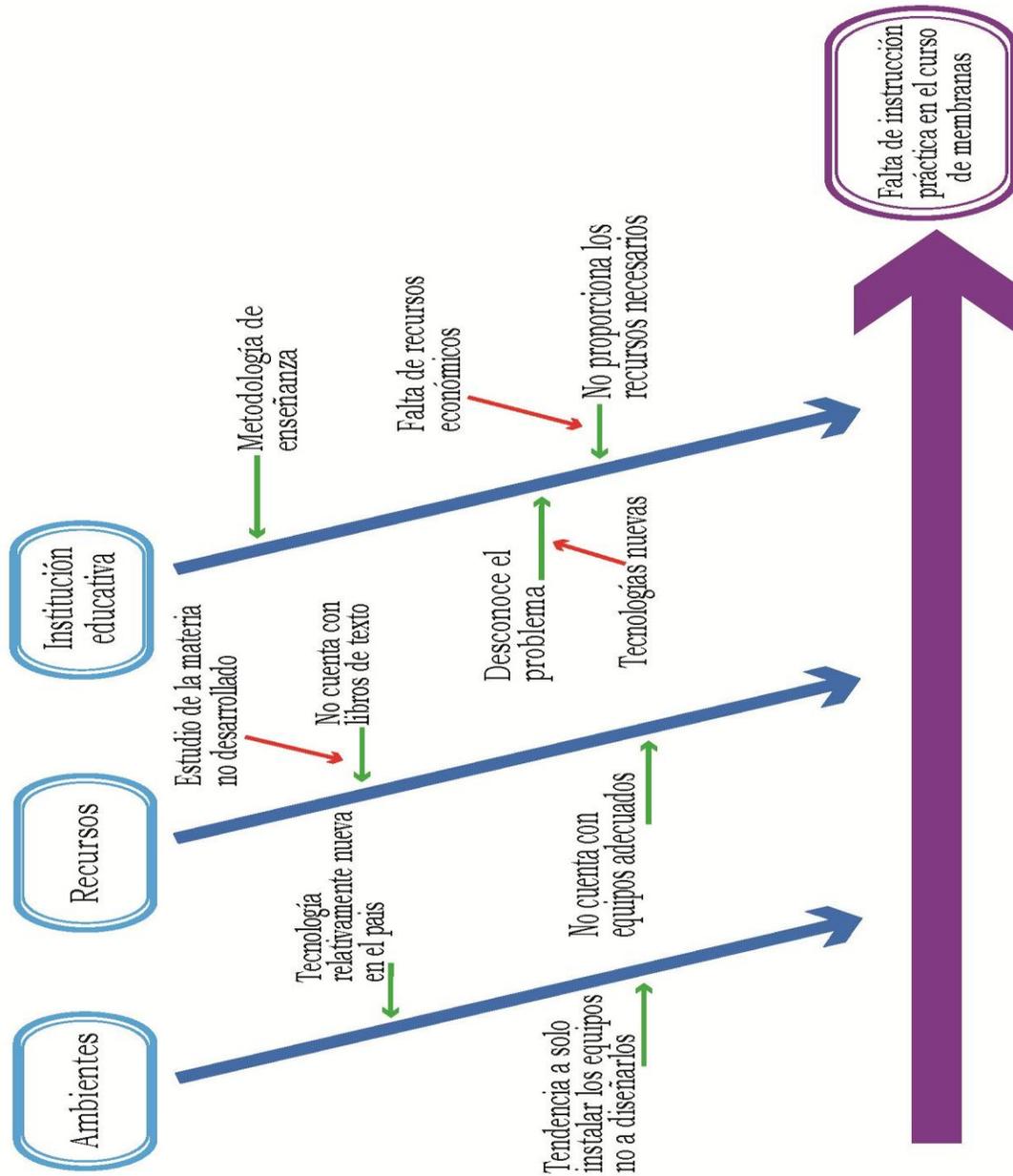
Figura 58. **Tabla de requisitos académicos, parte no. 2**



Fuente: elaboración propia, con programa Adobe Illustrator CS6.

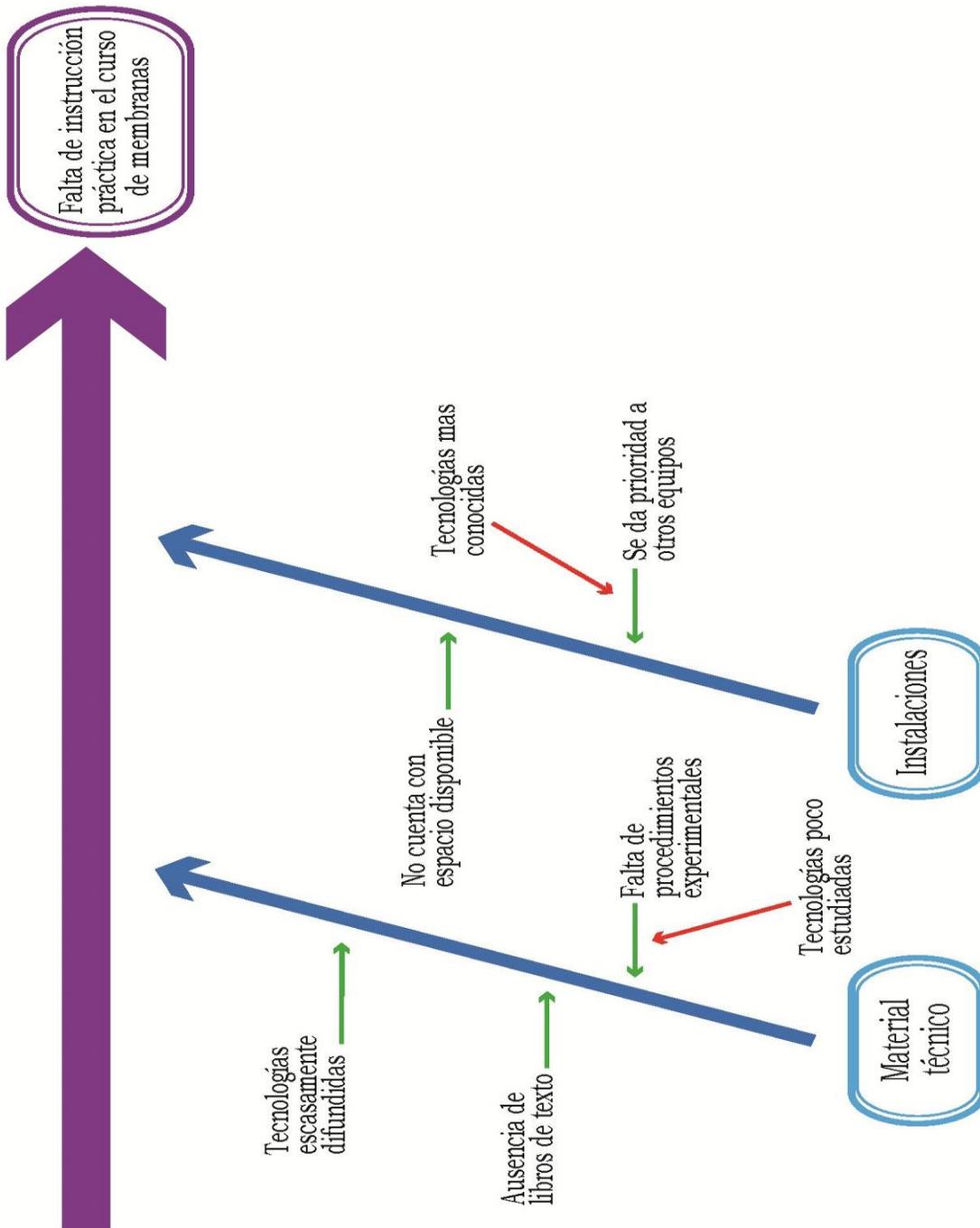
9. DIAGRAMA DE ISHIKAWA y/o ÁRBOL DE PROBLEMAS

Figura 59. Diagrama de Ishikawa o Árbol de problemas, parte no. 1



Fuente: elaboración propia, con programa Adobe Illustrator CS6.

Figura 60. Diagrama de Ishikawa o Árbol de problemas, parte no. 2



Fuente: elaboración propia, con programa Adobe Illustrator CS6.