

Implementación de un módulo para membranas cerámicas tubular monocanal en el equipo de ultrafiltración del Laboratorio de procesos de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander

Claudia Lorena Barrera Angarita y Javier Enrique Rodríguez Montes

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Químico.

Director

Carlos Omar Parra Escudero

Ingeniero Químico, MSc.

Codirector

Carlos Jesús Muvdi Nova

Ingeniero Químico, PhD.

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas  
Escuela de Ingeniería Química  
Bucaramanga

2020

### **Agradecimientos**

El desarrollo de este proyecto se llevó a cabo por el esfuerzo de muchas personas, primero a nuestros directores Carlos Omar Parra y Carlos Jesús Muvdi que bajo su guía y esfuerzo logramos cumplir todos los objetivos propuestos, a nuestra Universidad Industrial de Santander por su calidad de docentes y el sentido de pertenencia que nos genera realizar un proyecto que la beneficia directamente.

También es necesario mencionar a las personas que no están relacionadas con el proyecto, pero sin su ayuda no podríamos lograr nada:

Para mis padres Luis y Esperanza, sin su apoyo y cariño no hubiera llegado tan lejos en este proyecto de vida, mis hermanos Andrés y Melissa que siempre están para mí y yo para ellos, también muchos amigos y compañeros que con sus palabras y amistad hicieron este camino mucho más pasajero.

(Javier Enrique Rodríguez Montes)

A mi madre Josefina, mis tíos Custodio, Javier y Luz Marina, que estuvieron pendientes durante todo mi proceso estudiantil apoyando cada paso mostrando siempre un apoyo incondicional en cada decisión. Además del cariño de mis hermanos Omaira, Christian, Kelly y Gustavo.

(Claudia Lorena Barrera Angarita)

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
introducción .....	11
1. Objetivos .....	13
1.1 Objetivo General .....	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
2. Cuerpo Del Trabajo.....	14
2.1 Marco Referencial.....	14
2.1.1 Membranas.....	14
2.1.2 Turbidez .....	15
2.1.3 Modelo Matemático .....	16
2.1.4 Descripción Del Piloto.....	18
2.2 Método .....	20
2.2.1 Fase 1. Análisis Del Módulo De Membranas Planas Poliméricas.....	21
2.2.2 Fase 2. Diseño Y Acople Del Módulo De Membranas Cerámicas.....	22
2.2.3 Fase 3. Implementación De Nuevas Prácticas. ....	23
2.3 Resultados Y Discusión .....	24
2.3.1 Fase 1: Análisis Del Módulo De Membranas Planas Poliméricas.....	24
2.3.2 Fase 2. Diseño Y Acople Del Módulo De Membranas Cerámicas.....	30
2.3.3 Fase 3. Implementación De Nuevas Prácticas. ....	33
2.3.4 Construcción Del Manual De Operación.....	40

3. Conclusiones .....	42
4. Recomendaciones .....	44
Referencias Bibliográficas .....	45

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Limitaciones del equipo.....	28
Tabla 2. Bebidas tratadas con membranas cerámicas y condiciones de operación. ....	30
Tabla 3. Resistencia por ensuciamiento de las membranas cerámicas para la prueba de presión.36	
Tabla 4. Resistencia por ensuciamiento de las membranas cerámicas para la prueba de temperatura. ....	38
Tabla 5. Rangos de turbidez encontrados en el permeado para las membranas cerámicas utilizadas en las pruebas realizadas.....	40

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Piloto de ultrafiltración con módulo de membranas poliméricas. ....	19
Figura 2. Cuadro metodológico. ....	21
Figura 3. Permeabilidad del agua destilada de la membrana polimérica. ....	25
Figura 4. Evolución de la resistencia por ensuciamiento de la membrana polimérica con respecto al aumento de la concentración alimentada. ....	26
Figura 5. Efecto de la presión sobre la resistencia por ensuciamiento y el flux de permeado en la membrana polimérica. ....	27
Figura 6. Diseño de las boquillas y el cuerpo del módulo de membranas cerámicas en vista aérea lateral. ....	31
Figura 7. Módulo de membranas cerámicas con instrumentación. ....	32
Figura 8. Piloto de ultrafiltración con un módulo de membranas cerámicas. ....	33
Figura 9. Permeabilidad al agua destilada para las membranas cerámicas de 15 y 100 nm. ....	34
Figura 10. Cambio de flux de permeado en función de la presión transmembrana usando membranas cerámicas y una solución agua-leche a 10 g/L. ....	35
Figura 11. Influencia del cambio de temperatura del flujo de alimentación sobre el flux de permeado usando membranas cerámicas, una solución agua-leche de 10 g/L y presión transmembrana de 1 bar. ....	37
Figura 12. Efecto del cambio en la concentración del flujo de alimentación sobre el flux de permeado usando membranas cerámicas a presión transmembrana de 1 bar con una solución inicial agua-leche de 10 g/L. ....	38

Figura 13. Resistencia por ensuciamiento de las membranas cerámicas para la prueba de concentración usando una solución inicial agua-leche de 10 g/L y presión transmembrana de 1 bar. .... 39

**Lista de Apéndices**

**Ver apéndices adjuntos y pueden ser consultados en la base de datos de la Biblioteca  
UIS.**

Apéndice A. Manual de prácticas de filtración de alimentos.

## Resumen

**Título:** Implementación de un módulo para membranas cerámicas tubular monocanal en el equipo de ultrafiltración del Laboratorio de procesos de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander\*\*.

**Autor:** Claudia Lorena Barrera Angarita, Javier Enrique Rodríguez Montes††.

**Palabras Clave:** ultrafiltración, membrana polimérica, membrana cerámica, resistencia de la membrana, resistencia por ensuciamiento, permeado.

### Descripción:

En el Laboratorio de Procesos de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander se cuenta con un piloto de Ultrafiltración de Alimentos usado en la asignatura de Laboratorio de Procesos II. Este equipo opera usando un módulo de membranas poliméricas, el cual presentaba limitaciones como: susceptibilidad a fugas a presiones altas, incapacidad de trabajar a temperaturas superiores a 45°C debido a su material y rupturas frecuentes de membranas. Para eliminar dichas limitaciones se propuso implementar un nuevo módulo de membranas cerámicas tubulares que permitan el análisis de nuevas variables como temperatura y umbral de corte. Inicialmente se realizaron pruebas diagnósticas con el módulo de membrana polimérica, con el fin de analizar las variables influyentes en la operación de filtración (permeabilidad al agua, presión transmembrana, temperatura y concentración del retenido) y su efecto sobre el volumen de flujo de permeado obtenido. Se observa que lo que se recolecta durante la práctica es muy poco (8 mL /min) lo que dificulta la toma de muestras y pone en duda la efectividad de la operación.

Con el fin de aumentar los rangos de las variables de operación a evaluar y obtener un mayor volumen de permeado se diseñó un nuevo módulo para membranas cerámicas en acero inoxidable que contiene tres membranas en su interior y un sistema de calentamiento. Se puso a prueba con las prácticas realizadas anteriormente obteniendo una cantidad de flujo de permeado mayor (150 mL /min) y una remoción de sólidos no solubles mayor al 99% evidenciado en su turbidez.

Con las nuevas especificaciones del equipo se creó un manual de operaciones en donde se describen los procedimientos para el correcto uso del piloto además del protocolo limpieza, siendo la guía para desarrollar futuras prácticas.

---

\*\* Trabajo de grado.

†† Facultad d Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Carlos Omar Parra Escudero, Ingeniero Químico, MSc. Co-director Carlos Jesús Muvdi Nova, Ingeniero Químico, PhD.

### Abstract

**Title:** Implementation of a module for tubular monochannel ceramic membranes in the ultrafiltration pilot of Laboratory of process in the Chemical Engineering School of Universidad Industrial de Santander<sup>‡‡</sup>.

**Author:** Claudia Lorena Barrera Angarita, Javier Enrique Rodríguez Montes<sup>§§</sup>

**Key Words:** Ultrafiltration, polymeric membrane, ceramic membrane, resistance to membrane, resistance to fouling, permeate.

### Description:

In the Laboratory of process in the Chemical Engineering School of Universidad Industrial de Santander have a pilot of ultrafiltration for food used in the subject Laboratorio de Procesos II. This pilot works with a module of polymeric membranes, which presented the following limitations: the module is sensitive to leaks operating in high pressures, material weakness operating in temperatures greater than 45°C and frequent membrane ruptures. To solve this limitations we propose install a new module for tubular ceramic membranes to allow the analysis of new variables like temperature and cut-off threshold.

First, diagnostic tests were realized with the module of polymeric membranes, with the propose of analyze the meaningful variables in the operation (water permeability, transmembrane pressure, temperature and concentration of retentate) and their effect on the permeate flux. The permeate flux obtained in a test is low (8 mL/min) getting hard the sampling and put on doubt the yield of the operation.

A new module for ceramic membranes was made to increase the variables operation range and getting more permeate flux, the module was designed in stainless Steel for three ceramic membranes, a warming system was made too. The new module was tested with the same variables previously analyzed, the permeate flux was mayor (150mL/min) and the remotion of no-soluble solids was greater than 99% evidenced in its haze.

A new operative manual was created with the new specifications of the pilot and a new protocol of cleanliness, being the guide to develop future test.

---

<sup>‡‡</sup> Degree work

<sup>§§</sup> Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Advisor Carlos Omar Parra Escudero, Chemical Engineer, MSc. Co-advisor Carlos Jesús Muvdi Nova, Chemical Engineer, PhD

## Introducción

El Laboratorio de Procesos de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander (UIS) cuenta con un piloto usado para la filtración de alimentos, siendo esta una operación unitaria de separación que busca reducir la concentración de sólidos suspendidos o separar emulsiones de un fluido que pueden contener desde macromoléculas hasta sólidos granulares. En la práctica de laboratorio se trata leche en polvo (descremada) disuelta en agua y se mide la concentración de sólidos disueltos en °Brix (g Azúcar/100 g Solución) del permeado sin tener en cuenta los lípidos y proteínas que la componen, como tampoco la turbidez como parámetros de seguimiento.

Para llevar a cabo la operación de filtración se usa un medio sólido poroso o membrana que actúa como barrera, caracterizada por un umbral de corte, el cual informa sobre la retención de las partículas de mayor tamaño a este (Ayala et al., 2006; Hernández et al., 1999). La membrana debe estar sometida a una fuerza impulsora (diferencia de presión) que permita el paso de un flujo a través de ella llamado permeado, el fluido que no atraviesa la membrana lleva una mayor concentración de sólidos que la inicial es llamado retenido (Benito et al., 2004). Debido al continuo uso de la membrana se llega a un punto en el que sus poros se saturan impidiendo la filtración efectiva del fluido, este fenómeno se conoce como colmatación (Vargas, 2004).

El tipo de membranas usadas en el equipo (planas poliméricas) generan restricciones de operación, puesto que estas no permiten trabajar con presiones superiores a 3 bar y temperaturas superiores a 45°C, aumentando la probabilidad de ruptura. Además, el equipo no cuenta con un

sistema de calentamiento que permita modificar la temperatura, pudiendo disminuir la viscosidad de la sustancia a tratar, facilitando su fluidez a través de la membrana.

Debido a estas limitaciones, los resultados obtenidos no reflejan un cambio en el fluido antes y después de la operación en la medición de sólidos disueltos, lo que dificulta el acoplamiento entre la teoría y la práctica. También se contempla el alto costo de las membranas poliméricas (13'000.000 COP por 20 membranas) (Pignat, s/f) y su poca vida útil de máximo 3 prácticas. El permeado obtenido de este proceso es solo el 1% del volumen inicial (10 L) durante todo el desarrollo de la práctica (2,5 h), sin tener en cuenta el tiempo necesario para la estabilización y posterior limpieza del sistema.

El principal objetivo al realizar esta práctica es dar a conocer a los estudiantes la operación de filtración aplicada en la industria. Este proyecto se enfoca en la adecuación del piloto de filtración a un nuevo tipo de membranas, con el fin de obtener mayores volúmenes de filtrado y un mejor seguimiento de los sólidos disueltos en el permeado durante el tiempo de desarrollo de la práctica. Las membranas seleccionadas son cerámicas tubulares (Férez, 2004), las cuales presentan algunas ventajas si se comparan con las membranas planas poliméricas, entre ellas: una selectividad elevada; bajo costo de mantenimiento; alta resistencia a ácidos, bases y a la temperatura (500°C); mayores valores de presiones de trabajo (20 bar) y resistencia al ensuciamiento y ataque microbiano (Nieto López, 2015).

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Implementar un módulo de membrana cerámica tubular mono canal al equipo de ultrafiltración, que permita ampliar las condiciones de operación y el número de variables a analizar en el Laboratorio de Filtración con membranas de la asignatura de Laboratorio de Procesos II.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Realizar un diagnóstico técnico sobre el funcionamiento y las variables de operación del piloto usando el módulo de membranas poliméricas.

Diseñar el módulo de membranas cerámicas tubulares mono canal teniendo en cuenta criterios técnicos y de operación en aplicaciones académicas, adaptando la estructura del piloto al nuevo módulo.

Construir un manual de operación y prácticas del piloto de ultrafiltración con los nuevos módulos de membranas cerámicas del laboratorio de procesos.

## 2. Cuerpo del Trabajo

### 2.1 Marco Referencial

Para el desarrollo del proyecto es necesario conocer las bases teóricas que rigen la operación de filtración, como lo son:

#### 2.1.1 Membranas.

La membrana es la barrera física que permite la filtración, en función de su umbral de corte, los procesos de filtración con membranas se categorizan en microfiltración (0,1-10  $\mu\text{m}$ ) y ultrafiltración (0,001-0,1  $\mu\text{m}$ ) (Guizard, 1999). Constan de dos partes: área activa o selectiva, la cual es la que está en contacto con el fluido y separa las sustancias por diferencia de tamaño; y un soporte que da estabilidad y forma el área activa. Estas se hacen de diferentes materiales y configuraciones en función de las sustancias a filtrar, rangos de operación de temperatura, presión y concentración (Benito et al., 2004; Meabe & Sempere, 2013; Palacio Martínez, 1998).

##### 2.1.1.1 Materiales. Entre los más comunes son las membranas orgánicas y cerámicas:

Las membranas orgánicas son elaboradas a partir de polímeros de celulosa o su combinación con materiales sintéticos, son ampliamente usadas en la industria ya que su costo es relativamente bajo y su rango de tamaño es bastante amplio, poseen capacidades hidrofílicas o hidrófobas. El mayor inconveniente de éstas es su bajo rango de operación de temperatura, presión y pH además de ser sensibles a ataques microbiológicos (Hernández et al., 1999).

Las membranas cerámicas son elaboradas a base de alúmina o carbono, principalmente se caracterizan por la capacidad de operar en rangos altos de presión, temperatura, pH, además de no tener inconvenientes con sustancias o ataques microbianos. Por

lo tanto, su implementación tiene un costo relativamente alto que es compensado con su durabilidad (Vargas, 2004).

Actualmente, existen variaciones en la composición, en donde se acoplan partes de las membranas siendo la parte activa orgánica y el soporte cerámico; teniendo así las mejores características de ambos materiales, mejorando así la operación de filtración.

**2.1.1.2 Configuraciones.** Para las diferentes aplicaciones industriales, las membranas se disponen en módulos los cuales les dan diferentes configuraciones (Férez, 2004):

- Plana: las membranas se fabrican en láminas las cuales pueden ser dispuestas individualmente o empaquetadas en cartuchos. Entre sus ventajas están su fácil limpieza y mantenimiento, su desventaja es que no pueden operar a presiones muy altas.
- Tubular: membranas en disposición cilíndrica en donde la capa selectiva se encuentra generalmente en el diámetro interno. Permite trabajar a altas presiones con bajo consumo energético, además de trabajar sustancias con una alta carga de sólidos.
- Fibra hueca: membranas que poseen microtubos porosos con pequeños canales, posee un área activa mayor en comparación con las anteriores y permite separaciones bastante efectivas, pero a un costo energético más alto, además de complicaciones en su limpieza.

### **2.1.2 Turbidez**

La turbidez es el nivel de transparencia que tiene un líquido cuando pasa luz a través del mismo, un alto nivel de turbidez refleja una alta concentración de partículas suspendidas en el fluido, tales como lípidos, algas, colorantes, microorganismos, sólidos y demás sustancias en emulsión o floculadas. La turbidez se mide en NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez) las cuales, en función de la(s) sustancia(s), representa un valor de concentración (Rodríguez & Galvin, 1999).

### **2.1.3 Modelo matemático**

Al operar un sistema de filtración con membranas, se debe tener en cuenta los mecanismos de retención de moléculas por la membrana, dichos mecanismos se dividen en 2: por transporte (que dependen de la difusión y de fuerzas hidrodinámicas); e interacciones químicas (que dependen de fuerzas de atracción moleculares) (Vargas, 2004).

Ambos mecanismos pueden presentarse simultáneamente en la operación, al reconocer cual predomina en la relación membrana-fluido a filtrar, es posible identificar los fenómenos de ensuciamiento de membranas, los cuales reducen la cantidad de flux de permeado obtenido denominándose resistencias.

Las resistencias que se presentan durante la operación son: por la membrana, por capa de torta, polarización por concentración, por gel, por bloqueo de poro y por adsorción. La resistencia de la membrana ( $R_m$ ) es un valor constante independientemente de las sustancias a filtrar y se determina mediante una prueba con agua destilada (Hernández Navarro, 2015).

Las resistencias generadas por el mecanismo de transporte son: capa de torta ( $R_c$ ) formada cerca del área activa de la membrana sin depositarse en ella, al incrementar la concentración de la torta hasta alcanzar la solubilidad máxima se genera la polarización por concentración ( $R_p$ ) y al exceder la solubilidad se depositan partículas en la superficie de la membrana creando la resistencia por gel ( $R_g$ ) (García, 2009).

Las resistencias generadas por el mecanismo químico son: por bloqueo de poro ( $R_b$ ) y por adsorción ( $R_{ad}$ ) estas se presentan por la atracción entre las moléculas de la membrana y las de la sustancia retenida en diferentes ubicaciones (en la superficie o en el interior respectivamente).

Debido a la dificultad para medir la influencia de cada una de estas resistencias, se compilan en una única resistencia denominada resistencia por ensuciamiento ( $R_f$ ). El término de

resistencia total ( $R_T$ ) asocia todos los factores que reducen el flujo de permeado, se determina usando el modelo de resistencias en serie (Romero González, 2010):

$$R_T = R_m + R_f \quad (1)$$

donde:

$R_m$ : Resistencia de la membrana nueva o limpia.

$R_f$ : Resistencia por ensuciamiento.

El modelo matemático que permite predecir la cantidad de flux de permeado obtenido en función del modelo de resistencias en serie, desde una perspectiva macroscópica, es la ley de Darcy (Hernández Navarro, 2015):

$$J = \frac{\Delta PTM}{\mu * R_T} \quad (2)$$

donde:

J: Flux de permeado [ $m^3$ (volumen permeado) / $m^2$ (área superficial membrana) \*s]

$\Delta PTM$ : Presión transmembrana [Pa]

$\mu$ : Viscosidad del fluido [Pa\*s]

$R_T$ : Resistencia hidrodinámica total [1/m]

Aunque existen modelos matemáticos más robustos a la hora de predecir el comportamiento de un módulo de filtración como lo es el modelo de Teoría de la Película (Ortiz Jerez et al., 2008), ya que se requieren más pruebas para obtener los datos necesarios para ajustar este modelo, usamos el modelo de la ley de Darcy.

La presión transmembrana se ve afectada por la caída de presión del fluido, cuando interactúa con la membrana, lo que se puede determinar con la siguiente ecuación.

$$\Delta_{PTM} = \frac{P_i + P_s}{2} - P_p \quad (3)$$

donde:

$\Delta_{PTM}$ : Presión transmembrana [Pa]

$P_i$ : Presión de entrada del fluido [Pa]

$P_s$ : Presión de salida del fluido [Pa]

$P_p$ : Presión del permeado [Pa]

#### ***2.1.4 Descripción del Piloto***

En la Figura 1 se encuentra el equipo piloto de filtración académico usado para tratar una solución de agua-leche en polvo para la asignatura de Laboratorio de Procesos II ubicado en la escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander, el cual cuenta con las siguientes partes:

*Figura 1.*

*Piloto de ultrafiltración con módulo de membranas poliméricas.*



*Nota 1. Se presentan las partes del piloto de ultrafiltración*

1. Tanques de alimentación: con un volumen de 60, 40 y 20 L, respectivamente.
2. Válvulas: se encuentran dispuestas en el descargue de los tanques, alimentación del agua, apertura de la recirculación, todas identificadas de color azul para manipulación del sistema, y rojo para entradas o salidas de fluido del sistema.
3. Medidor de caudal: actúa con acción de una válvula que controla y restringe el paso de fluido a la membrana.
4. Manómetro: usado para medir la presión a la entrada y a la salida de la membrana.
5. Bomba centrífuga: usada para elevar la presión de fluido, se puede regular su potencia variando la frecuencia con el uso de su panel de control.

6. Módulo de membranas: estructura que contienen las membranas, cada módulo consta de las siguientes partes:

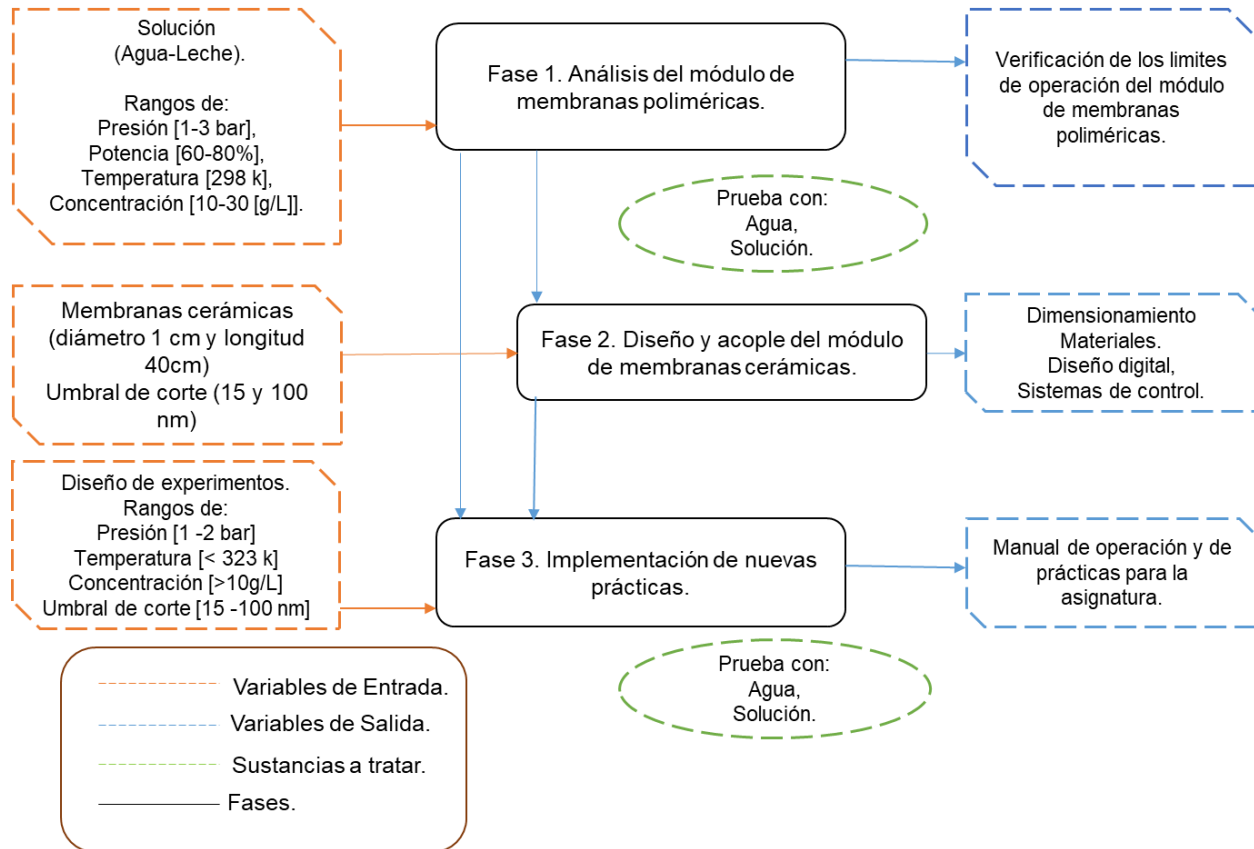
- Soporte: cuerpo del módulo el cual contiene las membranas, así como un arreglo que permite el contacto con el fluido.
- Membrana: medio filtrante, en el cual, mediante exclusión por tamaño, se retienen los sólidos presentes en la corriente de alimentación. Se cuenta con un sistema diseñado para el acoplamiento de dos membranas planas poliméricas (Ortiz Jerez et al., 2008).

## **2.2 Método**

Con el uso del equipo descrito en la Figura 1, el proyecto se desarrolló en tres fases: diagnóstico del piloto de ultrafiltración con un análisis de las variables relevantes en el proceso, diseño de un nuevo módulo para membranas cerámicas, e implementación de una nueva práctica en función de los cambios realizados. Estas fases se ven resumidas en la Figura 2.

Figura 2.

Cuadro metodológico.



Nota 2. Las fases necesarias para la realización del proyecto con las variables analizadas y los resultados obtenidos de cada una de ellas.

### 2.2.1 Fase 1. Análisis del módulo de membranas planas poliméricas.

Se realizaron pruebas de presión, temperatura y concentración de la solución, con el fin de determinar cómo manipular dichas variables en el equipo, conociendo así su correcto funcionamiento y uso de los diferentes componentes del piloto. Las pruebas se desarrollaron siguiendo las recomendaciones del personal del Laboratorio de Procesos, usando leche en polvo disuelta en agua como solución de alimentación y recolectando el permeado con dos probetas de 50 mL. Para esto se realizaron las siguientes pruebas:

- Permeabilidad al agua: se determinó el comportamiento de la membrana, su capacidad de ensuciamiento y el flujo de permeado (Gonz et al., 2017; Hernández Navarro, 2015). Se usó agua destilada y se le hizo seguimiento a la permeabilidad, ajustando la presión de entrada al módulo en 1; 1.5; 2 y 3 bar, tomando cada 10 min el volumen de permeado y cambiando cada 30 min la presión.
- Concentración: se realizaron pruebas con diversas soluciones preparadas con leche en polvo, midiendo el volumen de permeado, con las concentraciones de 10, 20 y 30 g/L para 10 L de solución, fijando una presión a 1 bar para las pruebas. Se desmontaron las membranas del módulo para su limpieza usando agua destilada, donde se retiran los sólidos retenidos en ellas antes de aumentar la concentración de la solución (Zulewska et al., 2009). Se dejó estabilizar el sistema en cada ensayo durante 20 min antes de tomar las muestras.
- Presión: se registró el volumen de permeado obtenido en función del aumento de presión, se operó a 1; 1.5; 2 y 3 bar. Se realizaron las pruebas con una solución de 20 g/L en un volumen de 10 L de agua, tomando cada 10 min el volumen de permeado y cambiando cada 30 min la presión transmembrana.

### ***2.2.2 Fase 2. Diseño y acople del módulo de membranas cerámicas.***

Con base en los resultados de la Fase 1, se realizó el diseño teórico, para la implementación y acople del nuevo módulo al equipo actual, incluyendo diámetro, longitud y umbral de corte de la membrana en función de las sustancias a tratar (Cifuentes et al., 2017). Para la limpieza, el arreglo del nuevo módulo permitirá realizar lavado por rebose eliminando restos de permeado y solución de limpieza cuyas partículas y pH puedan afectar posteriores mediciones y generen daños en el piloto y en las membranas (Hernández Navarro, 2015; Kaseno & Kokugan, 1997).

Se efectuó el diseño de dos formas, la primera se realizó en papel, tomando las vistas superior y lateral como puntos de guía para optimizar las dimensiones adecuadas del módulo. Luego de tener el concepto definido, se digitalizó el diseño usando el Software SolidWorks 2019; requerido por el proveedor seleccionado para la elaboración de las piezas. Es necesario mencionar que los recursos para la elaboración de las piezas fueron asegurados con recursos de la Escuela de Ingeniería Química.

Por la longitud en la que se adquieren las membranas del mercado, fue necesario realizar el corte y lijado en sus extremos, las características que presentan las membranas son: Longitud de 1m, umbral de corte de 15 y 100 nm, diámetro externo de 1cm y diámetro interno de 0,7 cm (ZIBO DONGQIANG CERAMIC FILTER CO., s/f).

### ***2.2.3 Fase 3. Implementación de nuevas prácticas.***

Con el nuevo módulo ensamblado al equipo, se realizaron pruebas de permeabilidad, presión, concentración y temperatura, en donde se verificó la correcta instalación y las posibles prácticas que se puedan implementar, evaluando si los efectos de las variables seleccionadas influyen la cantidad de flujo de permeado obtenido.

Con el fin de determinar la eficiencia de la operación para clarificar bebidas es necesario medirse en unidades que reflejen este cambio, los °Brix denotan un cambio en la concentración de sólidos disueltos, su reducción no es significativa ya que el umbral de corte de las membranas usadas no retiene carbohidratos, para la clarificación de la leche es necesario reducir su contenido de grasas y proteínas, sustancias no solubles que los °Brix no cuantifican, por lo tanto, se opta por medir la turbidez (Rodríguez & Galvin, 1999).

Se realizó un manual operativo para el nuevo sistema, en el cual se incluirán los modelos de prácticas que se puedan llegar a realizar, protocolos de uso y limpieza, y una guía de toma de datos para los estudiantes.

## **2.3 Resultados y discusión**

Los resultados se presentan de acuerdo con la fase en que fueron obtenidos.

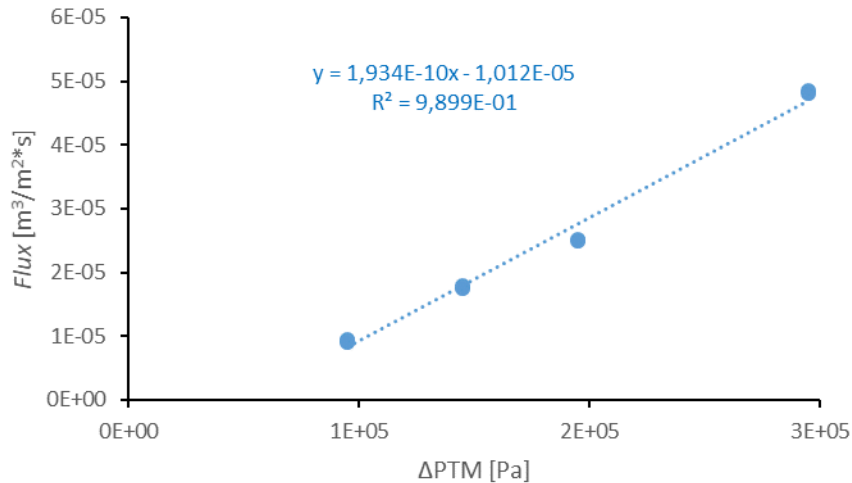
### ***2.3.1 Fase 1: Análisis del módulo de membranas planas poliméricas.***

Durante la ejecución de las pruebas diagnósticas, se analizó la permeabilidad al agua de la membrana plana polimérica, además, del efecto de la presión transmembrana, concentración y potencia de la bomba, sobre la cantidad de flujo de permeado obtenido al filtrar la solución agua-leche.

Se pudo determinar la permeabilidad al agua de la membrana polimérica utilizada, el resultado obtenido es el valor máximo de flujo de permeado posible usando estas membranas bajo condiciones de presión y viscosidad específicas (Gonz et al., 2017).

Figura 3.

Permeabilidad del agua destilada de la membrana polimérica.



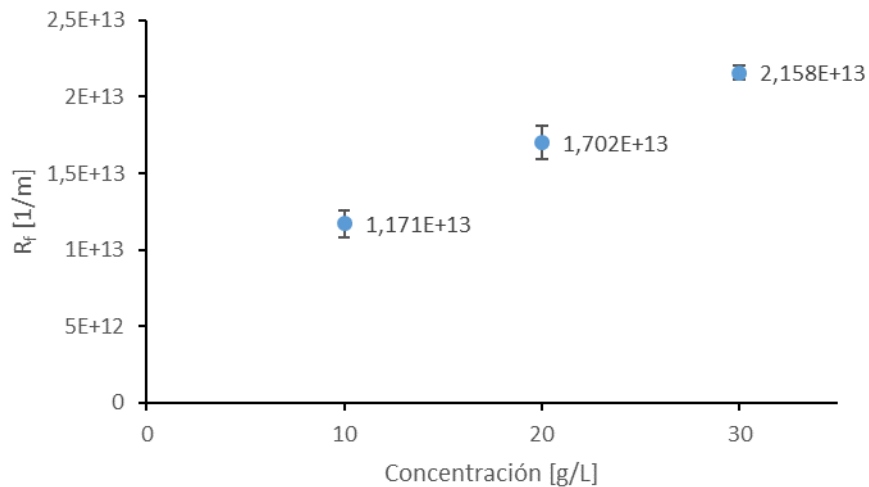
Nota 3. En la figura se observa la relación del flux de permeado con respecto al cambio de presión transmembrana hallado con la Ecuación 3.

Se toma la pendiente de la gráfica anterior, ajustándose el valor a la ley de Darcy usando la Ecuación 2, determinándose la resistencia de la membrana usando la viscosidad del agua a una temperatura de 26°C, obteniendo el siguiente resultado:  $R_m = 6,869 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1}$ .

Usando la Ecuación 1 y la resistencia de la membrana calculada se pudo determinar la evolución de la resistencia por ensuciamiento al operar con la solución agua-leche.

*Figura 4.*

*Evolución de la resistencia por ensuciamiento de la membrana polimérica con respecto al aumento de la concentración alimentada.*



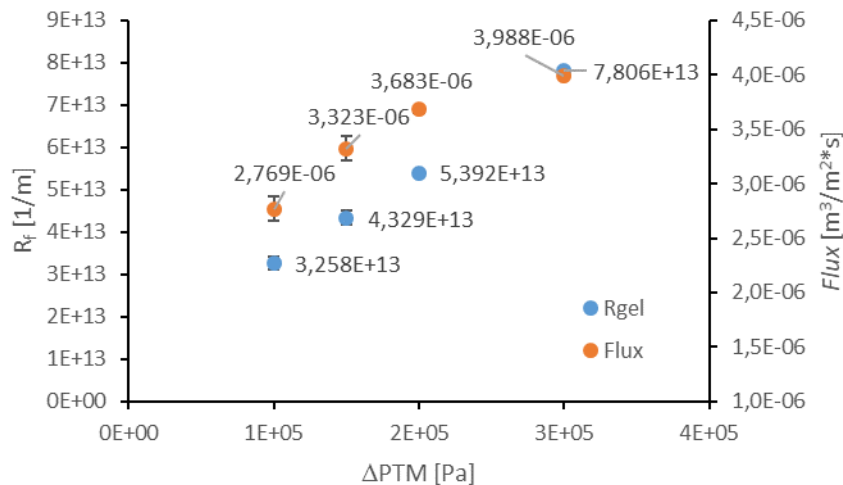
*Nota 4. Se observa la tendencia entre el aumento de la concentración de la alimentación con el cambio de la resistencia por ensuciamiento.*

Al aumentar la concentración de alimentación al sistema, la resistencia generada por la suciedad aumenta, en consecuencia, el flujo permeado disminuye puesto que al ser un flujo tangencial el concentrado se acumula en la superficie (Martín et al., 2011).

Otra variable influyente en la operación de filtración es la presión transmembrana. En la Figura 5, se observa la relación entre el cambio en  $\Delta$ P<sub>TM</sub> con la resistencia por ensuciamiento junto con el flux de permeado tratando una solución agua-leche con concentración de 20 g/L.

Figura 5.

Efecto de la presión sobre la resistencia por ensuciamiento y el flux de permeado en la membrana polimérica.



Nota 5. se observa la relación entre el cambio de  $\Delta PTM$  con la resistencia por ensuciamiento junto con el flux de permeado tratando una solución agua-leche con concentración de 20 g/L

Con un aumento en la presión transmembrana, se genera un aumento en el flux de permeado, debido a que mayor cantidad de solución es forzada a entrar en contacto con la membrana, así mismo, una mayor cantidad de sólidos es retenida lo que aumenta la resistencia por ensuciamiento (Ayala et al., 2006; Benito et al., 2004; Jesús & Domínguez, 2014).

Con base en los resultados obtenidos de las anteriores pruebas, se encuentran las limitaciones de operación que se deben tener en cuenta para el diseño del módulo de membranas cerámicas. El módulo actual fue diseñado para usar membranas planas poliméricas, para usar un nuevo tipo de membrana es necesario diseñar un nuevo módulo que opere en el rango de operación evaluado anteriormente (presión, temperatura, concentración, potencia). Estos datos se

determinan en función de las condiciones presentes en el manual del equipo, incluyendo las propiedades de los materiales y la experiencia de los técnicos y operadores del equipo, con el fin de no comprometer la integridad del piloto, membranas y la operación. En la Tabla 1 se resume las variables, rangos y limitaciones de operación.

*Tabla 1.*

*Limitaciones del equipo.*

<b>Variable</b>	<b>Rango de Operación</b>	<b>Limitación</b>
<b>Temperatura</b>	(26-60) °C	Fluido de enfriamiento Operación de la bomba
<b>Presión</b>	(0-3) bar	Módulo de membranas
<b>Flujo</b>	(0-1000) L/h	Bomba Membrana
<b>Concentración (Leche)</b>	(0-30) g/L	Membrana
<b>Sustancias</b>	Leche en polvo	Membrana

*Nota. Resumen de las limitaciones operacionales del piloto con el módulo de membranas poliméricas.*

El equipo cuenta con un intercambiador de calor en donde el fluido de enfriamiento es agua de la línea de acueducto de la ciudad, la cual está a temperatura ambiente 26°C, si se desea bajar aún más la temperatura de la solución a tratar se debe considerar otro sistema de enfriamiento. En cuanto al aumento de temperatura, el equipo no cuenta con un sistema para calentar el fluido, si se desea hacer se debe precalentar antes de ingresar al sistema, el intercambiador de calor cuenta con un termopar que permite hacer seguimiento de la temperatura del sistema.

El módulo de membranas planas poliméricas requiere de su apertura para la limpieza del equipo luego de cada práctica, por lo tanto, su cierre no siempre se hace de la forma adecuada, dejando espacios por los cuales, al aumentar la presión se generan fugas. Los técnicos y operadores del equipo limitan la presión de entrada a 3 bar para proteger los empaques internos del módulo.

Las membranas planas poliméricas usadas en el equipo tienen un umbral de corte de 0,05 micrómetros ( $\mu\text{m}$ ) lo que posibilita la retención de proteínas (caseína) (Carmen Gсталver, 2015; Zulewska et al., 2009). Al ser un material filtrante, este tiende a colmatarse por el sólido retenido, para evitar que se sature los técnicos y operadores del equipo recomiendan no usar una concentración superior a 30 g/L. El piloto de ultrafiltración se puede usar para filtrar otro tipo de soluciones, pero como prácticas académicas no se ha realizado.

Además de la leche, las sustancias mayormente tratadas en la industria alimentaria son los jugos de frutas, los umbrales de corte para clarificar estas bebidas son 0,1 y 0,3  $\mu\text{m}$ , la mayoría tratados a temperatura ambiente y presiones entre 0,93 y 7 bar.

Las condiciones de pH y la cantidad de sólidos disueltos se mantienen iguales después del tratamiento, mostrando que la microfiltración es un método confiable para la clarificación y concentración de bebidas, aunque las condiciones de operación varían dependiendo de la interacción entre la solución y la membrana. El tratamiento de este tipo de sustancias es relativamente rápido, ya que como en el caso del jugo de naranja son necesarios 30 min de tratamiento (Nandi et al., 2012).

Tabla 2.

*Bebidas tratadas con membranas cerámicas y condiciones de operación.*

Sustancia	Umbral de corte (µm)	Presión transmembrana (bar)	Volumen filtrado (L)	Tiempo de operación (min)	Concentración de sólidos solubles (g/L)	Referencia
Jugo de naranja	0,288	1,38	0,3	30	118	(Nandi et al., 2012)
Jugo de sandía	0,2	(1,36- 1,04- 2,76)	5	-	74	(Chhaya et al., 2008)
Jugo de granada	0,22- 0,285	4,14	0,3	120	171	(Mirsaeedghazi et al., 2012)
Cerveza	0,5	(0,4- 0,8- 1,2)	56	60	115	(Varga et al., 2019)
Extracto de Stevia	(0,05- 0,1- 0,2)	(2- 4- 6)	-	150	40	(Reis et al., 2009)
Jugo de guanábana	20	1,02	0,2	30	70	(Yusof & Ibrahim, 1994)

*Nota. Bebidas clarificadas usando membranas cerámicas operando a condiciones que se pueden replicar en el Laboratorio de procesos.*

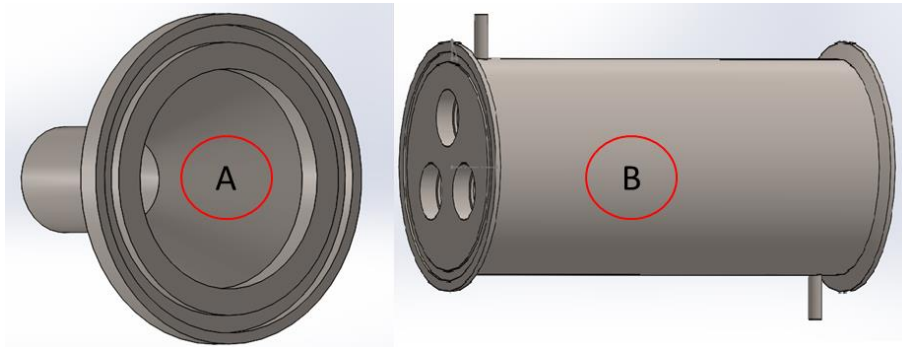
Con base en las bebidas analizadas en la Tabla 2 y teniendo en cuenta el fin pedagógico del proyecto, se presentan opciones para clarificar zumos y concentrados comerciales ya sean en polvo o preparados. Se debe tener en cuenta si en su composición presentan espesantes como goma de xantana que puedan causar colmatación irreversible de las membranas, debido a que estas sustancias aumentan la viscosidad generando una película que recubre el área selectiva de la membrana.

### **2.3.2 Fase 2. Diseño y acople del módulo de membranas cerámicas.**

Con base en sistemas previamente diseñados que ocupan membranas cerámicas tubulares, se opta por diseñar un módulo de membranas con orientación horizontal.

Figura 6.

Diseño de las boquillas y el cuerpo del módulo de membranas cerámicas en vista aérea lateral



Nota 6. Se muestran las partes del módulo; boquilla de entrada o salida y el cuerpo del módulo.

- Boquillas: Como se observa en la Figura 6 A, las boquillas tienen forma de cono truncado con diámetros de 2 y 5 pulgadas, respectivamente, el extremo de 2 pulgadas va conectado a los manómetros del equipo y en el extremo de 5 pulgadas se deja una hendidura para ubicar un empaque que garantice un cierre hermético de todo el sistema.

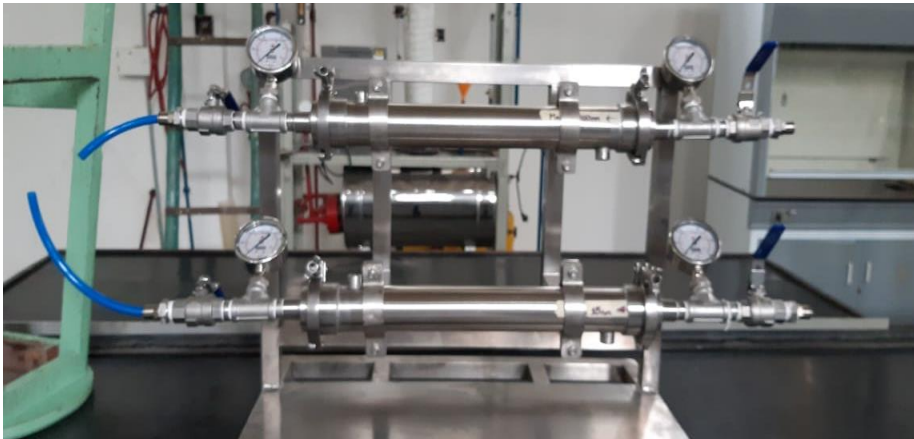
- Cuerpo: Este cuenta con la misma hendidura de la boquilla para el empaque, además en esta área se usa un agarre tipo “clap” que mantiene las boquillas y el cuerpo unidos. En la Figura 6 B, se observa el extremo del cuerpo cuenta con tres espacios para soportar las membranas cerámicas de diámetro de 1 cm y una longitud de 40 cm, cada espacio cuenta con un tornillo que sujeta y fija la membrana dejando un orificio para el paso del fluido.

En el cuerpo se dispone del espacio para recolectar el permeado obtenido de la operación, el cual es recuperado por una válvula de ½ pulgada situada cerca de la boquilla de salida, también cuenta con otra válvula cerca de la boquilla de entrada para realizar mantenimiento.

Los módulos elaborados junto con la instrumentación adecuada para el acople al equipo de ultrafiltración se observan a continuación.

*Figura 7.*

*Módulo de membranas cerámicas con instrumentación.*



*Nota 7. El módulo de membranas cerámicas con cuatro manómetros y válvulas para el seguimiento independiente de ellos.*

A cada módulo se le instalaron manómetros a la entrada y salida del fluido; con el fin de registrar la caída de presión de cada sistema membranario, de la misma manera se ubican las válvulas, para aislar los módulos permitiendo su uso individual. Para evitar el daño en las membranas por sales y minerales que puedan estar presentes en el agua potable (utilizada durante la limpieza y previo al lavado con solución de NaOH) generando colmatación irreversible, se hizo necesario instalar una derivación, para permitir el paso del fluido sin la intervención de las membranas, lo que es idóneo para la limpieza del equipo. Los cambios antes mencionados se muestran en la Figura 8.

*Figura 8.*

*Piloto de ultrafiltración con un módulo de membranas cerámicas.*



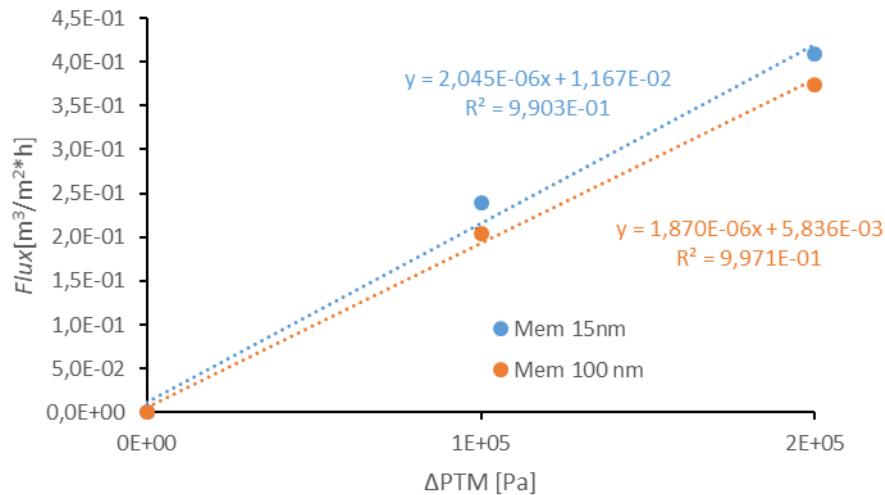
*Nota 8. Se instala al piloto los módulos de membranas cerámicas previamente diseñados con la inclusión de las derivaciones.*

### ***2.3.3 Fase 3. Implementación de nuevas prácticas.***

Para asegurar la funcionalidad del sistema y garantizar su uso para prácticas pedagógicas, se realizaron pruebas utilizando agua destilada.

Figura 9.

Permeabilidad al agua destilada para las membranas cerámicas de 15 y 100 nm.



Nota 9. Se aprecia la permeabilidad al agua en función de la presión transmembrana para la membrana de 15 nm (Mem 15nm) y la membrana de 100 nm (Mem 100nm).

Haciendo uso de la Ecuación 3, ajustando el valor de la pendiente a la ley de Darcy, se determinó la resistencia para cada umbral de corte de las membranas, obteniendo como resultado:  $R_{m15}=1,976 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1}$  y  $R_{m100}=2,162 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1}$ .

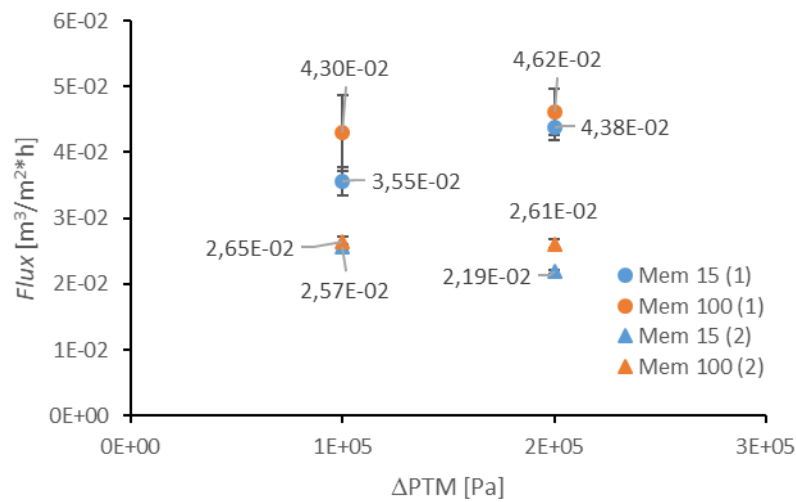
En comparación con los resultados obtenidos con la membrana polimérica, se observa que las membranas cerámicas permean mayor cantidad de agua, en un rango entre 4-5 veces mayor y una disminución de la resistencia de la membrana poco más de 3 veces, debido al cambio de umbral de corte, al material de las membranas y a la geometría del módulo membranario. Por el constante uso de las membranas esta permeabilidad va a cambiar con el tiempo (Zapata Montoya, 2006).

Otra de las variables evaluadas fue la presión transmembrana ( $\Delta\text{PTM}$ ). Se observa que no hay diferencia en el flux de permeado operando a presiones de 1 y 2 bar por lo que se asume que

se llegó al flujo límite de permeado, lo que significa que al aumenta la presión transmembrana la cantidad de permeado no varía (Hernández Navarro, 2015). Para la implementación de esta práctica se ajustaron los valores de presión transmembrana para observar de manera más evidente su efecto sobre el flux de permeado.

*Figura 10.*

*Cambio de flux de permeado en función de la presión transmembrana usando membranas cerámicas y una solución agua-leche a 10 g/L.*



*Nota 10. se observa la tendencia del flux de permeado al aumentar la presión transmembrana, se realizaron dos ensayos para cada membrana, mostrados en la Figura como 1 y 2.*

Igualmente, se midió la resistencia generada por el ensuciamiento al operar las membranas cerámicas, usando la ecuación 1 y el valor de la resistencia de la membrana previamente calculada en la prueba de permeabilidad. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3.

*Resistencia por ensuciamiento de las membranas cerámicas para la prueba de presión.*

Membrana	Prueba 1		Prueba 2	
	1 bar	2 bar	1 bar	2 bar
<b>15 nm</b>	9,39E+12	1,65E+13	1,37E+13	3,49E+13
<b>100 nm</b>	7,24E+12	1,535E+13	1,31E+13	2,88E+13

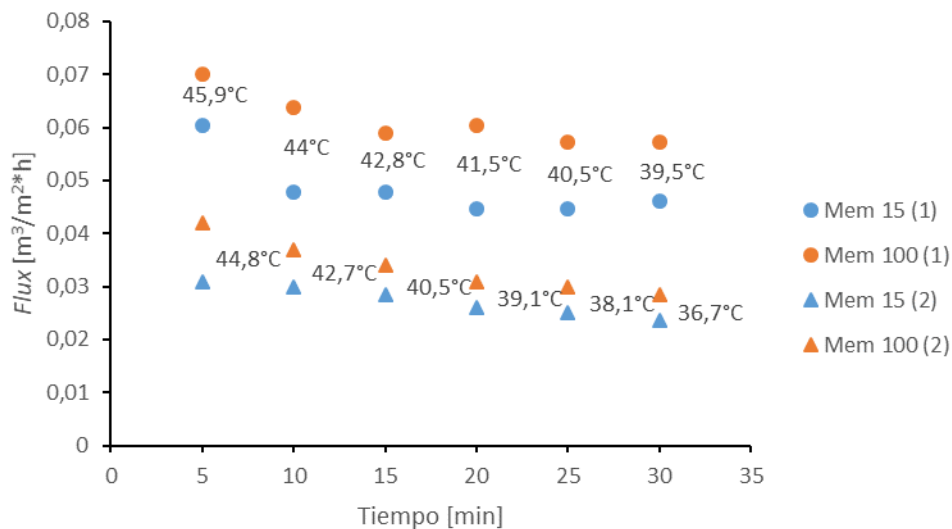
*Valores de la resistencia por ensuciamiento en función del incremento de la presión transmembrana usando la ecuación 1.*

Los valores obtenidos al operar el piloto con membranas poliméricas no se comparan con los obtenidos con las membranas cerámicas ya que tienen umbrales de corte diferente.

Otra variable incluida para las prácticas en el laboratorio es la temperatura. En la Figura 11, se observa la variación en el flux de permeado a medida que disminuye la temperatura de la solución agua-leche con concentración de 10 g/L en el tiempo.

Figura 11.

*Influencia del cambio de temperatura del flujo de alimentación sobre el flux de permeado usando membranas cerámicas, una solución agua-leche de 10 g/L y presión transmembrana de 1 bar.*



*Nota 11. Se observa que a medida que disminuye la temperatura disminuye el flux, debido al aumento de la viscosidad de la solución.*

Se precalentó la solución antes de ingresarse al piloto a 50°C, al transcurrir el tiempo de operación la solución disminuirá la temperatura aumentando la viscosidad del fluido impidiendo su paso a través de las membranas, también aumenta la viscosidad de la capa de torta generada cerca al área activa de la membrana por su mayor contenido de sólidos en comparación con la alimentación inicial (Hernández Navarro, 2015). En un tiempo de 30 min se puede apreciar un efecto notorio en la obtención del flux de permeado para ser analizado durante la práctica en el laboratorio. En la Tabla 4, se observa la influencia de la temperatura del flujo de alimentación sobre la resistencia por ensuciamiento.

Tabla 4.

*Resistencia por ensuciamiento de las membranas cerámicas para la prueba de temperatura.*

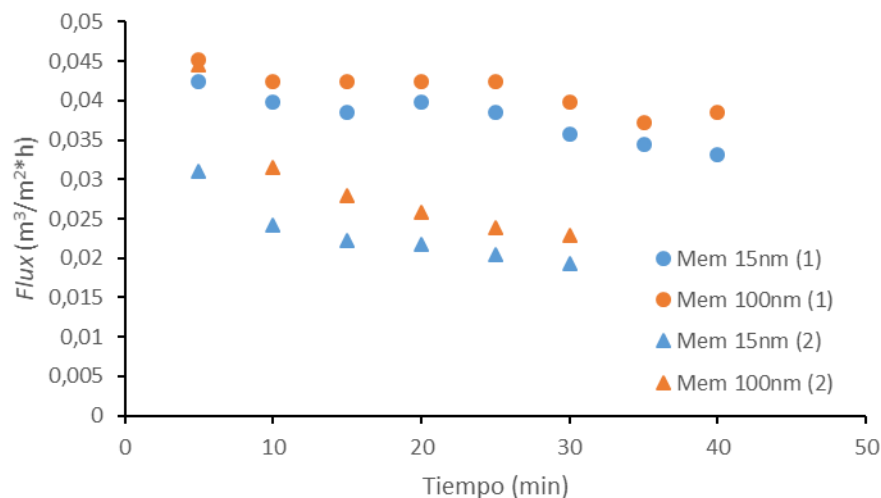
	Prueba 1		Prueba 2	
Membrana	Tmax = 45,9°C	Tmin = 39,5°C	Tmax = 44,8°C	Tmin = 36,7°C
15 nm	8,16E+12	9,85E+12	1,75E+13	2,00E+13
100 nm	6,60E+12	7,37E+12	1,22E+13	1,61E+13

*Se observa una mayor resistencia por ensuciamiento a una menor temperatura por aumento en la viscosidad de la solución y disminución en la solubilidad.*

También se evaluó el efecto del cambio de la concentración, para aumentarla en el tiempo se recolecto el flujo de permeado obtenido separándolo del flujo de alimentación.

Figura 12.

*Efecto del cambio en la concentración del flujo de alimentación sobre el flux de permeado usando membranas cerámicas a presión transmembrana de 1 bar con una solución inicial agua-leche de 10 g/L.*



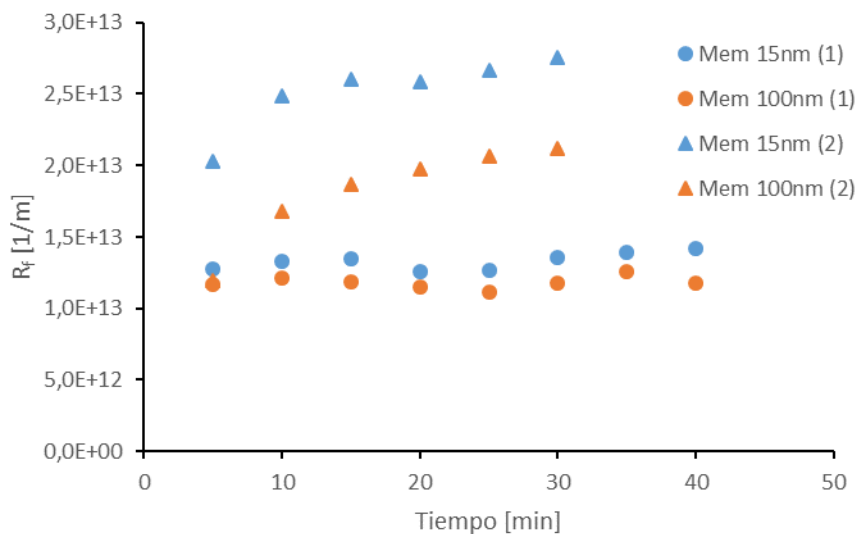
*Nota 12. Se observa el efecto del cambio de la concentración en el retenido sobre el flux de permeado en el tiempo.*

*Se observa una mejor tendencia para la prueba 2, disminuyendo el flux en el tiempo.*

De esta figura se observa como al aumentar el tiempo disminuye el flux de permeado. Al paso del tiempo la retención de solidos aumenta la concentración del flujo de retenido, lo que también aumenta la concentración de solidos disueltos en la capa de torta cerca a la membrana incrementado la tasa de ensuciamiento lo que conlleva a la reducción del flux de permeado (Jesús & Domínguez, 2014).

Figura 13.

*Resistencia por ensuciamiento de las membranas cerámicas para la prueba de concentración usando una solución inicial agua-leche de 10 g/L y presión transmembrana de 1 bar.*



*Nota 13. se puede apreciar la evolución de la resistencia por ensuciamiento durante el tiempo de operación al concentrar la solución retenida.*

Para cada muestra de permeado obtenido en todas las pruebas se midió su turbidez con el fin de evidenciar la efectividad de la clarificación de leche, teniendo en cuenta solo la retención de sólidos no disueltos (proteínas, grasas, vitaminas A y D y calcio) (Carmen Gastalver, 2015).

Tabla 5.

*Rangos de turbidez encontrados en el permeado para las membranas cerámicas utilizadas en las pruebas realizadas.*

Turbidez inicial [NTU]	Turbidez de Permeado por Prueba [NTU]					
	De presión		De temperatura		De concentración	
1902	1	2	1	2	1	2
Membrana 15 nm	447 - 162	32,2 - 5,47	108 - 49,8	23,5 - 11,55	324 - 227	50,9 - 24,8
100nm	37,3 - 6,5	13,7 - 1,9	13,6 - 9,89	9,43 - 4,72	185 - 20,3	17,4 - 10,1

*Se presentan los rangos de turbidez obtenidos durante la realización de las pruebas.*

Con los datos obtenidos en la Tabla 5, se calcula el porcentaje de retención, pasando de un mínimo rango de [97,4%-76,5%] para la membrana de 15nm y [99,7%-90,3%] para la membrana de 100nm durante las primeras pruebas; hasta un mejor rango de [99,7%-97,3%] y [99,9%-99,1%], respectivamente.

Para el uso de los módulos, se requiere la implementación de un nuevo protocolo de limpieza, en donde se usa una solución 1N de NaOH precalentada a 70°C en 12 litros de agua destilada, se ingresa al sistema en donde se adicionan 250 ml NaClO comercial al 5,25% en volumen (García, 2009). Después de la utilización de la solución de limpieza está se neutraliza con ácido cítrico para poder depositarla en el desagüe.

### **2.3.4 Construcción del Manual de Operación**

Con los análisis de los resultados obtenidos se redactó el Manual de operación y prácticas, se tuvo en cuenta los siguientes parámetros resultado de los ensayos realizados en los nuevos módulos:

- El nuevo protocolo de limpieza se ajustó, para mantener las propiedades físicas de las membranas evitando la colmatación, evidenciado en el porcentaje de retención de sólidos no disueltos, el cual es mayor al 99%.
- Todas las variables mostraron tener un efecto notorio sobre el flujo de permeado en los rangos definidos para cada una de ellas. Para la prueba de presión se ajustó su rango de operación para lograr una tendencia que facilite a los estudiantes la apreciación del fenómeno.
- Se logró la implementación de una práctica en donde la variable a estudiar sea el efecto de temperatura sobre el flux de permeado, para esto se construyó un sistema de control de temperatura; haciendo uso de una resistencia eléctrica, no fue posible la instalación dentro del piloto por lo que se recomienda la supervisión de un profesor o técnico para su uso.

Se anexa el manual de prácticas de ultrafiltración para el Laboratorio de Procesos de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander como un documento adicional y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS.

### 3. Conclusiones

Se realizó el diagnóstico del equipo usando el módulo de membranas poliméricas, hallando las restricciones de operación para las variables de presión (<3 bar), temperatura (45°C), concentración (<30 g/L para leche reconstituida). La medición de los °Brix para evidenciar la eficiencia de la operación no presenta diferencia entre la alimentación y el permeado, ya que estos muestran la concentración de sólidos solubles que no son retenidos por el umbral de corte. Por el tipo de membranas utilizadas (poliméricas) se evidenció rompimiento en promedio de 3 a 4 usos.

Se diseñaron dos módulos de membranas cerámicas de disposición horizontal, que soportan 3 membranas de 1 cm de diámetro y 40 cm de longitud, con umbrales de corte de 15 y 100 nm. En el acople al piloto fue necesario la modificación de las entradas y salidas de flujo con manómetros y válvulas en cada módulo logrando su funcionamiento y seguimiento independiente. Para la limpieza se adicionó una derivación que evita el contacto entre las sales del agua potable con las membranas, las cuales generan colmatación irreversible por su afinidad.

Se elaboró un manual, en el cual están los conceptos básicos de la operación, descripción detallada del equipo, protocolo de limpieza (con un video de cómo hacer el lavado correcto del equipo). Para las prácticas de laboratorio se analiza la influencia sobre el flujo de permeado y la resistencia por ensuciamiento, debido a la variación de la presión transmembrana (0,5 - 2 bar), temperatura (< 70°C) y concentración (>10g/L) del flujo de alimentación, midiendo el avance de

la operación de filtración en base a la retención de sólidos no disueltos con análisis de turbidimetría.

#### **4. Recomendaciones**

Para la inclusión del Control de temperatura en el piloto de ultrafiltración es necesario cambiar la resistencia larga, por una plana que se ajuste al fondo del Tanque de Alimentación BAC1, además de proteger las conexiones de la resistencia para evitar que entren en contacto con el fluido, también se requiere de una conexión eléctrica más cercana al piloto para la caja de seguridad.

Incluir la filtración de más bebidas que sean afines a las membranas poliméricas y cerámicas, si son de procedencia comercial, tener en cuenta si en su composición contienen espesantes.

Analizar el contenido de materia seca presente en el flujo de permeado para determinar la cantidad de sólidos que dejan pasar las membranas.

### Referencias Bibliográficas

- Ayala, M. E., Mesa, G. P., & Montoya, J. L. (2006). Procesos de membranas para el tratamiento de agua residual industrial con altas cargas del colorante amarillo ácido 23. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 38, 53–63. <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=43003805>
- Benito, J. M., Conesa, A., & Rodríguez, M. A. (2004). Membranas ceramicas. Tipos, metodos de obtencion y caracterizacion. *Boletin de la Sociedad Espanola de Ceramica y Vidrio*, 43(5), 829–842. <https://doi.org/10.3989/cyv.2004.v43.i5.410>
- Carmen Gastalver. (2015). *Tratamientos previos de la leche*. Editoria Elearning; Elearning. [https://books.google.com.co/books?id=3IFXDwAAQBAJ&pg=PA252&lpg=PA252&dq=ecuaciones+que+rigen+la+microfiltracion&source=bl&ots=\\_BvJgsAnYq&sig=ACfU3U0fF975e2S-o9Ykb41NQHbnIECFpQ&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwiuvKX4j4rpAhUCTd8KHbAwD70Q6AEwB3oECAoQAQ#v=onepage&q&](https://books.google.com.co/books?id=3IFXDwAAQBAJ&pg=PA252&lpg=PA252&dq=ecuaciones+que+rigen+la+microfiltracion&source=bl&ots=_BvJgsAnYq&sig=ACfU3U0fF975e2S-o9Ykb41NQHbnIECFpQ&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwiuvKX4j4rpAhUCTd8KHbAwD70Q6AEwB3oECAoQAQ#v=onepage&q&)
- Chhaya, C., Rai, P., Majumdar, G. C., Dasgupta, S., & De, S. (2008). Clarification of watermelon (*citrullus lanatus*) juice by microfiltration. *Journal of Food Process Engineering*, 31(6), 768–782. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2007.00188.x>
- Cifuentes, L., Vergara, D., & Valencia, B. (2017). *Filter design for the separation of microorganisms present in water through ultrafiltration membranes*. 269–276.
- Férez, A. M. (2004). *Obtención de oligosacáridos de leche de diferentes especies por tecnologías de membranas*. Univesidad de Granada.
- García, J. (2009). *Caracterización hidrodinámica y fenomenológica de membranas selectivas*. Universidad de Murcia.

- Gonz, C. P., Clar, I. I., Garc, J., & Acad, I. C. (2017). *Diseño de una instalación de membranas sintéticas para la concentración de contaminantes emergentes procedentes de un EDAR de 1000 hab/día.*
- Guizard, C. (1999). TECNICAS MEMBRANARIAS de FILTRACION de LIQUIDOS. En *Módulo de enseñanza en fenómenos interfaciales.*
- Hernández, A., Prádanos, P., Calvo, J. I., & Palacio, L. (1999). Membranas cerámicas y su utilidad en procesos de separación. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 38(3), 185–192. <https://doi.org/10.3989/cyv.1999.v38.i3.956>
- Hernández Navarro, M. (2015). *Caracterización del ensuciamiento en membranas de ultrafiltración mediante parámetros de medida de resistencia en operación de flujo cruzado.* Universidad de las Palmas de Gran Canaria.
- Jesús, A., & Domínguez, G. (2014). *CARACTERIZACIÓN DE MEMBRANAS CERÁMICAS DE NANOFILTRACIÓN: ELIMINACIÓN DE METALES PESADOS.*
- Kaseno, & Kokugan, T. (1997). The effect of molasses pretreatment by ceramic microfiltration membrane on ethanol fermentation. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 83(6), 577–582. [https://doi.org/10.1016/S0922-338X\(97\)81140-3](https://doi.org/10.1016/S0922-338X(97)81140-3)
- Martín, I., Salcedo, R., & Font, R. (2011). Operaciones separación sólido-fluido. *Mecánica De Fluidos*, 1–34. [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/20299/11/tema5\\_operaciones\\_separacion.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/20299/11/tema5_operaciones_separacion.pdf)
- Meabe, E., & Sempere, A. (2013). Filtración cerámica para el tratamiento y reutilización de aguas aceitosas de origen industrial. *Ceramic filtration for industrial oily wastewater treatment and reuse*, 4, 64–69.
- Mirsaeedghazi, H., Mousavi, S. M., Emam-Djomeh, Z., Rezaei, K., Aroujalian, A., &

- Navidbakhsh, M. (2012). Comparison between ultrafiltration and microfiltration in the clarification of pomegranate juice. *Journal of Food Process Engineering*, 35(3), 424–436. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2010.00598.x>
- Nandi, B. K., Das, B., & Uppaluri, R. (2012). Clarification of orange juice using ceramic membrane and evaluation of fouling mechanism. *Journal of Food Process Engineering*, 35(3), 403–423. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2010.00597.x>
- Nieto López, F. (2015). *Mejora del proceso de producción de agua ultrapura en la Central de Ciclo Combinado Arcos de la Frontera (Iberdrola)* [Universidad de Cádiz]. <http://rodin.uca.es:80/xmlui/handle/10498/17767>
- Ortiz Jerez, M. J., Vélez Pasos, C. A., & Franco Mejía, E. (2008). Modelos matemáticos de la colmatación de membranas en microfiltración tangencial. *Revista de Ingeniería E Investigación*, 28(1), 123–132. <http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v28n1/v28n1a13.pdf>
- Palacio Martínez, L. (1998). *Caracterización Estructural y Superficial de Membranas Microporosas*. Universidad de Valladolid.
- Pignat. (s/f). *Ultrafiltración alimentaria UFA 2000*. Recuperado el 2 de octubre de 2020, de <https://pignat.com/es/product/ultrafiltracion-alimentaria-3/>
- Reis, M. H. M., Da Silva, F. V., Andrade, C. M. G., Rezende, S. L., Wolf MacIel, M. R., & Bergamasco, R. (2009). Clarification and purification of aqueous stevia extract using membrane separation process. *Journal of Food Process Engineering*, 32(3), 338–354. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2007.00219.x>
- Rodríguez, J., & Galvin, R. (1999). *Fisicoquímica de aguas* (D. de Santos (ed.)). <https://books.google.com.co/books?id=0gt-ra9MHHwC&pg=PA35&dq=definicion+turbidez&hl=es->

419&sa=X&ved=2ahUKEwjngL65qJbsAhXMtlkKHbDIAkUQ6AEwAHoECAUQA#v=onepage&q=definicion turbidez&f=false

Romero González, J. F. (2010). *Control Avanzado en Procesos Industriales de Microfiltración y Ultrafiltración tangencial* [Universidad Politécnica de Valencia].  
file:///C:/Users/Fáver/Google Drive/Proyectos activos/Proyecto posgrado/Documentos de referencia/2010. Romero. Control avanzado en procesos de ultrfiltración.pdf

Varga, Á., Gáspár, I., Juhász, R., Ladányi, M., Hegyes-Vecseri, B., Kókai, Z., & Márki, E. (2019). Beer microfiltration with static turbulence promoter: Sum of ranking differences comparison. *Journal of Food Process Engineering*, 42(1), 1–10.  
<https://doi.org/10.1111/jfpe.12941>

Vargas, L. (2004). *Tratamiento de Aguas para consumo humano*. Organización Panamericana de la Salud.

Yusof, S., & Ibrahim, N. (1994). Quality of soursop juice after pectinase enzyme treatment. *Food Chemistry*, 51(1), 83–88. [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(94\)90052-3](https://doi.org/10.1016/0308-8146(94)90052-3)

Zapata Montoya, J. E. (2006). *Efecto de la limpieza química en la permeabilidad de membranas cerámicas de ultrafiltración* [Universidad de Granada].  
<http://digibug.ugr.es/handle/10481/1085>

ZIBO DONGQIANG CERAMIC FILTER CO., L. (s/f). *Membranas Cerámicas*. Recuperado el 2 de octubre de 2020, de <http://www.zbdongqiang.com/proshow/?81-127-180.html>

Zulewska, J., Newbold, M., & Barbano, D. M. M. (2009). Efficiency of serum protein removal from skim milk with ceramic and polymeric membranes at 50°C. *Journal of Dairy Science*, 92(4), 1361–1377. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1757>