



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

EFFECTO DE LA PRESIÓN EN UN PROTOTIPO DE ULTRAFILTRACIÓN UTILIZANDO MEMBRANA DE ACETATO DE CELULOSA EN ESPIRAL

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA AMBIENTAL – AGUA

P R E S E N T A :

DIEGO RICARDO MALDONADO VERGARA



TUTOR:
M. I. ANA ELISA SÍLVA MARTÍNEZ

MÉXICO, D.F. MAYO DE 2008



JURADO ASIGNADO:

Presidente: DRA. BLANCA JIMÉNEZ CISNEROS
Secretario: DR. JESÚS GRACIA FADRIQUE
Vocal: M.I. ANA ELISA SÍLVA MARTÍNEZ
1^{er}. Suplente: DR. GERMÁN BUITRÓN MÉNDEZ
2^{do}. Suplente: DR. ENRIQUE CESAR VÁLDEZ

Lugar donde se realizó la tesis:

POSGRADO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

M.I. ANA ELISA SÍLVA MARTÍNEZ



“La gente se enamora mucho más de la belleza cuando oye hablar de élla sin verla, pues entonces operan dos incentivos sobre la pasión: el apetito de amor y el ansía de conocimiento”

San Ambrosio

DEDICATORIA

A Dios por darme la fuerza para perseverar y seguir adelante. A mi esposa, hermanos y tía por su amor, comprensión y apoyo incondicional en todo momento.





AGRADECIMIENTOS

Agradezco de manera especial, el apoyo brindado por parte de mi tutora M. I. Ana Elisa Silva Martínez de la Facultad de Ingeniería, al darme la oportunidad de realizar este trabajo de grado y brindarme los medios necesarios al incorporarme como becario.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y al Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM, por abrirme sus puertas y fortalecer mi preparación como profesional y como persona.

Al M. I. Eduardo Vega Gonzáles, Dr. Pedro Martínez Pereda, Laboratoristas del laboratorio de Ingeniería Ambiental en la Facultad de Posgrado por su dirección, apoyo, paciencia, conocimientos compartidos y valiosa asesoría durante la realización de esta tesis.

A cada uno de los integrantes del comité de sinodales: Dr. Blanca Jiménez Cisneros, Dr. Jesús Gracia Fadrique, Dr. Germán Buitrón Méndez y Dr. Enrique Cesar Váldez, por sus comentarios y aportes durante la evaluación de mi trabajo.

A mis amigos y compañeros del Posgrado de Ingeniería de quienes siempre he recibido apoyo.



ÍNDICE

1	<u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1	JUSTIFICACIÓN	2
1.2	OBJETIVO GENERAL	2
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.4	ALCANCES Y LIMITACIONES.....	3
2	<u>ANTECEDENTES</u>	5
2.1	MEMBRANAS	6
2.1.1	Estructura	6
2.1.1.1	Membrana de profundidad	7
2.1.1.2	Membrana de película	7
2.1.2	Materiales de las membranas.....	9
2.1.3	Procesos de membranas	10
2.1.4	Módulos de las membranas	11



2.1.5	Estimación de la efectividad de una membrana.....	13
2.1.5.1	Flux de permeado.....	14
2.1.5.2	Porcentaje de rechazo.....	15
2.2	MECANISMOS DE SATURACIÓN DE MEMBRANAS	16
2.2.1	Concentración de polarización	18
2.2.1.1	Modelo Gel de Polarización.....	19
2.2.1.2	Modelo de resistencia al flujo.	21
2.2.2	Ensuciamiento de membranas por coloides	23
2.2.3	Ensuciamiento biológico	24
2.2.4	Ensuciamiento orgánico	25
2.2.5	Ensuciamiento de membranas por adsorción de iones	26
2.3	ULTRAFILTRACIÓN	28
2.3.1	Teorías y Modelos de la Ultrafiltración	31
2.3.1.1	Modelo de flujo volumétrico de Kadeem-Katchalky	31
2.3.1.2	Ley de Poiseuille.....	32
2.3.2	Aplicaciones	33
2.4	PLANTA DE TRATAMIENTO DE LA UNAM EN CIUDAD UNIVERSITARIA	36
2.4.1	Operaciones unitarias	37
2.4.1.1	Pretratamiento.....	37



2.4.1.2 Tratamiento secundario..... 38

2.4.1.3 Tratamiento terciario 39

3 METODOLOGÍA40

3.1 PERMEABILIDAD DE LA MEMBRANA40

3.2 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA43

3.3 DISEÑO DEL FILTRO DE ARENA.....44

3.3.1 Granulometría 44

3.3.2 Coeficiente de permeabilidad 45

3.4 PROTOTIPO DE ULTRAFILTRACIÓN45

3.4.1 Embobinado de los cartuchos..... 45

3.4.2 Componentes del prototipo..... 47

3.4.3 Pruebas hidráulicas 51

3.5 EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO52

3.5.1 Calidad del agua 53

3.5.2 Volumen de agua 53

3.5.3 Filtro de arena 54

3.5.4 Válvulas de control 54

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN55

4.1 PERMEABILIDAD DE LA MEMBRANA55



4.2	CARACTERIZACIÓN DEL AGUA	56
4.2.1	Demanda química de oxígeno	57
4.2.2	Sólidos suspendidos	58
4.2.3	Sólidos disueltos	59
4.2.4	Conductividad eléctrica	59
4.2.5	Color	60
4.2.6	Coliformes fecales	61
4.2.7	pH	61
4.2.8	Temperatura	62
4.2.9	Balance de masa.....	63
4.3	DISEÑO DEL FILTRO DE ARENA.....	66
4.3.1	Prueba granulométrica	66
4.3.2	Coeficiente de permeabilidad	67
4.3.3	Construcción del filtro de arena	69
4.4	PROTOTIPO DE ULTRAFILTRACIÓN	71
4.4.1	Pruebas hidráulicas	71
4.4.2	Pruebas de presión.....	73
4.5	EVALUACIÓN DEL FLUX.....	74
4.5.1	Flux Preliminares	74



4.5.2	Flux de Ajuste	75
4.5.3	Flux preliminar vs. ajuste	78
4.5.4	Flux Final	79
5	<u>CONCLUSIONES</u>	<u>85</u>
6	<u>RECOMENDACIONES</u>	<u>87</u>
	<u>NOMENCLATURA</u>	<u>88</u>
	<u>REFERENCIAS</u>	<u>90</u>
	<u>APÉNDICES</u>	<u>98</u>
	<u>A1. HOJA TÉCNICA DE LA MEMBRANA</u>	<u>98</u>
	<u>A2. DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA DE LAS BOMBAS</u>	<u>101</u>
	<u>A3. PERMEABILIDAD DE LA MEMBRANA</u>	<u>110</u>
	<u>A4. PERMEABILIDAD DEL FILTRO DE ARENA</u>	<u>111</u>
	<u>A5. PRUEBAS PROTOTIPO DE ULTRAFILTRACIÓN</u>	<u>114</u>



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Clasificación de las membranas (Cheryan, 1998)	7
Figura 2.2. Esquema de una membrana profunda (Cheryan, 1998)	7
Figura 2.3. Esquema de una membrana de película (Cheryan, 1998)	8
Figura 2.4. Representación esquemática de la ultraestructura de una membrana asimétrica homogénea (Cheryan, 1998)	9
Figura 2.5. Proceso de filtración con membranas (Metcalf y Eddy, 2003)	11
Figura 2.6. Membrana de espiral (Wagner, 2001)	12
Figura 2.7. Concentración de polarización (Cheryan, 1990)	20
Figura 2.8. Mecanismos de ensuciamiento de membranas (adaptado de Bourgeois, 2001)	28
<i>Figura 2.9. Rango de retención para ultrafiltración (Koch Membrana Systems, 2004)</i>	30
Figura 2.10. Operaciones unitarias PTAR UNAM	37
Figura 3.1. Unidad de laboratorio para ultrafiltración	41
Figura 3.2. Cartucho espiral.....	46
Figura 3.3. Pegado del material aislante	46



Figura 3.4. Pegado de la membrana.....	47
Figura 3.5. Armado del cartucho	47
Figura 3.6. Módulo de ultrafiltración.....	50
Figura 3.7. Prototipo.....	51
Figura 3.8. Esquema del equipo de ultrafiltración	52
Figura 4.1. Permeabilidad hidráulica membrana.....	56
Figura 4.2. Gráfica de resultados DQO.....	58
Figura 4.3. Gráfica de resultados SS	59
Figura 4.4. Resultados color	60
Figura 4.5. Resultados pH	62
Figura 4.6. Gráfica de resultados temperatura	63
Figura 4.7. Balance de masa a 100 y 200 kPa	64
Figura 4.8. Balance de masa a 300 y 400 kPa	65
Figura 4.9. Curva granulométrica	67
Figura 4.10. Coeficiente de permeabilidad	69
Figura 4.11. Filtro de arena	71
Figura 4.12. Hidroneumático.....	72
Figura 4.13. Bomba 2	72
Figura 4.14. Bomba 3	73
Figura 4.15. Controles de presión del hidroneumático.....	73
Figura 4.16. Permeado bajo, medio y alto.....	75



Figura 4.17. Pruebas de ajuste de los cartuchos	76
Figura 4.18. Esquema completo equipo experimental	77
Figura 4.19. Valores de Flux a 100 kPa.....	79
Figura 4.20. Valores de Flux a 200 kPa.....	80
Figura 4.21. Valores de Flux a 300 kPa.....	81
Figura 4.22. Valores de Flux a 400 kPa.....	81
Figura 4.23. Flux de permeado en función de la presión.....	82
Figura 4.24. Comparación del flux obtenido en laboratorio y equipo de UF	83
Figura 4.25. Comparación de flux	84



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Materiales de las membranas (Scott y Hughes, 1996).....	10
Tabla 2.2. Algunos virus comunes (Discovery).....	30
Tabla 3.1. Flux de la membrana a diferentes presiones.....	42
Tabla 3.2. Propiedades técnicas de la membrana	43
Tabla 3.3. Parámetros de diseño. PTAR UNAM	43
Tabla 3.4. Ficha Técnica Bomba Aqua Pak AP-5 (Aqua Pak, 2007)	48
Tabla 3.5. Ficha técnica del hidroneumático (Zilmet, 2007)	49
Tabla 3.6. Parámetros de calidad analizados	53
Tabla 4.1. Calidad del agua de la PTAR de Ciudad Universitaria.....	57
Tabla 4.2. Resultados DQO.....	57
Tabla 4.3. Resultados SS.....	58
Tabla 4.4. Resultados SD	59
Tabla 4.5. Resultados conductividad	60
Tabla 4.6. Resultados color.....	60
Tabla 4.7. Resultados coliformes	61



Tabla 4.8. Resultados pH.....	61
Tabla 4.9. Resultados temperatura	62
Tabla 4.10. Resultados de la prueba granulométrica.....	66
Tabla 4.11. Pruebas de permeabilidad factibles de acuerdo al tipo de suelo	70
Tabla 4.12. Flux preliminar y de ajuste.....	78
Tabla 4.13. Parámetros operacionales de los cartuchos.....	78



1 INTRODUCCIÓN

La ultrafiltración (UF) se define como la separación de dos o más componentes en un fluido de acuerdo a su tamaño. Este proceso involucra tamaños moleculares entre 5000 y 100,000 Daltons que van a ser retenidos por membranas con diámetro de poro comprendido entre 0,001 y 0,02 micrómetros.

La función de la membrana es actuar como barrera selectiva, lo cual facilita que partículas coloidales, limos, bacterias, virus, sólidos suspendidos, aceites, grasas y materia orgánica sean retenidos en su estructura y macromoléculas e iones sean rechazados. Se puede definir una membrana como una zona de discontinuidad interpuesta entre dos fases (Hwang y Kammermeyer, 1975) o como una fase que actúa como una barrera física entre dos fluidos permitiendo determinado grado de comunicación o restricción de una o más especies entre ellos (Lakshminarayanaiah, 1984).

La ultrafiltración es usada para separar pigmentos de pinturas, endotoxinas pirogénicas, virus, algunas proteínas y asbestos (Koch Membrane Systems, 2004), además abarca un amplio espectro de bacterias, lo que le da su importancia a nivel de la industria alimenticia y farmacéutica por exigir altos índices de calidad en el agua que emplean. Sourirajan (1970) preparó membranas para la aplicación práctica del proceso de ultrafiltración y en la actualidad su implantación se ha extendido al tratamiento de aguas residuales como son reactores de membranas, pulimento y recuperación de sustancias en efluentes de todo tipo que sean compatibles con las características propias de la membrana.



1.1 Justificación

En la República Mexicana existen zonas donde el agua disponible no es apta para consumo humano o en las que debido a emergencias su suministro es interrumpido forzando a la población civil al uso y consumo de agua sin tratar, por lo que queda expuesta a potenciales epidemias y enfermedades, como sucedió por el desbordamiento de ríos e inundaciones consecuentes en Tabasco en noviembre de 2007. La potabilización del agua para uso y consumo humano es una acción básica que debe ser realizada a pesar de las circunstancias, y el desarrollo de prototipos especializados portátiles para lograrlo permite que en situaciones de emergencia, sean una herramienta táctica sanitaria útil por su eficiencia, fácil construcción, transporte, operación y reparación.

La ultrafiltración elimina virus, bacterias y microorganismos patógenos y mejora la calidad del agua de la fuente, lo que posibilita extender su reuso al contacto directo o indirecto del hombre. El presente trabajo de tesis describe las características y desempeño de un equipo experimental de ultrafiltración construido por una serie de módulos y cartuchos de filtración, elaborados manualmente por el grupo de investigación del que forma parte el tesista con el propósito de recopilar información operacional, constructiva y funcional, para que en un futuro sea posible manufacturarlos en serie y llevarlos a los lugares más remotos del país.

Es conveniente conocer las condiciones óptimas de presión del equipo de ultrafiltración empleado, para determinar a que valor de está se presenta ruptura o falla de la membrana por fuga.

1.2 Objetivo general

Determinar el efecto de la presión en los parámetros de flux y calidad del permeado de un prototipo de ultrafiltración, a base de cartuchos de membranas de acetato de celulosa del tipo de arrollamiento en espiral.



1.3 Objetivos específicos

- Obtener experimentalmente el parámetro de permeabilidad de la membrana de acetato de celulosa con enrollamiento en espiral.
- Caracterizar el efluente de la planta de tratamiento de la UNAM en Ciudad Universitaria, que se empleó como agua de alimentación al prototipo.
- Realizar el diseño de un filtro de arena que reduzca la variabilidad de la calidad del agua de alimentación.
- Ajustar el funcionamiento del equipo de ultrafiltración construido en la Facultad de Ingeniería de la UNAM.
- Determinar las mejores condiciones para la manufactura del cartucho con la membrana de acetato de celulosa en términos de materiales, pegamento, fugas, flux y tiempo de operación.
- Realizar pruebas a diferentes presiones para determinar la presión máxima o crítica que soportan los cartuchos manufacturados en espiral.
- Obtener la eficiencia de remoción de contaminantes considerando las presiones de trabajo, por medio de la determinación de demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos y coliformes fecales.

1.4 Alcances y limitaciones

Los alcances y limitaciones de esta tesis son:

- La determinación del efecto de la presión se realizó con base al flux de permeado y su calidad, medida como DQO, SS y coliformes fecales, encontrando la presión máxima de trabajo.



- Sólo se probó el equipo con agua residual proveniente de la planta de tratamiento de ciudad universitaria, después de someterla a un pretratamiento mediante filtración en lecho de arena.
- Las determinaciones se realizaron utilizando el prototipo de ultrafiltración construido por el grupo de investigación en la Facultad de Ingeniería de la UNAM; no se compararon resultados con equipos comerciales.
- La manufactura de los cartuchos en espiral con membrana de acetato de celulosa se realizó manualmente lo que incrementa la variabilidad de los resultados por error experimental.
- Sólo se utilizó la membrana de acetato de celulosa donada por la compañía UCB (Unión Chimique Belge), lo que limita los resultados de las pruebas a las características de esta membrana.



2 ANTECEDENTES

Desde el año 2000, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, se inició una línea de investigación tendiente a realizar desarrollos tecnológicos sobre los procesos de separación por membranas, aplicados principalmente a problemas específicos de la Ingeniería Ambiental como son, el suministro de agua para uso y consumo humano libre de bacterias y virus.

Con apoyo de la institución gubernamental dedicada al fomento de la investigación (CONACYT) y de la Comisión Nacional del Agua (CNA) se diseñó y construyó el primer prototipo de ultrafiltración en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental en el año 2007. En la presente tesis se describen las características que definen el sistema y los resultados de un conjunto de pruebas que facilitó caracterizar su desempeño y operación.

La ultrafiltración (UF) es definida como un método de filtración de flujo transversal, similar a la ósmosis inversa (OI) pero con presiones más bajas, que utiliza una membrana para separar partículas coloidales pequeñas y moléculas grandes del agua y otros líquidos (Harrison et al., 2000).

La ultrafiltración en los últimos años ha adquirido importantes usos como la depuración y mejora de la calidad del agua regenerada proveniente de aguas residuales, lo que ha permitido la implantación de sistemas integrados de membranas con el fin de lograr la eliminación de sólidos en suspensión, reducción de la carga bacteriana, eliminación de quistes de protozoos, huevos de helmintos parásitos y virus por medio de procesos de filtración como la



ultrafiltración conjuntamente con coagulantes y floculantes (Guerrero et al., 2003).

En un estudio realizado con el fin de acondicionar los nutrientes contenidos en un efluente de una planta de tratamiento (tratamiento secundario con lodos activados) para uso en riego agrícola, se demostró que las diferentes formas de fósforo contenidos se removieron por ultrafiltración en un promedio de 82 % respectivamente (Lara et al., 2003).

Otras aplicaciones de la ultrafiltración son demostradas por Barbosa et al., 2005, al usar membranas de ultrafiltración para la remoción de DQO y proteínas contenidos en efluentes de una industria láctea donde la remoción está en un rango de 65 a 76% para DQO y 97% para proteínas.

Schafer A I et al., 2001, encontraron que la adición de reactivo coagulante antes de efectuar la ultrafiltración permite mejorar la remoción de materia orgánica natural a niveles comparables a los alcanzados con la nanofiltración.

2.1 Membranas

Son barreras selectivas que permiten el paso exclusivo y/o de forma controlada de una o más especies a través de ella (Hernández et al., 1990). Esta membrana o barrera controla las tasas relativas de transporte de varias especies a través de sí misma y, por ello, como con todas las separaciones, genera un producto reducido en ciertos componentes (permeado) y un segundo producto (rechazo) que concentra los componentes (Scott y Hughes, 1996).

2.1.1 Estructura

De acuerdo con Cheryan, 1998 las membranas están fabricadas de una gran variedad de materiales usando diferentes métodos, es por esto que pueden ser clasificados en dos grandes grupos: profundidad o película (Figura 2.1).

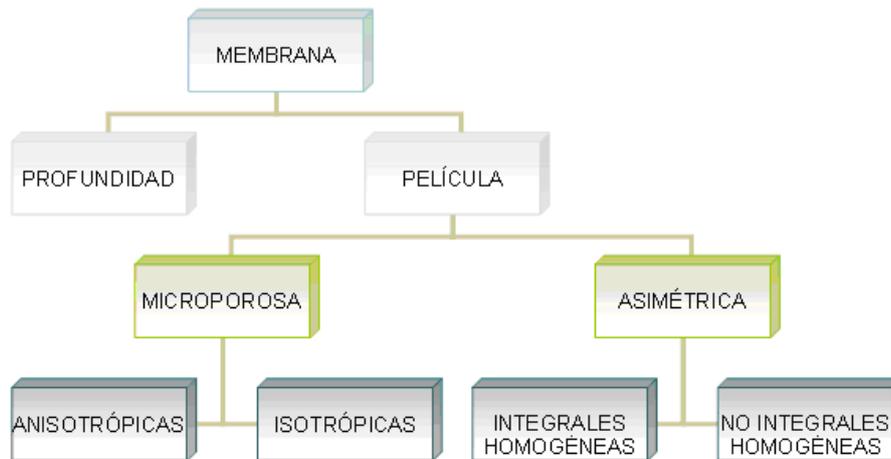


Figura 2.1. Clasificación de las membranas (Cheryan, 1998)

2.1.1.1 Membrana de profundidad

Reciben este nombre porque la filtración se lleva a cabo en lo profundo de su matriz, sus fibras están orientadas al azar y unidas forman un laberinto aleatorio que permite remover las partículas que son insolubles o coloidales por adsorción o captura (Figura 2.2).

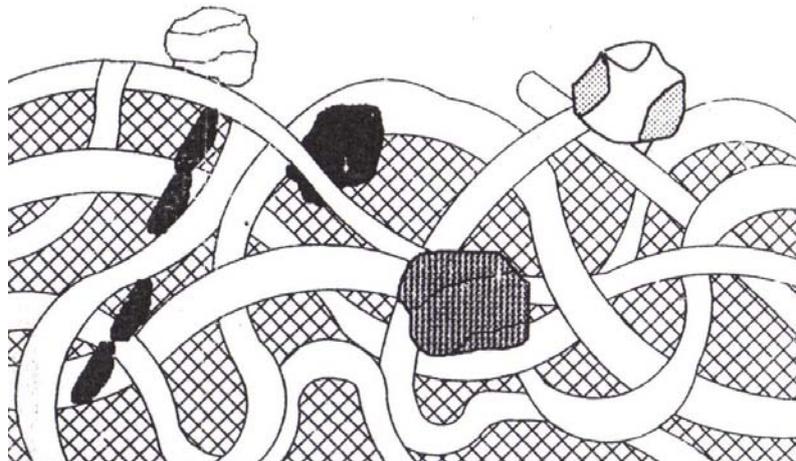


Figura 2.2. Esquema de una membrana profunda (Cheryan, 1998)

2.1.1.2 Membrana de película

Las membranas de película separan por retención de partículas en su superficie (Figura 2.3). Esta estructura se caracteriza por ser más rígida,



uniforme y continua con un tamaño de poro más preciso y se dividen en microporosa y asimétrica. Las membranas microporosas se pueden clasificar en isotrópicas (tamaño de poro uniforme a lo largo del cuerpo de la membrana) o anisotrópicas (el tamaño de poro cambia a lo largo de la membrana).

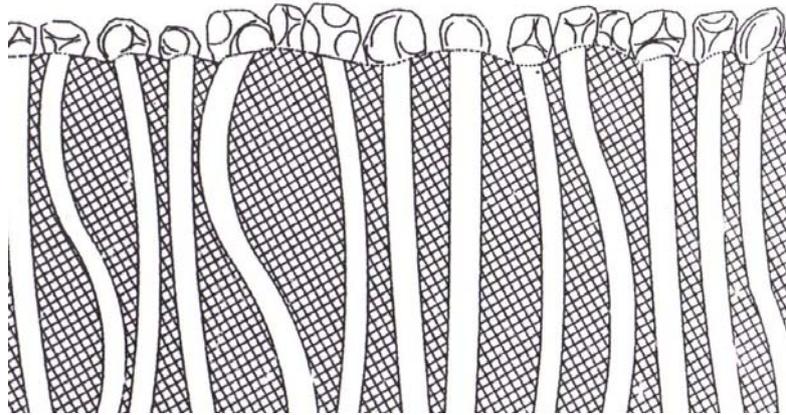


Figura 2.3. Esquema de una membrana de película (Cheryan, 1998)

Las membranas asimétricas se caracterizan por tener una “película” delgada sobre la estructura de la membrana, la cual está formada de vacíos que a su vez sirven de soporte a la película (Figura 2.4). El rechazo sólo ocurre en la superficie porque es la única ultraestructura que retiene partículas o macromoléculas que están por encima del peso molecular de corte (molecular weight cutt-off, MWCO). El método que se use para la preparación de las membranas determina la porosidad de la película (Cheryan, 1998).

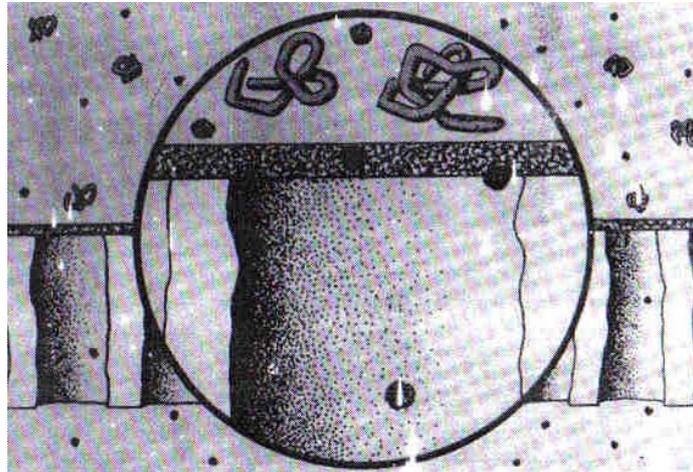


Figura 2.4. Representación esquemática de la ultraestructura de una membrana asimétrica homogénea (Cheryan, 1998)

2.1.2 Materiales de las membranas

Los materiales que se usan para fabricar membranas deben tener las siguientes propiedades:

- Operación estable
- Estabilidad térmica
- Elevada permeabilidad
- Alta selectividad
- Estabilidad mecánica
- Resistencia química (al agua de alimentación y fluidos de limpieza)

Los materiales más comunes para la fabricación de membranas desde microfiltración hasta ósmosis inversa son polímeros, cerámicas, vidrio y metales, sin embargo, el vidrio es el material más usado para fabricar membranas de ultrafiltración (Scott y Hughes, 1996). En la Tabla 2.1 se mencionan los materiales típicos empleados en la fabricación de membranas.



2.1.3 Procesos de membranas

Los procesos de membrana han sido descritos en distintos libros de texto sobre tratamiento de agua (Weber, 1972; Reynolds; 1977; Hernández et al., 1990; Cheryan 1998). En sentido amplio se definen como una corriente de alimentación que se divide en dos: permeado y rechazo.

La corriente de alimentación es el agua que ingresa al sistema de filtración para ser purificada, el permeado, también conocido como agua producida, es el agua que pasa a través de la membrana (depurada) y finalmente, la corriente que contiene los solutos y partículas separados se conoce como concentrado, retenido, rechazo o corriente residual (Figura 2.5).

Tabla 2.1. Materiales de las membranas (Scott y Hughes, 1996)

MATERIAL	APLICACIÓN	CARACTERÍSTICAS
Polisulfonas	Microfiltración Ultrafiltración	pH operación = 1.5-12 T _{máx} = 80 °C Resistencia media oxidantes
Acetato de celulosa	Primera membrana de ósmosis inversa Ultrafiltración	pH operación = 3-7 T _{máx} = 30-35 °C Hidrofílica y biodegradable
Polisulfona sulfonada	Nanofiltración	Alta tolerancia al cloro
Película delgada de poliamida	Ósmosis inversa Nanofiltración	pH operación = 2-12 T _{máx} = 70 °C Baja tolerancia cloro libre
Difluoruro de polivinilideno	Microfiltración Ultrafiltración	pH operación = 1.5-12 T _{máx} = 80 °C Resistencia alta oxidantes
Cerámica	Microfiltración Ultrafiltración Nanofiltración	pH operación = 1-14 Mayor tiempo de vida

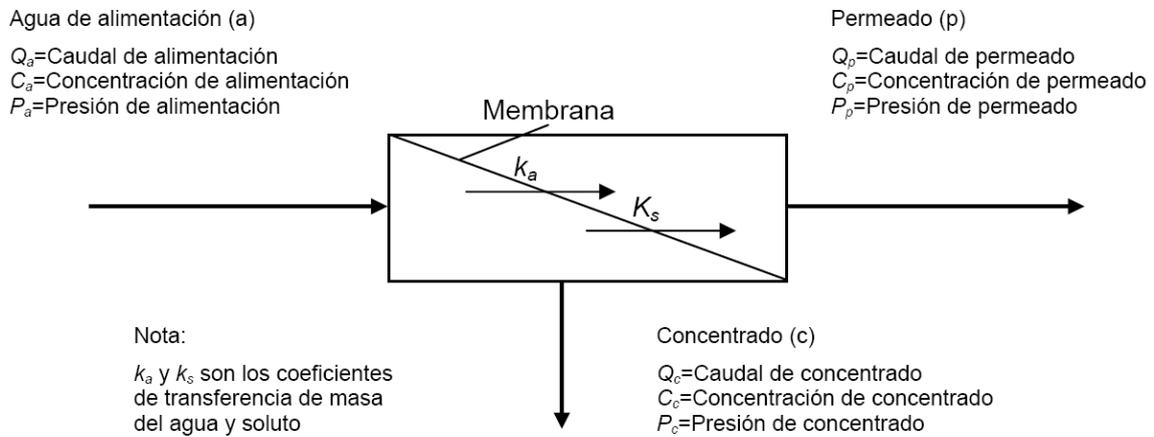


Figura 2.5. Proceso de filtración con membranas (Metcalf y Eddy, 2003)

2.1.4 Módulos de las membranas

Las membranas se comercializan en dispositivos que se denominan módulos de membranas. Un módulo de membrana es la unidad básica en un dispositivo de filtración y se construye en un recipiente adecuado para soportar presiones, que contiene las membranas con sus soportes, así como las conducciones necesarias para el flujo (Hernández et al., 1990).

Las membranas de ultrafiltración en un proceso industrial se agrupan en una unidad o módulo. Éste debe proporcionar soporte mecánico a la membrana, una distribución uniforme y una velocidad de flujo adecuada en las dos corrientes principales con una caída de presión mínima (Michaels, 1968).

Para el uso en un sistema de filtración las membranas se presentan en diferentes arreglos:

- Membranas tubulares: construidas por una serie de canales internos, la relación de superficie de membrana por volumen es la más baja y opera con altas presiones y temperaturas.
- Membranas de fibra hueca: son paquetes de fibras encapsuladas y enlazadas en los extremos, el permeado es obtenido lateralmente y no soporta presiones altas.



- Membranas espirales: permiten que el agua a filtrar pase por toda la membrana y sea recogida en un canal central. Reduce costos de energía al reducir requerimientos de bombeo. Se puede operar a altas presiones y altas temperaturas.

La construcción de este tipo de módulos de membranas parte de dos hojas o placas de membranas colocadas una contra la otra, con las caras que tiene la superficie activa o la película delgada de membrana hacia fuera y son separadas una de la otra por una malla de película que sirve como colector de filtrado y finalmente se unen con pegamento. Sobre las caras activas de las membranas se coloca un espaciador para evitar su adhesión al momento de enrollarlas alrededor de un tubo perforado (Figura 2.6).

Estos módulos son colocados dentro de tubos housings de PVC o de acero inoxidable con las apropiadas conexiones. Cada housing o recipiente de presión puede contener varios de estos módulos de membranas colocados en serie.

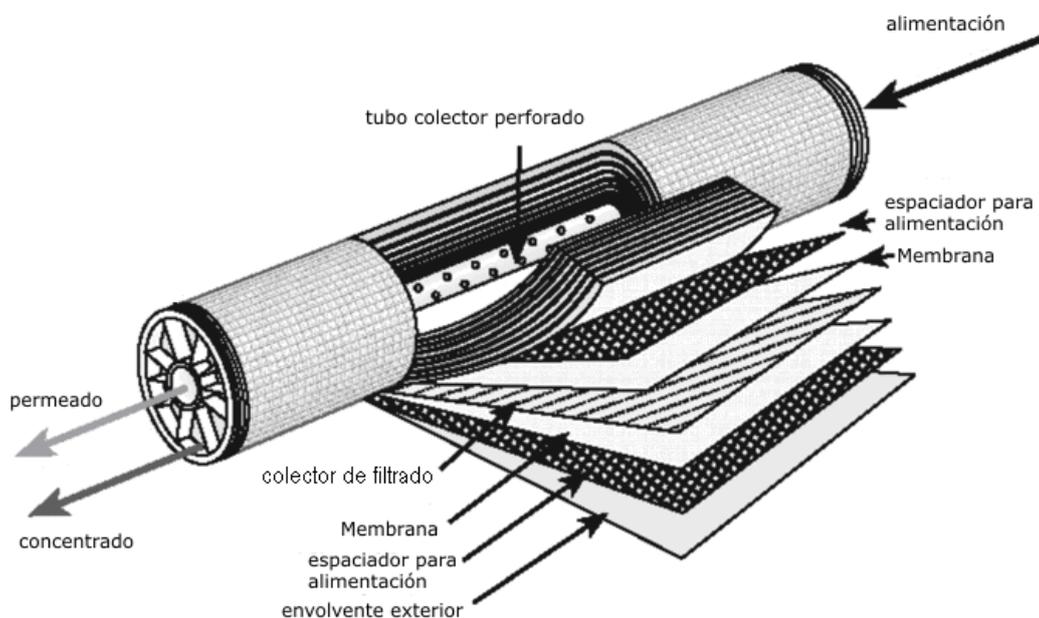


Figura 2.6. Membrana de espiral (Wagner, 2001)



Las principales características operacionales en la ultrafiltración son (Hernández et al., 1990):

Presión de operación:	1×10^5 a 3×10^5 Pa
Temperatura:	20 a 75 °C
Velocidad a través de la membrana:	10 a 60 m s^{-1}
Relación área/volumen:	1500 a 2000 $\text{m}^2 \text{m}^{-3}$
Longitud del módulo:	0.3 a 1.82 m
Retención de moléculas:	0,003 a 0,02 μm
Retención de Macro moléculas:	0.02 a 0.1 μm
Peso molecular de corte (MWCO):	8000 a 100.000 Da

2.1.5 Estimación de la efectividad de una membrana

La ultrafiltración es un proceso regido por dos fenómenos de transporte, por un lado se encuentra la transferencia de cantidad de movimiento y por otro la transferencia de masa. La transferencia de cantidad de movimiento es el mecanismo que promueve la separación, mientras que el mecanismo de transferencia de masa lo limita.

La transferencia de cantidad de movimiento se presenta en la alimentación, en el rechazo y permeado, desde el momento que una diferencia de presión impulsa el movimiento de alimentación a lo largo de la membrana y otra diferencia de presión impulsa al permeado de la parte interna a la externa de la misma (Bruning, 1989).

La efectividad de una membrana se define en términos de dos factores simples, flux de permeado y selectividad (Scott y Hughes, 1996).



2.1.5.1 Flux de permeado

El flux (J) es el volumen de agua que pasa a través de una unidad de área de membrana por unidad de tiempo. Este parámetro se usa para evaluar la producción de permeado de cualquier sistema de filtración con membranas en términos de la extensión de membrana necesaria para producir cierto flujo de agua filtrada (Scott y Hughes, 1996) y está relacionado con los costos de inversión y operación de dichos sistemas (AWWA, 1998). El flujo de agua que atraviesa las membranas de ultrafiltración sigue la ley fundamental de flujo a través de un medio poroso y es conocida como la ley de Darcy (MWH, 2005):

$$\frac{Q}{A} = k_p \frac{h_L}{L} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde

Q = gasto $[m^3 s^{-1}]$

A = área $[m^2]$

k_p = coeficiente de permeabilidad hidráulica, $[m s^{-1}]$

h_L = pérdida de carga hidráulica a través del medio poroso, $[m]$

L = espesor del medio poroso, $[m]$

El coeficiente de permeabilidad hidráulica en la ley de Darcy es un parámetro empírico que describe la proporcionalidad entre la pérdida de carga y la velocidad del fluido, y es dependiente de las características del medio como la porosidad y el área específica superficial. Aunque el flujo a través de la membrana sigue la ley de Darcy, la ecuación estándar para flujo de membranas es escrita en una forma substancialmente distinta. La fuerza de conducción es representada como presión transmembranal ΔP que es la pérdida de carga (la cual está relacionada por $\Delta P = \rho_w g h_L$), y las características del medio formuladas como un coeficiente de resistencia (el inverso del coeficiente de permeabilidad). La ecuación del flujo de membrana incluye la viscosidad del fluido explícitamente (la ley de Darcy incluye esto en el coeficiente de permeabilidad) porque la viscosidad tiene un impacto



significativo sobre el flux y se puede determinar (vía temperatura). Finalmente, la ecuación de flux de membrana incorpora el espesor de la membrana dentro del coeficiente de resistencia (MWH, 2005). La ecuación de flux para membrana es:

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R_M} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde

$J =$ flux del agua a través de la membrana, $[m^3 s^{-1} m^{-2}]$

$\Delta P =$ diferencial de presión a través de la membrana, $[kg m s^{-2}]$

$\mu =$ viscosidad del fluido, $[kg m^{-1} s^{-1}]$

$R_M =$ coeficiente de resistencia de la membrana, $[m^{-1}]$

La caída de presión a través de la membrana es directamente proporcional a la presión aplicada (de operación) y favorece directamente al flujo de permeado; sin embargo, si el agua tiene sustancias, la presión osmótica ejerce una fuerza opuesta a la presión aplicada que disminuye la fuerza neta que impulsa al agua. La resistencia hidráulica de la membrana es dependiente del tiempo: la acumulación de materiales cerca, sobre y en el interior de la membrana bloquea y constriñe las cavidades de la membrana; por lo tanto, aumenta la resistencia de la membrana al paso del agua. La viscosidad del agua tiene un efecto dependiente de la temperatura: a mayor temperatura, menor viscosidad y mayor flujo.

2.1.5.2 Porcentaje de rechazo

La única medida práctica de la capacidad separadora de una membrana, es decir, de sus características de rechazo, es la prueba funcional. En ella se determina, bajo condiciones controladas, la permeabilidad de la membrana frente a ciertos solutos de diferentes tamaños.

Para que los resultados sean comparables, es preciso normalizar las condiciones experimentales como presión, temperatura, velocidad,



recirculación, número de Reynolds y concentración del soluto (Hernández et al., 1990).

El coeficiente de rechazo (R), que determina la eficiencia de separación es:

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_f} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde:

R= rechazo, [adimensional]

C_p = concentración del permeado, [kg m⁻³]

C_f = concentración de la alimentación, [kg m⁻³]

La capacidad de rechazo de una membrana de ultrafiltración está condicionada no sólo por el tamaño de la molécula, sino por otra serie de factores (Hernández et al., 1990):

- La forma de la molécula
- Configuración del módulo de la membrana
- Presencia de otros solutos
- Concentración de las especies excluidas
- Adsorción de solutos por parte de la membrana
- El microentorno

2.2 Mecanismos de saturación de membranas

Los mecanismos de transporte que ocurren en las membranas dependen de su estructura, así como de la naturaleza del permeado (Meares, 1976),



Para poder determinar los factores limitantes, primero se considera una membrana constituida por un cuerpo poroso capaz de realizar cierta separación entre los elementos de un líquido. La membrana y el líquido a tratar deben cumplir con las siguientes condiciones:

- Los poros están uniformemente distribuidos
- Sus dimensiones son aproximadamente iguales
- El flujo es laminar
- Estar en un estado estacionario; se describe como $dv/dt=0$ (flujo independiente del tiempo)
- El efecto de los extremos de los poros es despreciable
- La densidad del fluido es prácticamente constante en el interior de los poros
- El fluido es aproximadamente newtoniano; es decir, su viscosidad es casi independiente de la velocidad en el interior del poro, entonces el flujo puede ser descrito, teniendo el balance de momentos (Bird et al., 1960), mediante la ecuación de **Hagen-Poiseuille** (Ecuación 2.14).

El ensuciamiento de la membrana es causado por la deposición y acumulación del material retenido en la superficie, o dentro de los poros de la membrana. Actualmente, se aceptan tres mecanismos de ensuciamiento como los causantes de la reducción de flujo y el incremento de presión, éstos son: la formación de pasta causada por la concentración de polarización, la reducción del diámetro del poro por incrustaciones y la adsorción de moléculas y coloides en la superficie de la membrana (Bourgeois et al., 2001).

La obstrucción capilar al interior de la membrana es un nuevo mecanismo de ensuciamiento para la ultrafiltración. Esta oclusión se puede medir con la presión de retrolavado y no se observa con la presión transmembranal y se



presenta en el lado del rechazo así como en el lado de la alimentación al interior del módulo de la membrana. El lavado de los capilares es ineficaz si se usa limpieza hidráulica (retrolavado) así como la limpieza química (Heijman et al., 2007). La limpieza hidráulica no es un buen método para evaluar la eficiencia del retrolavado a pesar de recuperar la permeabilidad total de la membrana ya que el ensuciamiento ocasionado por algunas partículas no fue posible removerlo (Remize et al., 2006). Asimismo, Arkhangelsky et al., 2008 halló que la limpieza química a la membrana afecta sus características mecánicas, tales como resistencia a la ruptura y elasticidad. Sin embargo, se determinó que al combinar el acetato de celulosa con polietilenglicol (PEG 600 aditivo hidrofílico) la presión hidráulica aumenta, debido a que esta mezcla mejora la porosidad y el tamaño del poro, esto se demostró al evaluar el rechazo de albúmina de huevo con un resultado de 49 % (Arthanareeswaran et al., 2004).

2.2.1 Concentración de polarización

La concentración de polarización es un factor común de todos los procesos por membrana impulsados por la presión como es el caso de la ultrafiltración (Iritani, 1991). Sin embargo, este fenómeno es más notorio en la ultrafiltración y se entiende como la acumulación de macromoléculas cerca de la superficie de la membrana que genera una reducción gradual de flux (Del Castillo, 1986; Nikolova e Islam, 1998).

Hernández et al., en 1990 establece que es un fenómeno importante cuando hidrocoloides (proteínas por ejemplo) o solutos de gran tamaño son retenidos en la membrana por el transporte convectivo del soluto hacia la membrana ocasionando una retención sobre la superficie sólida. A continuación, el soluto se difunde en la dirección contraria hasta que, en el estado estacionario ambos efectos se equilibran.

Una teoría, comúnmente aceptada, postula que la concentración de polarización evoluciona de la acumulación de partículas, condición reversible, hasta alcanzar un estado de agregación en forma de pasta que afecta a la



membrana de modo irreversible (Chen et al., 1997; Crozes et al., 1997; Sablani et al., 2001).

La formación de pasta, o gel de polarización, es un caso extremo de la concentración de polarización, donde una gran cantidad de macromoléculas son acumuladas en la superficie de la membrana debido a la exclusión por tamaño de los poros y fundamentalmente a la constante de difusión de este tipo de partículas es dos o tres órdenes de magnitud menor a la de las sales y moléculas pequeñas de materia orgánica (Weber, 1972; Crozes et al., 1997).

A continuación, se presentan los modelos matemáticos propuestos para explicar los efectos de la concentración de polarización en ultrafiltración, citado con mayor frecuencia (Hernández et al., 1990; Cheryan, 1998; Noordman et al., 2002).

2.2.1.1 Modelo Gel de Polarización

Comienza cuando la solución es ultrafiltrada, el soluto es traído hacia la superficie de la membrana por una tasa de transporte convectivo, J_s , definido (Figura 2.7)

$$J_s = J C_B \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Donde

$J_s =$ flux convectivo, $[m^3 s^{-1} m^{-2}]$

$C_B =$ concentración soluto rechazado, $[mol m^{-3}]$

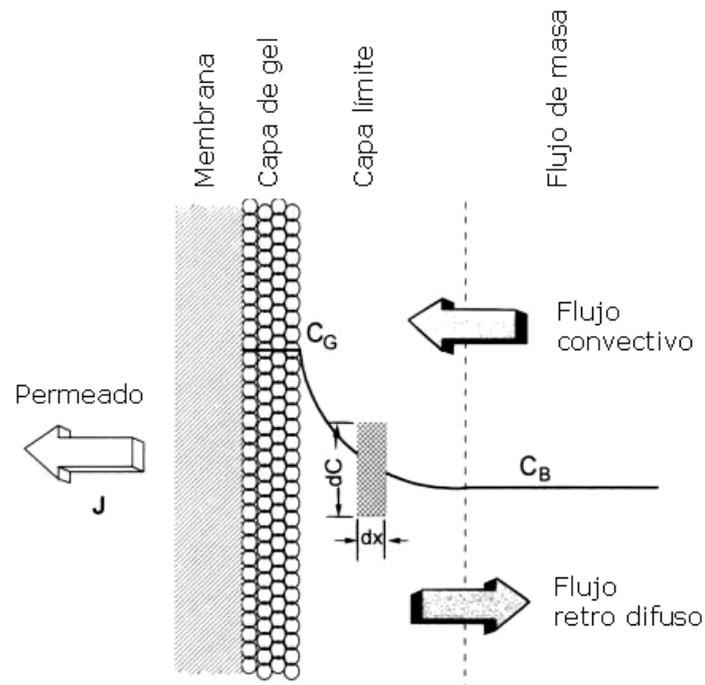


Figura 2.7. Concentración de polarización (Cheryan, 1990)

El resultado del gradiente de concentración ocasiona que el soluto pueda ser transportado de vuelta dentro de la masa de solución debido a los efectos de difusión. Al no cumplir con el gradiente de concentración axial, la tasa de transporte de retorno del soluto puede escribirse como la ley de Fick

$$J_s = D \frac{dC}{dx} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Donde

$D =$ coeficiente de difusión, $[m \text{ s}^{-1}]$

En estado estacionario, los dos mecanismos pueden balancearse el uno al otro y las ecuaciones 2.4 y 2.5 se pueden igualar e integrar sobre la capa límite para obtener

$$J = \frac{D}{\delta} \ln \frac{C_G}{C_B} = k \ln \frac{C_G}{C_B} \quad \text{Ecuación 2.6}$$



Donde

C_G = concentración de gel, $[\text{mol m}^{-3}]$

δ = espesor capa límite, $[\text{m}]$

k = coeficiente de transferencia de masa, $[\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}]$

El valor de k se obtiene:

$$k = \frac{D}{\delta} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

La validez de la ecuación 2.7 ha sido demostrada para un gran número de macromoléculas y especies coloidales (Sablani et al., 2001), sin embargo, las dificultades asociadas a la medición del espesor de la zona de acumulación, δ , así como del coeficiente de difusividad D , restringen su empleo.

Sablani et al., 2001, señalan que se han desarrollado sofisticados métodos de medición directa de δ basados en lecturas de registros de micro electrodos y sensores ópticos.

Por otra parte, la determinación del coeficiente de difusión, D , requiere del uso de ecuaciones empíricas, desarrolladas a partir de las teorías de difusión molecular en soluciones y geles biológicos (Geankoplis, 1978).

2.2.1.2 Modelo de resistencia al flujo.

Belfort et al., 1994, concluyeron que ninguno de los mecanismos de remoción involucrados en la ultrafiltración puede ser considerado dominante y que más de uno podría operar simultáneamente. Es decir, el flujo no declina tan sólo por la acumulación de los solutos que no pasan por el reducido tamaño de poro de la membrana, ya que en el proceso también intervienen la presión aplicada (ΔP), la presión osmótica generada por la acumulación de solutos (π), el coeficiente de reflexión de Staverman (σ), la resistencia al flujo por la membrana (R_m), la resistencia debida a la concentración de polarización (R_c) y la debida al encostrado (R_{pl}), (Chen et al., 1997; Song, 1998; Nikolova e Islam, 1998; Sablani et al., 2001).



$$J = \frac{\Delta P - \sigma \pi}{R_M + R_C + R_{PL}} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Donde

R_C = resistencia concentración de polarización, $[m^{-1}]$

R_{PL} = resistencia por encostrado, $[m^{-1}]$

Las bases para el cálculo de la presión osmótica las proporciona la ecuación de Van't Hoff (Chang, 1995). Su fórmula establece:

$$\pi = R^\circ T M \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Donde

π = presión osmótica $[kg\ m\ s^{-2}]$

R° = constante de los gases, $[J\ K^{-1}\ mol^{-1}]$

T = temperatura absoluta, $[^\circ K]$

M = molaridad, $[mol\ m^{-1}]$

La ecuación 2.9 indica que la presión osmótica se relaciona de forma proporcional a la concentración de la disolución.

La aceptación del hecho de que en ultrafiltración la presión osmótica no tiene una influencia significativa en la declinación del flujo, ha puesto de manifiesto la importancia de los trabajos de investigación enfocados al estudio de mecanismos que posibiliten el disminuir el efecto de adsorción de solutos en la membrana, por ejemplo, modificando la afinidad química de las membranas o modificando químicamente la atracción entre soluto y membranas (Sablani et al., 2001). Por otra parte, el efecto insignificante de la presión osmótica en la declinación del flujo, ha permitido omitir el término de la ecuación 2.8, modificándose de la siguiente manera:



$$J = \frac{\Delta P}{R_M + R_C + R_{PL}} \quad \text{Ecuación 2.10}$$

La ecuación anterior, también conocida como la ecuación general de filtración (Song, 1998), plantea que el flujo a través de una membrana está gobernado por la presión aplicada y es inversamente proporcional a la suma de los factores que oponen resistencia.

2.2.2 Ensuciamiento de membranas por coloides

El ensuciamiento coloidal ocurre en todos los procesos de filtración por presión, independiente del origen de las aguas. El ensuciamiento coloidal se origina por los sólidos en suspensión que quedan atrapados en los poros de las membranas. Los coloides son arcillas, sílice, hidruros e hidróxidos metálicos y restos orgánicos. Estos contaminantes pueden eliminarse utilizando varios tipos de filtración antes del proceso de membranas (Michael, 2002).

Los materiales coloidales son sólidos suspendidos tan pequeños que normalmente no se separan de la solución. Además tienen carga negativa y, por lo tanto, resisten la aglomeración ("agrupamiento"). La concentración causada por el procesamiento de la membrana puede resultar en que los materiales coloidales se depositen en la superficie de la membrana. Los coloides tienden a aglomerarse y precipitarse al ser forzados a juntarse. Por ejemplo, los aceites y grasas son sustancias que son insolubles en agua. Estos contaminantes se encuentran a menudo en el agua como emulsión; ciertos materiales que son activos en la superficie reaccionan con el aceite o la grasa para formar micro gotas de tamaño de coloides que son estables en el agua. Estas gotas cubren la superficie de la membrana y la ensucian cuando la permeabilidad selectiva de la ultrafiltración rompe la emulsión aceite/agua (Cartwright, 2004).

Vigo et al., en el 2006 determinaron que la existencia de materia coloidal en la superficie de las membranas indica deficiencias en el sistema de pretratamiento, si bien en muchos casos los coloides presentan tamaños



incluso inferiores a 1 micra, por lo que su eliminación mediante filtrado es muy difícil. En estos casos es necesaria una coagulación-floculación previa para optimizar su retención.

La adsorción sobre la superficie de la membrana de los solutos contenidos en soluciones acuosas es un fenómeno de transferencia de masa de una fase líquida a una sólida, y la ecuación que le caracteriza es la que corresponde a la Ley de Fick, reportada como Ecuación 2.5. De acuerdo con esta ley, el flujo de solutos se produce por efecto de un gradiente de concentración (Geankoplis, 1978.).

Mediante el flujo convectivo y retrodifuso se pone en contacto físico a los solutos con la membrana, en donde, distintas fuerzas de atracción retienen a las moléculas de solutos. Tradicionalmente se han distinguido los siguientes tipos de fuerzas (Freeman, 1988):

- Fuerzas físicas de adsorción: resultan de la acción de las fuerzas de Van Der Waals (interacción débil producida por el movimiento de electrones en sus orbitales).
- Fuerzas químicas de adsorción: involucra interacción electrónica de sitios específicos de la superficie del sólido absorbente y moléculas del soluto, resultando en la formación de un enlace que puede tener todas las características de un verdadero enlace químico.
- Fuerzas electrostáticas de adsorción: se emplea para referirse de manera específica a la fuerza de atracción que resulta entre iones y grupos funcionales con carga eléctrica del sólido adsorbente.

2.2.3 Ensuciamiento biológico

Ocurre en las membranas cuando se ha eliminado la cloración del agua de entrada o cuando el agua de entrada es biológicamente activa. El ensuciamiento biológico afecta a las membranas de varias maneras. Cuando las bacterias colonizan las membranas y se multiplican producen una



mucosidad que supone un importante factor ensuciante. Tanto las bacterias como la mucosidad afectan a la superficie de las membranas alterando sus condiciones y facilitando con ello el ensuciamiento coloidal o las incrustaciones. Las bacterias pueden llegar a colonizar la parte del permeado de las membranas en cuyo caso puede aparecer contaminación de mucosa y bacterias en el permeado. El control del ensuciamiento biológico se realiza con la adición de cloro, productos químicos específicos y con limpiezas in situ (Michael, 2002).

Cartwright en el 2004, señala que el ensuciamiento biológico es el resultado del crecimiento de microorganismos sobre la superficie de la membrana, los cuales forman una *biocapa* o *biopelícula*. Las biocapas son capas discretas formadas por microorganismos como resultado de su actividad metabólica. La capa del polímero es una matriz de glicocalix, un material capsular de polisacáridos extracelulares que se forma durante el crecimiento y la reproducción de microorganismos. Esta matriz se adhiere a una superficie y los microorganismos se colonizan en la biocapa. Además de servir como estructuras para estabilizar las colonias, las biocapas protegen de los desinfectantes a los microorganismos y también los protegen de ser eliminados por el agua en movimiento. Además ayudan a capturar alimento de la corriente. Con los sistemas de membrana, el crecimiento de la biocapa crea una capa que atrapa las sales y previene que el flujo turbulento mezcle totalmente los solutos en la corriente de alimentación.

Cuando los depósitos son por bacterias, hongos y moho pueden ser difíciles de remover, por lo cual el uso de limpiadores con altos pH´s asociados con biocidas son los tratamientos más efectivos para atacar este problema (Toray, 2003).

2.2.4 Ensuciamiento orgánico

Las fuentes de ensuciamiento por MON (Materia Orgánica Natural) disuelta, son normalmente derivadas por la descomposición de materia vegetal en aguas. La química de ensuciantes orgánicos es muy compleja, siendo la mayoría de los componentes orgánicos el ácido húmico o ácido fúlvico. La



MON puede ensuciar rápidamente a las membranas, siendo absorbida por la superficie de la membrana. Una vez que ha sido absorbida, empieza un lento proceso de formación de gel. Debe notarse que el mecanismo de ensuciamiento con MON es diferente al mecanismo de ensuciamiento creado por la MON unida a partículas coloidales. Los limpiadores con alto pH son los más eficientes para remover este tipo de ensuciamiento. Nótese que las aguas residuales pueden contener un amplio rango de compuestos orgánicos naturales o elaborados. Si alguno de estos compuestos se adhiere a la membrana, los sistemas tradicionales de limpieza pueden ser ineficaces en removerlos (Toray, 2003).

El ensuciamiento crítico por la materia orgánica natural (MON), ocurre en un intervalo de tamaño de 0.1 a 0.5 μm , de acuerdo a un nuevo modelo matemático basado sobre el balance de masa para la migración de partículas (Thorsen et al., 2004).

El ensuciamiento por materia orgánica es un problema asociado al de la biopelícula. En muchos casos esta materia orgánica procede de la propia degradación de la biopelícula, y en otros casos es la biopelícula la que tiene como base física y nutricional esta materia orgánica. Este problema puede verse minimizado mejorando el pretratamiento del agua. Las membranas con materia orgánica progresivamente experimentan una disminución en su producción, asociada a un incremento en la presión diferencial. La limpieza de esta materia orgánica es sencilla y generalmente dan muy buenos resultados mediante el empleo de surfactantes a valores de pH elevados y temperatura. En casos con mucha cantidad de materia orgánica es necesario utilizar elevados caudales de limpieza con el fin de mejorar el arrastre del depósito (Vigo et al., 2006).

Sin embargo, el ensuciamiento de tipo orgánico se puede reducir con la aplicación de ozono al agua según You et al. (2007); demostraron un aumento del 30 % en el flux del permeado al usar ozono.



2.2.5 Ensuciamiento de membranas por adsorción de iones

La adsorción es considerada como un mecanismo de remoción no específico, es decir, se le emplea en el tratamiento de aguas para la separación de compuestos orgánicos y especies inorgánicas. Además, se le califica como un fenómeno reversible (Freeman, 1988).

En los sistemas de separación por membranas, la adsorción es un mecanismo de remoción indeseable, ya que los métodos tradicionales de limpieza son incapaces de separar por completo las moléculas e iones de soluto adsorbidos en la superficie de la membrana. Cuando se produce la adsorción en procesos de membranas, se requiere incrementar la frecuencia de limpieza, hasta el punto en el que, después de repetidos ciclos, no es posible restaurar el permeado de la membrana haciendo necesario su reemplazo (Moftah, 2003).

El fenómeno de la adsorción de solutos en la superficie e interior de los poros de membranas ha sido estudiado por diversos autores (Cherkasov et al., 1995; Bourgeois et al., 2001; Sablani et al., 2001), los cuales han señalado que el ensuciamiento de las membranas ocurre en una secuencia que inicia por la acumulación de solutos en la proximidad de la superficie, seguida por una progresiva adhesión irreversible de solutos en la superficie y matriz de la membrana. En la Figura 2.8, se muestran tres mecanismos de ensuciamiento de membranas, en los que se distingue la concentración de polarización (a), de la adsorción de solutos (c).

Nikolova e Islam (1998) y Chen et al. (1997) encontraron que la concentración de polarización es reversible y puede ser controlada en una unidad de membranas por medio de ajuste de velocidad, ultrasonido o campos eléctricos. Crozes et al. 1997, señalaron que cuando se dispersaba oportunamente la concentración de polarización, incrementando la velocidad de flujo del concentrado y reduciendo el flujo de permeado, se controlaba la evolución del ensuciamiento producido por la adhesión de solutos en la membrana.

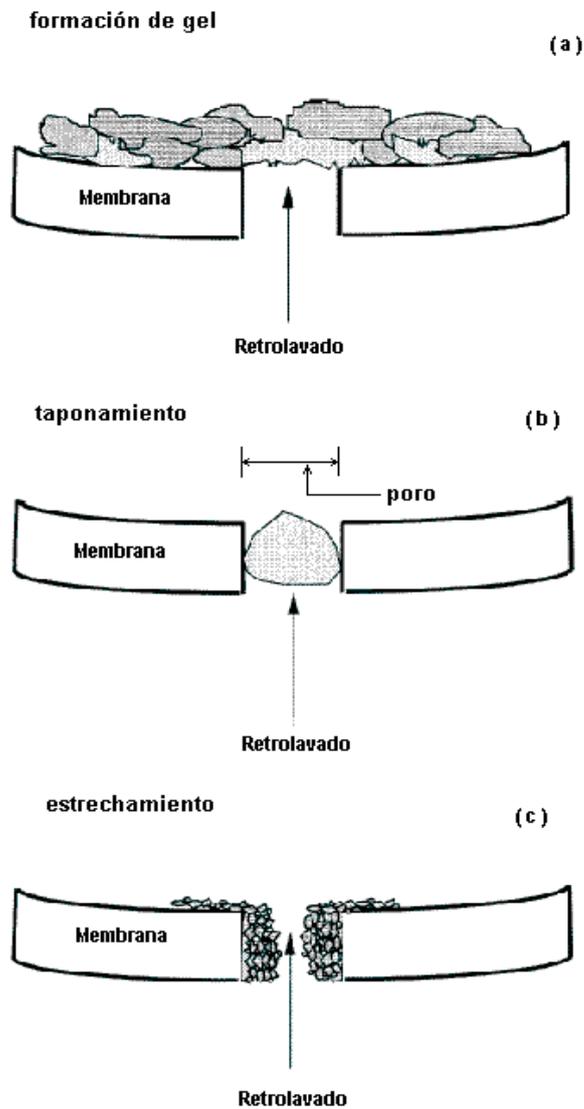


Figura 2.8. Mecanismos de ensuciamiento de membranas (adaptado de Bourgeois, 2001)

2.3 Ultrafiltración

Las aplicaciones de las membranas de ultrafiltración (UF) son en la purificación de aguas con contenidos biológicos y rechazo de solutos que usualmente son macromoléculas.

De acuerdo con Cheryan, 1998 los sistemas de ultrafiltración sólo retienen macromoléculas o partículas con un tamaño de 0.001 a 0.02 μm (10 a 200



ángstrom), sin embargo, a nivel comercial el intervalo de retención varía de 0.005 a 0.1 μm según Koch Membrana Systems, 2004 (*Figura 2.9*).

Un estudio realizado por la Christ Water Technology Group, 2006, para pulir y generar agua para consumo encontraron que un módulo de ultrafiltración llega a retener bacterias de 3 a 4 Log y virus mayores a 5 Log.

La membrana de ultrafiltración restringe el transporte de solutos cuyo peso molecular se encuentra en el intervalo de 300 a 500,000 Daltons. Los solutos que se encuentran en dicho intervalo son grasas, coloides, macromoléculas solubles (albúminas lácteas, séricas y de huevo, así como proteínas y polisacáridos), sílica coloidal, virus, endotoxinas pirogénicas, carbón mineral y microorganismos (Debra y Cheryan, 1980; Ho y Sirkar, 1992; Bemberis y Nelly, 1979).

La selección de una membrana para ultrafiltración está basada principalmente en su peso molecular de corte (MWCO por sus siglas en inglés), que se refiere al peso molecular de una proteína globular que es retenida por la membrana en un noventa por ciento (Ho y Sirkar, 1992; Porter, 1979).

Las sustancias permeadas que mayor relevancia tienen por sus impactos a la salud son:

- Virus: es una entidad biológica capaz de autorreplicarse utilizando el metabolismo celular lo que lo hace un agente potencialmente patógeno debido a su alto potencial multiplicativo y esto reside en su capacidad destructora. En la Tabla 2.2 se citan los tipos de virus más comunes.
- Endotoxinas pirogénicas: son producidas por bacterias gram-negativas, las cuales se localizan dentro de su membrana celular y se caracterizan por generar calor; las personas con este tipo de microorganismos presentan aumento de temperatura y los principales casos se registran en hospitales donde se estima que un 99 % se hallan sobre la superficie de dispositivos médicos.



PROCESOS DE SEPARACIÓN	ULTRAFILTRACIÓN							
	NANOFILTRACIÓN			MICROFILTRACIÓN				
TAMAÑO Y TIPO DE LOS MATERIALES SEPARADOS	PROTEINAS DE LECHE			PIGMENTOS DE PINTURAS				
	GELATINA			BACTERIAS				
	ENDOTOXINAS PIROGÉNICAS			BACTERIAS				
	VIRUS			BACTERIAS				
	SILICAS COLIODALES			BACTERIAS				
MICROMETROS	0,001		0,01	0,1	1	10	100	1000
PESO MOLECULAR APROXIMADO DE CORTE (Daltons)	100	200	1.000	20.000	100.000	500.000		

Figura 2.9. Rango de retención para ultrafiltración (Koch Membrana Systems, 2004)

Tabla 2.2. Algunos virus comunes (Discovery)

TIPO DE VIRUS	TAMAÑO (µm)	
	RANGO	
Poliomielitis	0.02	0.027
Fiebre Amarilla	0.022	0.03
Bacteriófago	0.06	0.09
Influenza	0.1	
Paperas	0.1	

- Silca coloidal: son partículas de dióxido de silicio (SiO₂) dispersadas en agua provenientes de arenas y rocas finas. Los contenidos naturales en aguas crudas están en el intervalo de 1 a 30 mg/L, aunque también se



pueden encontrar concentraciones tan altas como 100 miligramo por litro. Aguas muy salobres (con obvia influencia marina) pueden tener valores mayores de 1.000 miligramo por litro. La sílice es inoportuna en aguas, pues forma depósitos (incrustaciones) en equipos, tuberías y calderas, aunque disuelta en agua no tiene influencia en la salud, es por eso que la OMS no la considera ni incluye en sus guías para la calidad del agua potable, por lo tanto no es parámetro incluido en normas de calidad de agua. Su uso más frecuente es en materiales refractarios, catálisis, textiles, absorbente y como agentes tensoactivos para la coagulación, floculación y estabilidad entre otros.

2.3.1 Teorías y Modelos de la Ultrafiltración

En esta sección se describen las teorías y modelos que explican el comportamiento del flujo del agua a través del medio poroso que es la membrana, así como los principales factores que participan en la capacidad de flujo de una membrana, tales como el gradiente de presión, la permeabilidad de la membrana, el tamaño del poro, su densidad, el espesor de la membrana y la influencia de la viscosidad del fluido.

2.3.1.1 Modelo de flujo volumétrico de Kadeem-Katchalky

El modelo matemático más simplificado mediante el cual es posible describir el funcionamiento de los procesos de separación por membrana, se basa en el principio que establece que el flujo a través de una membrana es proporcional a la cantidad de presión aplicada. Este modelo fue formulado por Kadeem-Katchalky (Taylor et al., 1989), de la siguiente forma:

$$J = K_w P_a \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Donde

K_w = coeficiente de proporcionalidad entre flux y presión, $[s^{-1}]$

P_a = presión aplicada, $[kg\ m^{-1}\ s^{-2}]$



El coeficiente de proporcionalidad entre flux y presión, es el término que manifiesta la capacidad de permeado de una membrana. Taylor, 1989, propuso 0.0578 d^{-1} como valor de este coeficiente. Dicho coeficiente permite establecer que el flujo a través de de una membrana es directamente proporcional a la cantidad de presión aplicada.

Un enfoque complementario al que sustenta el modelo de Kadeem-Katchalky (citado por Taylor et al., 1989), es el que se basa en el precepto de que el flujo no es tan sólo proporcional a la presión aplicada, sino también es inversamente proporcional a la resistencia que ofrece la membrana. Así, la producción de un mayor flujo, a un gradiente de presión dado, sólo es posible si se incrementa el coeficiente de proporcionalidad, es decir, el Coeficiente de Transferencia de Masa de la membrana.

2.3.1.2 Ley de Poiseuille

La relación entre la capacidad de flujo de una membrana y sus características físicas, es descrita por la Ley de Poiseuille (Weber, 1972), ésta refiere

$$J = \frac{\varepsilon (r_p)^2 \Delta P \rho}{8 \mu (T^\circ)^2 \delta_m} \quad \text{Ecuación 2.12}$$

Donde

ε = porosidad, [adimensional]

r_p = radio del poro, [m]

ρ = densidad del fluido, [kg m^{-3}]

T° = factor tortuosidad (tamaño poro/espesor membrana), [adimensional]

δ_m = espesor membrana, [m]

De la comparación de las ecuaciones 2.11 y 2.12 se desprende que al coeficiente de transferencia de masa de una membrana lo determinan, por una parte, como factores de la membrana, el tamaño de poro, la porosidad,



su número por unidad de superficie y su espesor y, por otra parte, la viscosidad y la densidad de masa como propiedades relativas al fluido.

La influencia de la viscosidad en la capacidad de flujo es inversa. Los fluidos menos viscosos fluyen con mayor facilidad a través de los poros de la membrana. La viscosidad es un factor que se modifica de modo inverso por efecto de la temperatura, consecuentemente, al comparar valores de capacidad de flujo se requiere que las viscosidades se ajusten a un valor común de temperatura, o bien, es necesario que las pruebas se realicen a la misma temperatura.

Taylor, 1989, cita los trabajos de Dupont enfocados a la determinación de un método de ajuste de la capacidad de flujo por corrección de temperatura. La ecuación de Dupont es la siguiente:

$$J_{w, 25} = (J_{w,t}) * 1.03^{(t-25)} \quad \text{Ecuación 2.13}$$

Donde

$$\begin{aligned} J_{w, 25} &= \text{flux a } 25 \text{ }^\circ\text{C} , [m^{-3} s^{-1} m^{-2}] \\ J_{w,t} &= \text{flux a la temperatura } t, [m^{-3} s^{-1} m^{-2}] \\ t &= \text{temperatura, } [^\circ\text{C}] \end{aligned}$$

2.3.2 Aplicaciones

Los usos más recientes de las membranas de ultrafiltración son los siguientes:

- En un estudio realizado por Arnal et al., 2008, emplearon la ultrafiltración como un pretratamiento a otras tecnologías de membranas en el reúso de aguas residuales de textiles, y se encontró que la reducción de la conductividad fue casi cero y que el flux logra un estado estacionario entre las 2.5 y 4 primeras horas de iniciada la prueba.



- En el 2008 Mohammed et al., encontraron que al evaluar el uso de membranas para el tratamiento de aguas residuales municipales usando un módulo de microfiltración, se remueve DBO, DQO y nitrógeno amoniacal (NH₃-N) en un intervalo de 98.9–99.9%, 97.8–99.9% y 91.0–100% respectivamente.
- Sartor et al., 2008 demostraron que es posible construir un reactor de membrana (sigla en inglés MBR) con métodos simples bajo condiciones locales de un país en vías de desarrollo, gracias a que la nueva membrana desarrollada demostró buenos resultados de estabilidad del material en agua caliente. Concluyen en su estudio que a las PTAR se les puede descentralizar su uso exclusivo en la recuperación de aguas residuales municipales, siempre y cuando la membrana sea soportada por un birreactor. Las ventajas principales de la tecnología de MBR son: Diseño compacto, no hay exceso de lodo y el agua presenta alta calidad.
- Según Muñoz et al., 2008, la ultrafiltración es el proceso estudiado que rinde la mejor calidad de las aguas residuales tratadas. Sin embargo, su uso puede ser más costoso que las técnicas convencionales (sedimentación y filtración) si ocurre en la membrana el fenómeno de ensuciamiento. Entonces, se deben realizar experimentos más largos con la ultrafiltración para estudiar la viabilidad económica del proceso.
- En el 2007 Azrague et al., realizó una investigación sobre la combinación de dos técnicas: membranas y reactor fotocatalítico para descontaminar agua turbia, alcanzando una remoción de carbono orgánico total (TOC) de 218 mg/L a 15 mg/L lo que equivale a una retención de 93.11 por ciento.
- Gómez et al., 2007, logró ausencia total de coliformes y E. coli presentes en el efluente de un tratamiento terciario en una PTAR, empleando membranas de ultrafiltración (tamaño de poro promedio igual a 5 µm)



- En biorreactores, los cuales son sistemas que combinan un tratamiento convencional biológico de agua residual usando una membrana para separar la biomasa suspendida. Asatekin et al., en el 2006 usó lodo activado cultivado dentro de un biorreactor aerobio de membrana que tenían un trazador (albúmina del suero vacuno, BSA) para observar el comportamiento de la membrana a nivel ultrafiltración y nanofiltración (NF), logrando un porcentaje de retención de BSA de 69 y > a 99.9 %, ácidos húmicos 37 y 99 % y demanda química de oxígeno 98 y 99.5 % respectivamente.
- Sancho et al., 2006 logró una remoción de radioisótopos (¹²⁵I) entre el 50 y 60 % en aguas de desechos radioactivos provenientes de Medicina nuclear que emplean la técnica de Radioinmunoanálisis en laboratorio, la cual genera un gran volumen de dichos desechos.
- La presencia de agentes tensoactivos iónicos (sulfato dodecyl de sodio, SDS, usado en productos como, champús, cremas dentales y de afeitar), presentes en el agua, se pueden eliminar por medio de ultrafiltración y para aumentar la eficiencia de remoción las membranas deben ser de polisulfona y poliethersulfona (Majewska et al., 2006). Se encontró que la eficiencia de separación para SDS puede variar entre 15 y 80 % (Majewska et al., 2005).
- Afonso et al., en el 2004 hicieron una investigación sobre la recuperación de proteínas a través de la ultrafiltración en agua residual proveniente de industrias que elaboran comida para pescados, encontrando que es más viable usar esta técnica que la coagulación y la floculación, debido, a la facilidad de recircular el agua rechazada después del filtrado, dando una nueva oportunidad de recuperación de proteínas rechazadas, las cuales son incorporadas nuevamente al proceso de elaboración del alimento por su alto contenido alimenticio.



- El agua con contenido de ftalato (compuesto químico añadido al plástico para incrementar su flexibilidad) se debe tratar, debido, a sus alteraciones al sistema reproductivo humano, alteración del sistema endocrino y principalmente en fetos. Bodzek et al., en el 2004 usaron membranas de UF, NF y ósmosis inversa (OI) para eliminar el ftalato del agua, basándose en la preparación de agua con diferentes concentraciones del contaminante, obteniendo coeficiente de rechazo de 99.9 % para UF con una concentración de 1400 $\mu\text{g/L}$, 99.9 % para NF con una concentración de 520 $\mu\text{g/L}$ y 99.9 % para OI con una concentración de 120 $\mu\text{g/L}$. Este mismo autor en el 2002 realiza un estudio comparativo a diferentes presiones con membranas de UF, NF y OI para remover trihalometanos del agua de consumo en Kozłowa Góra en la provincia de Silesia (Polonia). Durante su estudio encontró que el flux de permeado para aguas de este tipo (natural) disminuye por la presencia de numerosos microcontaminantes y bacterias.
- Bodsek et al., 2002 concluyó que la mejor eficiencia de remoción de cloroformo fue realizada con la membrana de UF con un 93 % de retención por ser una membrana hidrofóbica (estas membranas son más susceptibles al ensuciamiento, lo cual se manifiesta en la inestabilidad del permeado), además, la formación de la torta facilita la remoción del cloroformo.
- Schafer et al., 2001, definen que la adición de reactivos coagulantes previo a la ultrafiltración permite el rechazo de partículas con peso molecular de corte inferior al definido por la membrana.

2.4 Planta de tratamiento de la UNAM en Ciudad Universitaria

La planta se encuentra dentro de Ciudad Universitaria en su acceso por la avenida Cerro del Agua. Está diseñada para tratar las aguas provenientes de



la Zona Antigua, Zona de Institutos y la Colonia Copilco El Alto, las cuales llegan por tres colectores al tanque de tormentas a través de un sistema de alcantarillado combinado.

2.4.1 Operaciones unitarias

Existen muchas combinaciones de operaciones y procesos unitarios para tratamiento de aguas residuales; la utilizada en la planta de acuerdo al espacio, recursos económicos y caracterización del agua son: pretratamiento, tratamiento secundario y terciario (Figura 2.10).

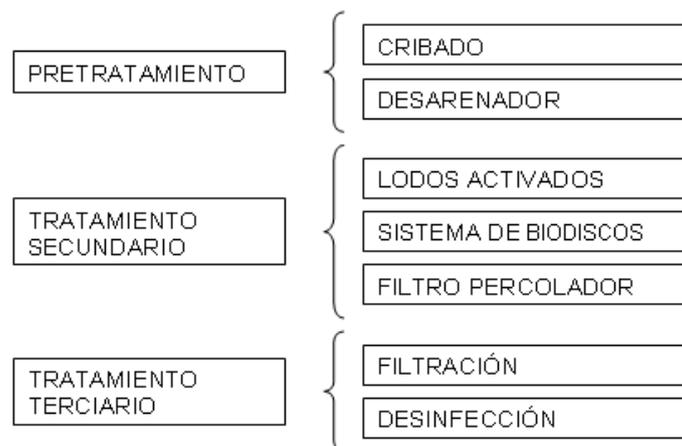


Figura 2.10. Operaciones unitarias PTAR UNAM

2.4.1.1 Pretratamiento

- **Cribado:** El cribado es un proceso mecánico o manual que separa materiales de acuerdo a su tamaño de partícula individual; esta operación de cribado no remueve material disueltos o en suspensión, sirviendo principalmente como protección de las siguientes etapas de tratamiento. Pese a su escasa remoción de contaminantes, es una operación esencial dentro de los procesos de tratamiento: un cribado deficiente impedirá el funcionamiento correcto de bombas y equipos del reactor biológico, producirá obstrucción en tuberías y aumentará la abrasión en los equipos mecánicos.



- Las rejillas de la planta están diseñadas sobre una estructura estacionaria con soleras de acero separadas de 1 a 1,5 cm las cuales se encuentran dentro del tanque de tormentas
- Desarenador: remueven sólidos en suspensión para evitar el desgaste en tuberías y bombas. El principio consiste en reducir la velocidad del agua de entrada y distribuirla lo más uniformemente posible a lo largo de la sección del tanque para garantizar que las partículas más pesadas se depositen en el fondo por acción de la gravedad.

2.4.1.2 Tratamiento secundario

- Lodos activados: es un proceso biológico en el cual el agua a tratar entra a un tanque de almacenamiento donde se mezclan con ayuda mecánica microorganismos previamente preparados y aire en forma de burbujas finas para efectuar la degradación de la materia orgánica presente. La inyección de burbujas de aire coagula los coloides y la grasa, satisface parte de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), reduce un poco el nitrógeno amoniacal e impide que el aguas presente condiciones sépticas. El tiempo de retención hidráulico es de 7 horas.
- Sistema de biodiscos: consiste en una serie de discos circulares, generalmente de plástico, ubicados muy cerca uno de otro, con un diámetro típico de 3,6 metros y dispuestos sobre un eje horizontal que rota lentamente. Aproximadamente el 40 % del disco está sumergido en un estanque que contiene el agua a tratar, de tal manera que la película de biomasa que crece sobre la superficie de los discos está alternadamente dentro y fuera del agua. Cuando los microorganismos están sumergidos en el interior del efluente, absorben la materia orgánica y cuando están en la superficie consumen el oxígeno que requieren. Las ventajas de este reactor son: capacidad para resistir los «shock» de cargas, tiempos de retención hidráulica cortos, bajos requerimientos de potencia, y construcción y operación simples. El área de contacto es de



8700 m², tiene eficiencias de 90% y su tiempo de retención es de una hora

- Sistema de filtro percolador: consiste en un tanque que posee en su interior un medio filtrante (láminas de policloruro de vinilo), sobre el cual se vierte el agua a tratar gracias a unos dispersores, ubicados en la parte superior, que garantizan una distribución uniforme. Al entrar el agua en contacto con el medio se crea una biopelícula que contiene microorganismos degradadores de materia presente en el agua hasta reducirla a porcentajes muy bajos. El sistema es aerobio, por eso el suministro de aire es por abajo debido a la convección que se genera por las diferencias de temperatura dentro y fuera del tanque, hay una recirculación del agua para mantener la concentración de microorganismos y mejorar la eficiencia de operación.

2.4.1.3 Tratamiento terciario

- Filtración: es la separación de una mezcla de sólidos en suspensión y agua, que incluye el paso del fluido a través de un medio poroso, que retiene la mayor parte de las partículas sólidas contenidas en la mezcla y además es el proceso final de clarificación. Existen 6 filtros rápidos los cuales son lavados cada 24 horas.
- Desinfección: el proceso es realizado con cloro gaseoso, gracias a que es la sustancia química más económica, de fácil manipulación para aplicar al agua y obtener su desinfección.



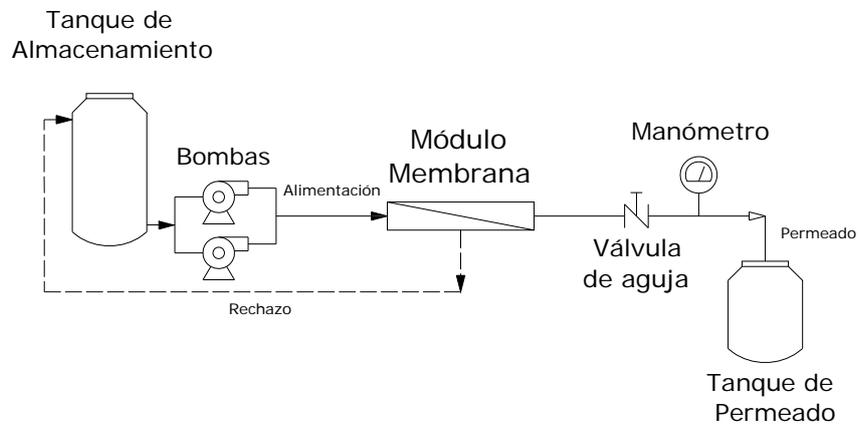
3 METODOLOGÍA

El proyecto de investigación se llevó a cabo en dos fases conjuntas, experimental y constructiva. Durante la primera se caracterizó la membrana, se dimensionó el armado de los cartuchos, se diseñó el equipo de ultrafiltración y un filtro de arena, se realizaron ensayos en los equipos y se hicieron determinaciones de calidad al agua de Ciudad Universitaria; en la siguiente fase se embobinaron los cartuchos, se ajustó el equipo de ultrafiltración y se construyó el filtro de arena.

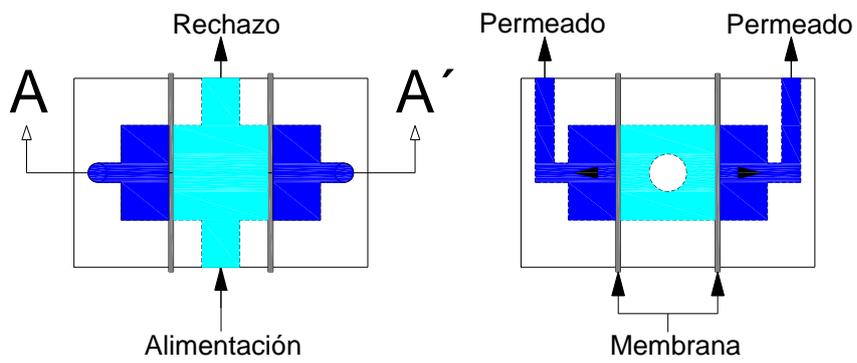
3.1 Permeabilidad de la membrana

Se usó una unidad de laboratorio adaptada al equipo de ultrafiltración, la cual permite un mejor control de fugas, presión y tiempo de operación. Este dispositivo consta de un tanque que tiene la función de alimentación y recepción del rechazo, dos bombas con 0.5 hp, un módulo de filtración con un área efectiva de 0.039 m², una válvula de aguja, un manómetro y un tanque para permeado. El intervalo de presión de operación es de 100 y 500 kPa y permite la recirculación del agua (Figura 3.1).

Su operación inicia cuando el tanque de almacenamiento se llena y se suministra el agua al equipo por una de las bombas (depende de la presión deseada); el agua pasa por el módulo de la membrana y allí se obtiene el permeado y el rechazo, y éste último se recircula. El control de la presión se efectúa con la válvula de aguja y su lectura es con el manómetro.



MÓDULO MEMBRANA



SECCIÓN A-A'



Figura 3.1. Unidad de laboratorio para ultrafiltración



Para determinar la permeabilidad de la membrana se empleó la ley de Darcy (Ecuación 2.1), a las presiones de 100, 200, 300, 400 y 500 kilopascales. Con esta metodología se pudo establecer los valores de flux que se esperaba tener a estas presiones a excepción de 500 kPa (Tabla 3.1)

Tabla 3.1. Flux de la membrana a diferentes presiones

P (kPa)	J (L/h*m2)
100	35.67
200	71.34
300	107.01
400	142.68

Las principales propiedades de la membrana son:

- La ausencia de una película en celulosa regenerada
- Material en acetato de celulosa
- Elevada permeabilidad al vapor del agua
- Excelente transparencia y brillo
- Propiedades antiestáticas
- Estabilidad dimensional
- Biodegradable y compostable

Sus propiedades técnicas más relevantes, se mencionan en la Tabla 3.2.



Tabla 3.2. Propiedades técnicas de la membrana

Datos físicos

PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES
Espesor	24.4	μ
Fluencia	0.034	m ² /kg
Coefficiente de fricción estático	0.5	-
Coefficiente de fricción dinámico	0.4	-

Datos mecánicos

PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES
Resistencia a la tensión	180	MN/m ²
Elongación al romperse	18	%
Módulo de elasticidad	> 3000	MN/m ²

Datos térmicos

PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES
Fuerza del sello	130	°C

La hoja técnica de la membrana se encuentra en el apéndice 1.

3.2 Caracterización del agua

Los parámetros de interés del agua de la planta de tratamiento de Ciudad Universitaria se encuentran consignados en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Parámetros de diseño. PTAR UNAM

PARÁMETROS	VALOR	UNIDAD
Caudal	40	L/s
DBO	50	mg/L
DQO	250 – 300	mg/L
Sólidos suspendidos	150 – 200	g
pH	7.8	unidades



Los parámetros de calidad del agua a evaluar son:

- Demanda química de oxígeno
- Sólidos suspendidos
- Sólidos disueltos
- Conductividad eléctrica
- Color
- Coliformes fecales
- Turbiedad
- pH
- Temperatura

Estas determinaciones se realizaron a la alimentación, permeado y rechazo de cada una de las pruebas finales el mismo día de su ejecución. La ejecución de dichas pruebas se basó en los métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales de la APHA-AWWA-WPCF y las normas mexicanas.

3.3 Diseño del filtro de arena

Para hacer el diseño del filtro se determinó la granulometría de la arena (lecho filtrante) y la grava (lecho de soporte), y se determinó el coeficiente de permeabilidad.

3.3.1 Granulometría

Se realizó por vía seca a través de un cribado sucesivo de siete filtros. Las mallas empleadas fueron la número 18, 20, 30, 40, 50, 60 y 100 y el peso total de la arena fue de 210 gramos. No se efectuó cuarteo de la muestra por tener características homogéneas y tener un tamizado preliminar, la duración



de la prueba es de una hora y la muestra retenida en cada uno de los tamices se pesó.

Con los pesos retenidos en las siete mallas se calculó el porcentaje de material que pasa por cada una y se construyó la curva granulométrica.

3.3.2 Coeficiente de permeabilidad

Se usó la prueba de permeámetro a carga constante, la cual es una técnica directa por basarse en pruebas cuyo objetivo fundamental es la medición de tal coeficiente.

Se estableció una altura constante de 1.45 m, 1.63 m y 1.81 m en el filtro y con cada una de estas alturas se determinó el tiempo empleado para llenar veinte litros.

3.4 Prototipo de ultrafiltración

3.4.1 Embobinado de los cartuchos

Son cartuchos de tipo espiral, los cuales se armaron manualmente partiendo de un difusor central perforado que distribuye el agua de forma tangencial al sentido de la alimentación. Las capas que lo componen son: material aislante, separador, membrana, difusor perforado, membrana y separador. Estas capas son envueltas sobre el difusor y finalmente es sellado en los extremos superiores y laterales (Figura 3.2).

Durante esta etapa se ensayaron diferentes materiales, pegamentos y configuración hasta obtener un área efectiva de permeado de 3080 centímetros cuadrados. El tiempo promedio de armado por cartucho es de una semana.

El embobinado se hizo de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Material aislante: se adhiere al difusor del módulo para darle soporte al resto de capas que conforman el cartucho (Figura 3.3).

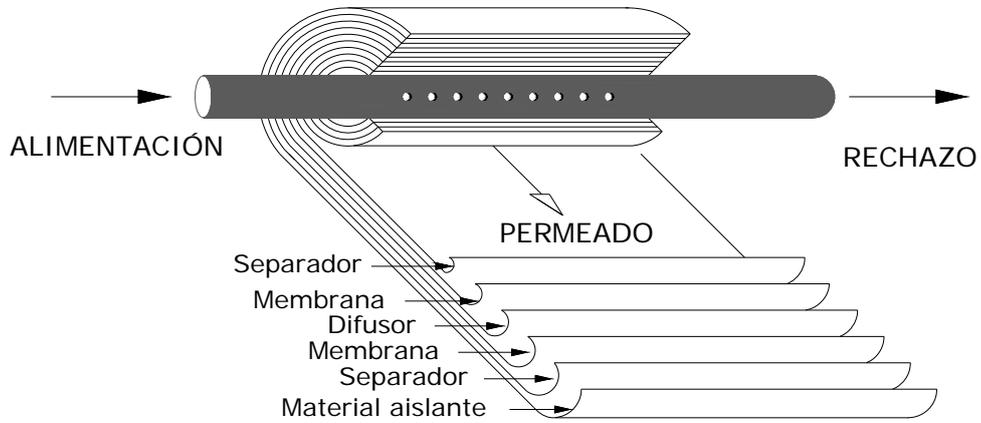


Figura 3.2. Cartucho espiral.



Figura 3.3. Pegado del material aislante

- Pegado de la membrana: en esta etapa se unen tres componentes en un sólo paso, la membrana, difusor y membrana (Figura 3.4).



Figura 3.4. Pegado de la membrana

- Armado: se coloca un separador debajo y sobre la membrana pegada previamente y se procede a envolver ésta alrededor del difusor (Figura 3.5).



Figura 3.5. Armado del cartucho

3.4.2 Componentes del prototipo

Los elementos que constituyen el prototipo son:



- Soporte del equipo: tiene una estructura en acero inoxidable para sujetar las diferentes piezas del equipo con ruedas para facilitar su movilización (Figura 3.7).
- Tablero de control: posee tres interruptores que accionan las dos bombas y el hidroneumático y tres manómetros que registran la presión en todo el sistema.
- Bombas: son marca Aqua Pak y sus especificaciones técnicas más relevantes se encuentran consignadas en la Tabla 3.4. En el apéndice 2 se calcula la potencia de las bombas para determinar que las seleccionadas son las apropiadas.

Tabla 3.4. Ficha Técnica Bomba Aqua Pak AP-5 (Aqua Pak, 2007)

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS		DATOS DE CONSTRUCCIÓN		
Bomba de turbina tipo periférica		Cuerpo de hierro fundido		
Interruptor a prueba de agua		Impulsor bronce con álabes periféricos radiales		
Motor cerrado		Sello mecánico de cerámica y grafito		
Enfriado por aire		Motor soporta variaciones de voltaje		
Servicio continuo		Protección térmica		
CURVA DE OPERACIÓN				
<p>The graph displays the operational characteristics of the Aqua Pak AP-5 pump. The x-axis represents flow rate in Galones por minuto (GPM), ranging from 0 to 11.8. The y-axis represents head in Metros, ranging from 0 to 50. A blue line shows a linear relationship, starting at approximately 45 meters head at 0 GPM and decreasing to 0 meters head at 11.8 GPM.</p>				
CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN				
MODELO	kw	HP	Fases x voltios	Presión al cierre m/psi
AP-5	0.31	0.5	1 x 127	45/64

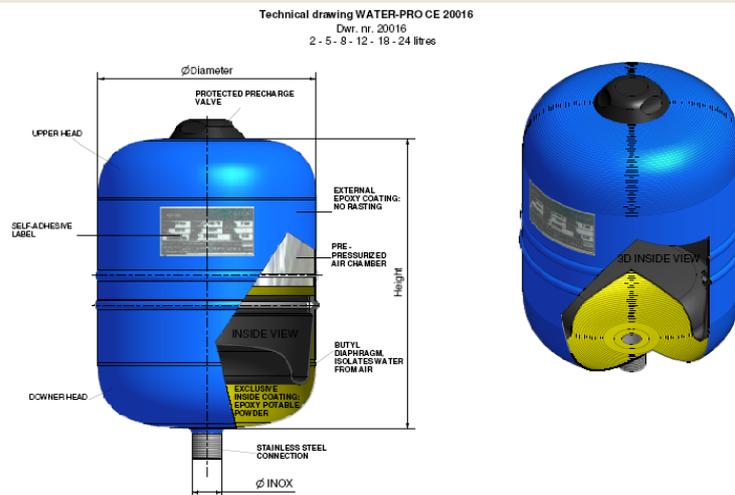


GASTO (L/min)				
20 psi	30 psi	40 psi	50 psi	60 psi
14 m	21 m	28m	35 m	42 m
30	23	15	7	2

- Hidroneumático: consta de dos partes un tanque de presurización (Zilmet) y una bomba Pedrollo (Tabla 3.5).

Tabla 3.5. Ficha técnica del hidroneumático (Zilmet, 2007)

TANQUE DE PRESURIZACIÓN			
CAPACIDAD	DIÁMETRO	ALTURA	PRESIÓN MÁXIMA TRABAJO
24 L	300 mm	333 mm	10 Bar



BOMBA			
GASTO	ALTURA MÁXIMA	ALTURA MÍNIMA	POTENCIA
5 ÷ 40 L/min	40 m	5 m	0.5 Hp



- Módulos: tiene dos componentes principales, el housing (cuerpo del módulo que contiene el cartucho) y el cartucho. Se fabricaron en polipropileno copolímero random bicapa ya que es un material que no se corroe, soporta la presión del agua, es resistente a los golpes y maleable (Figura 3.6).



Figura 3.6. Módulo de ultrafiltración

- Entradas: son dos, una suministra agua a los módulos y la otra recibe el rechazo de éstos (Figura 3.7).
- Accesorios: permiten la unión de las diferentes piezas y su correcto funcionamiento.

En la Figura 3.7 se muestra el equipo construido con los elementos mencionados anteriormente.

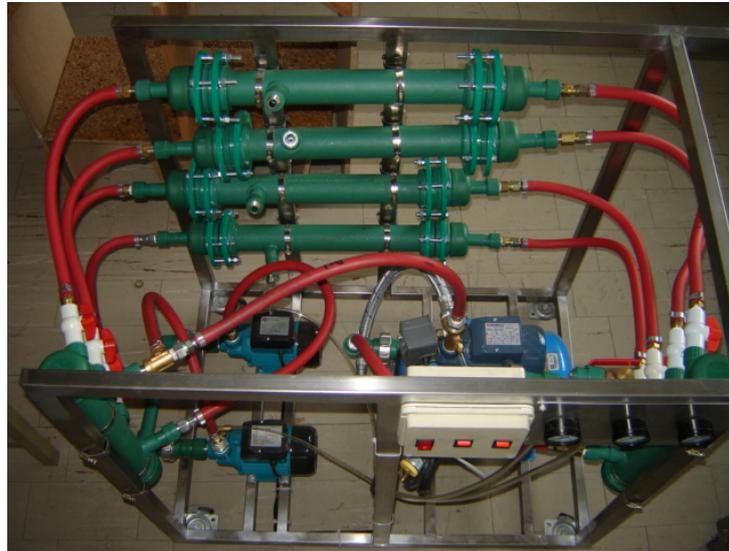


Figura 3.7. Prototipo

3.4.3 Pruebas hidráulicas

El equipo funciona cuando el agua es guardada en el tanque de almacenamiento (200 L de capacidad) y es bombeada (bombas 2 y 3) hacia cuatro módulos de filtración en paralelo, donde pasa por dos manómetros de control que registran la presión del sistema. Al entrar a los módulos se obtiene el permeado que es almacenado en el tanque de permeado el cual es aforado, y el rechazo es recolectado en un sólo punto; se monitorea su presión y es enviado nuevamente al tanque de almacenamiento para ser recirculada (Figura 3.8).

Durante la experimentación solamente se tubo en operación un módulo, por lo tanto, al terminar la corrida de un cartucho se procedió a iniciar la siguiente prueba con el subsecuente módulo, el cual, ya tenía previamente montado y ensamblado un nuevo cartucho; esta metodología facilitó la realización de las pruebas.

Antes de realizar los correspondientes ensayos, se verificó que cada uno de los accesorios estuviera correctamente montado, ensamblado y que existiera completa hermeticidad.



Se comprobó que las válvulas respondieran apropiadamente, los manómetros registraran lecturas reales y las bombas operaran adecuadamente. También se revisó que las piezas ensambladas del módulo (housing), tapas del módulo y difusor quedaran correctamente pegadas y selladas.

Esta etapa tuvo una duración de cuatro meses, en los cuales se ensayaron diferentes tipos de pegamentos y técnicas de sellado sobre los módulos, ya que están contruidos en tubo plus, el cual, es un material que se une por termofusión; también se hicieron adaptaciones del equipo a las condiciones propias del laboratorio. Igualmente se efectuó la misma clase de ensayos para el embobinado de los cartuchos con la adición de tipos de materiales ya que los propuestos inicialmente no dieron los resultados esperados.

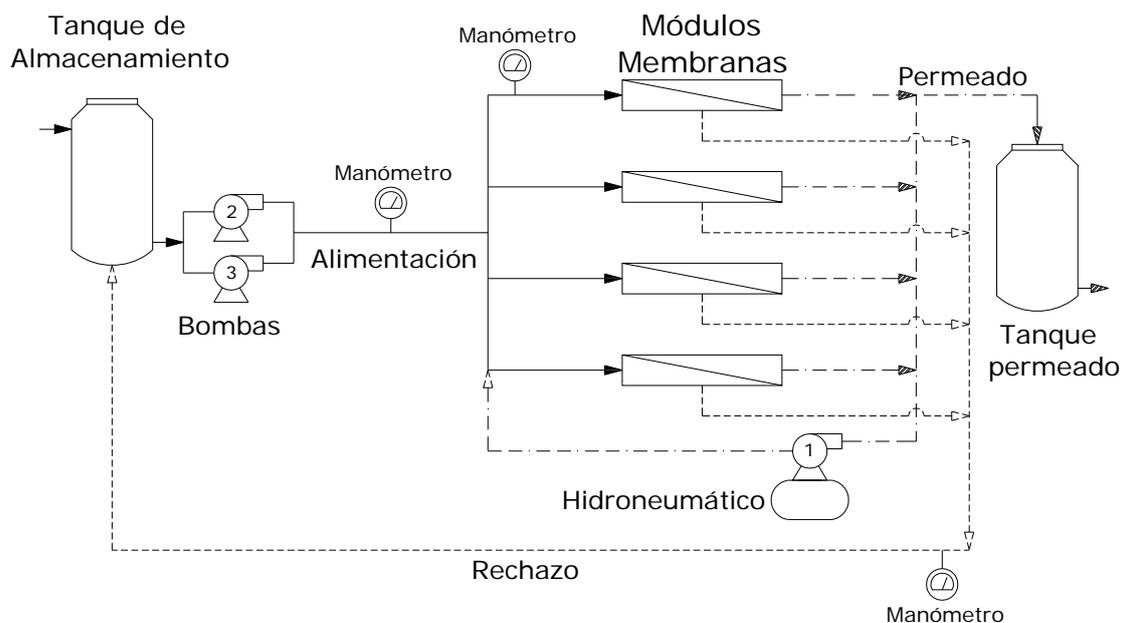


Figura 3.8. Esquema del equipo de ultrafiltración

3.5 Evaluación del prototipo

Para estimar el efecto de la presión sobre el flux durante los ensayos, el equipo se operó a 100, 200, 300 y 400 kilopascales. Posteriormente se probaron los cartuchos embobinados a cada una de estas presiones junto con la evaluación de la calidad del agua. Adicionalmente se llevó un control de las



variables de operación con el objetivo de evaluar la vida útil de la membrana. Este procedimiento definió la metodología de operación del sistema.

La evaluación de la operación para cada presión de trabajo establecida dependió de la calidad del agua, el volumen diario de agua a emplear, uso del filtro de arena y las válvulas de control.

3.5.1 Calidad del agua

Se garantizó que el pH estuviera en un valor de siete (± 0.5), ya que las características físicas y mecánicas de la membrana dependían de ello, así como el correcto funcionamiento de cada uno de los componentes del prototipo. También se incluyeron otros parámetros fisicoquímicos para el agua de alimentación, rechazo y permeado. En la Tabla 2.2 están los parámetros determinados para cada uno de los ensayos finales.

Tabla 3.6. Parámetros de calidad analizados

Una vez por ensayo
DOO
SS
SD
Conductividad eléctrica
Color
Coliformes fecales
Turbiedad
pH
Temperatura

3.5.2 Volumen de agua

Para una jornada diaria de trabajo se gastaron 200 L de agua proveniente de la planta de tratamiento de ciudad universitaria, la cual se tomaba antes de la cloración y después de los filtros para evitar variación en los resultados.



3.5.3 Filtro de arena

Toda el agua que se usó se filtró antes de ser usada en el prototipo de ultrafiltración, para homogeneizar el contenido de sólidos, turbiedad, microorganismos y color.

3.5.4 Válvulas de control

Estas válvulas son de esfera y permiten el paso de agua de alimentación y rechazo, así como el control de la presión durante las corridas.



4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Permeabilidad de la membrana

Estos ensayos se efectuaron a 100, 200, 300, 400 y 500 kPa con tres repeticiones para cada presión. El total de pruebas realizadas fue de quince y la duración de cada una fue de cuatro horas con una temperatura promedio de 32 °C. La memoria de cálculo se encuentra en el apéndice 3.

La permeabilidad de la membrana se determinó por medio de la ley de Darcy (Ecuación 2.1), donde la permeabilidad hidráulica (k_p) es el inverso del coeficiente de resistencia (R_M) y μ es la viscosidad del permeado (no de la alimentación: la relación de **Hagen-Poiseuille** es para flujo de fluidos a través de canales; en el caso de la membrana, el canal es el poro) y usualmente se incluye con el valor de k_p (Cheryan, 1998)

$$J = \frac{P}{R_M} \Rightarrow y = mx$$

$$k_p = \frac{1}{R_M}$$

De acuerdo al análisis anterior, se graficó cada uno de los flux obtenidos a las diferentes presiones y se ajustaron los valores a un modelo lineal para obtener la pendiente, que es la permeabilidad hidráulica (Figura 4.1). El valor de la permeabilidad de la membrana fue 0.35 kPa m⁻² h⁻¹.

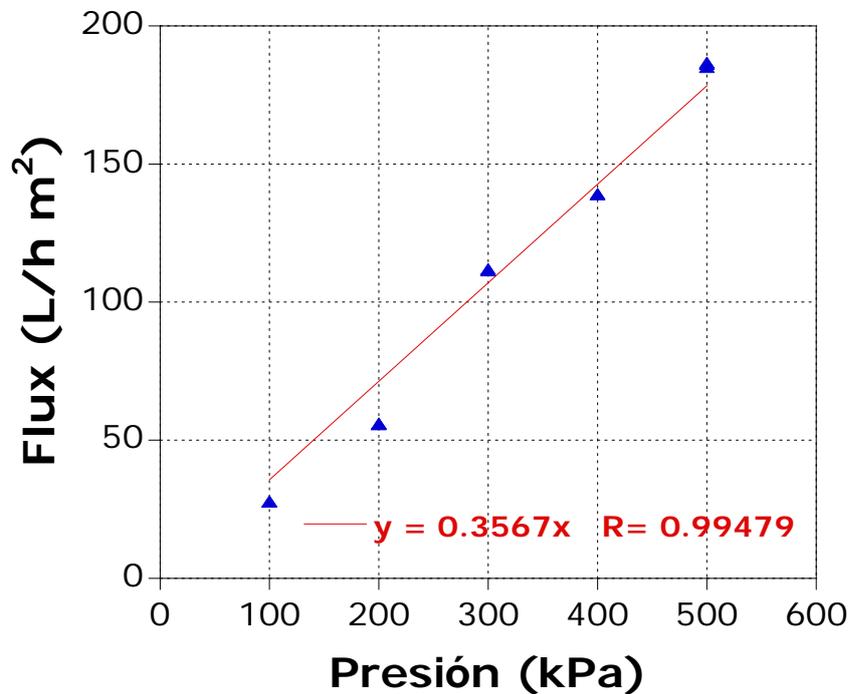


Figura 4.1. Permeabilidad hidráulica membrana

4.2 Caracterización del agua

Con el fin de caracterizar el agua empleada se compararon los resultados obtenidos en laboratorio con las especificaciones de la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994 (Modificación, 2000) la cual establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional. En la Tabla 2.1 se puede observar que el valor de sólidos disueltos y pH cumplen con la norma NOM-127-SSA1-1994, sin embargo, el color, coliformes fecales y turbiedad la exceden.

Es importante aclarar que durante los ensayos a 200, 300 y 400 kPa se tomaron las muestras para el análisis de calidad al momento de detectar la ruptura del cartucho y que el parámetro de turbiedad no es analizado, debido a que no presentó remoción en ninguno de los ensayos realizados.



Tabla 4.1. Calidad del agua de la PTAR de Ciudad Universitaria

PARÁMETRO	ALIMENTACIÓN	NOM-127-SSA1-1994	UNIDADES
DQO	122	-	mg/L
SS	15	-	mg/L
SD	565	1000	mg/L
Conductividad eléctrica	1059	-	μ S
Color	179	20	UC(Pt-Co)
Coliformes fecales	29×10^3	cero	UFC/100
Turbiedad	31	5	(FTU)
pH	8	6.5 y 8.5	Unidades
Temperatura	19	-	$^{\circ}$ C

4.2.1 Demanda química de oxígeno

Los valores de demanda química de oxígeno para el agua de alimentación y permeado obtenidos a cada una de las presiones de trabajo se muestran en la Tabla 4.2. Se observó que la menor concentración de DQO en el permeado fue de 86 mg/L a una presión de 300 kilopascales.

Tabla 4.2. Resultados DQO

Presión (kPa)	DQO (mg/L)		RECHAZO
	Alimentación	Permeado	
100	115.73	85.64	26%
200	124.77	96.07	23%
300	128.58	104.15	19%
400	118.86	91.52	23%

En la Figura 4.2 se representan gráficamente los resultados de DQO. Se encontró que el mayor porcentaje de remoción es 26% a 100 kilopascales.

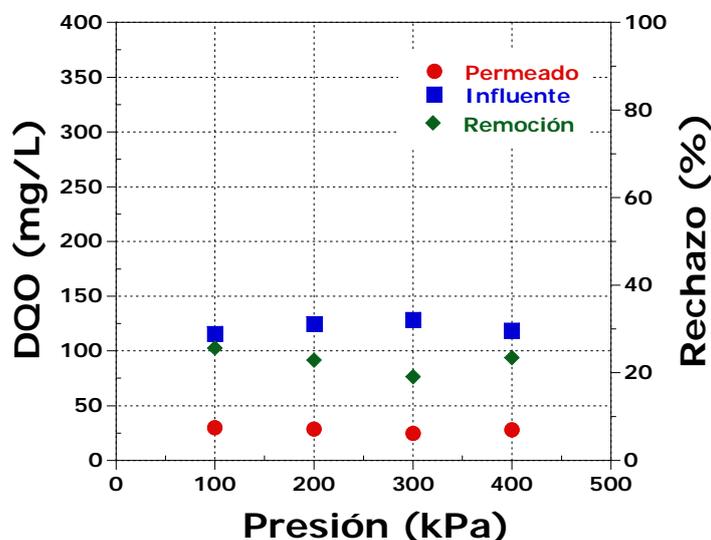


Figura 4.2. Gráfica de resultados DQO

4.2.2 Sólidos suspendidos

Los sólidos suspendidos son consecuencia de partículas coloidales y material no disuelto (Romero, 1990) que son retenidas en la membrana, por lo cual el permeado presenta una mejor calidad. Los valores de sólidos suspendidos para el agua de alimentación y permeado obtenidos a cada una de las presiones de trabajo se muestran en la Tabla 4.3. Se observó que la menor concentración de sólidos suspendidos en el permeado fue 300 kPa.

Tabla 4.3. Resultados SS

Presión (kPa)	SS (mg/L)		RECHAZO
	Alimentación	Permeado	
100	19.45	10.89	44%
200	17	12.07	29%
300	15.50	9.77	37%
400	16	12.48	22%

En la Figura 4.3 se representan gráficamente los valores de SS para el agua de alimentación y el permeado con su correspondiente remoción. Se encontró que el mayor porcentaje de remoción fue a 100 kPa con 44 %.

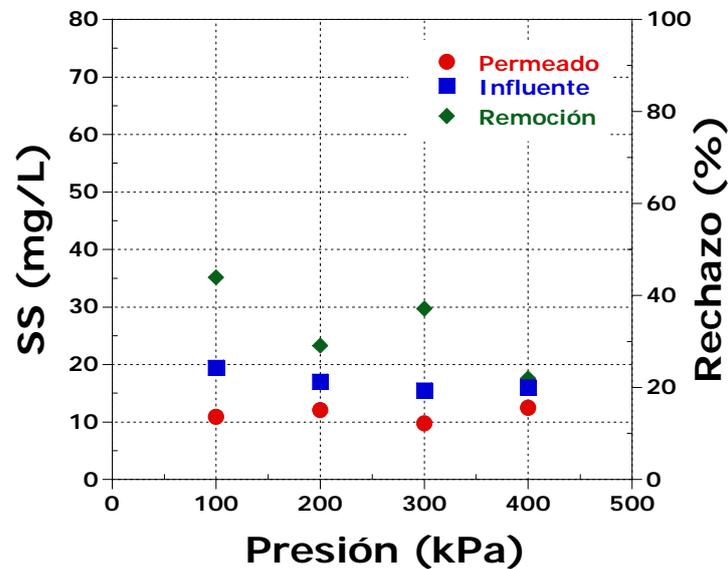


Figura 4.3. Gráfica de resultados SS

4.2.3 Sólidos disueltos

De acuerdo con la norma NOM-127-SSA1-1994 la concentración de sólidos disueltos en el agua de alimentación está por debajo del límite establecido. Sin embargo, la ultrafiltración no remueve sólidos disueltos debido al tamaño de poro de la membrana (Tabla 4.4).

Tabla 4.4. Resultados SD

Presión (kPa)	SD (mg/L)		RECHAZO
	Alimentación	Permeado	
100	653	646.47	1%
300	679	651.84	4%

4.2.4 Conductividad eléctrica

La conductividad del agua depende de la concentración total de sustancias disueltas ionizadas en el agua (Romero, 1990). Por lo tanto no se espera una reducción significativa en la conductividad debido al tamaño de poro de la membrana (Tabla 4.5).



Tabla 4.5. Resultados conductividad

Presión (kPa)	CE (μs)		RECHAZO
	Alimentación	Permeado	
100	956	908.20	5%
400	1097	1075.06	2%

4.2.5 Color

El color en el agua existe principalmente por efecto de partículas coloidales (Romero, 1999). La mayor eficiencia se logró a 100 kPa con 116 unidades de color (Pt-Co) lo cual excede la norma NOM-127-SSA1-1994 (Tabla 4.6).

Tabla 4.6. Resultados color

Presión (kPa)	Color UC(Pt-Co)		RECHAZO
	Alimentación	Permeado	
100	143	115.83	19%
300	178	151.30	15%
400	224	201.60	10%

En la Figura 4.4 se representa gráficamente los valores de color.

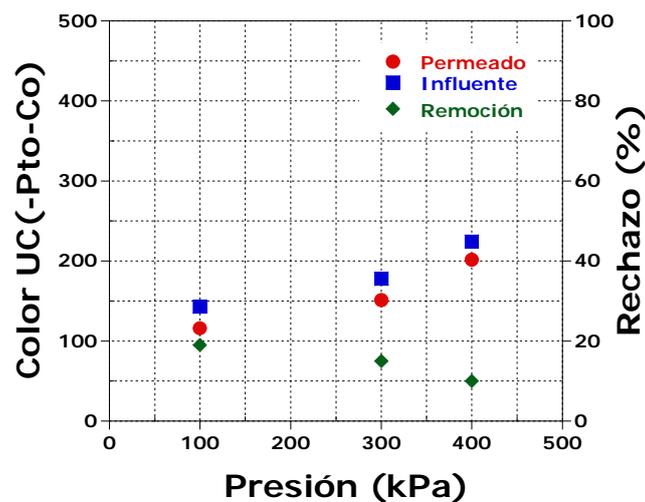


Figura 4.4. Resultados color



4.2.6 Coliformes fecales

Los resultados obtenidos durante los ensayos se muestran en la Tabla 4.7 donde hubo una remoción de 100 % en todas las presiones evaluadas. Al comparar los valores con la norma NOM-003-SEMARNAT-1997 se cumple con el límite permitido.

Tabla 4.7. Resultados coliformes

Presión (kPa)	Coliformes Fecales (UFC/ml)		RECHAZO
	Alimentación	Permeado	
100	28×10^3	0	100%
200	26×10^3	0	100%
300	29×10^3	0	100%
400	34×10^3	0	100%

4.2.7 pH

En el parámetro de pH se observó lo siguiente (Tabla 4.8)

Tabla 4.8. Resultados pH

Presión (kPa)	pH (unidades)	
	Alimentación	Permeado
100	7.80	7.70
200	7.30	7.20
300	7.50	7.60
400	7.40	7.30

No presentó cambios importantes y se mantuvo en el intervalo establecido por la NOM-127-SSA1-1994 (Figura 4.5).

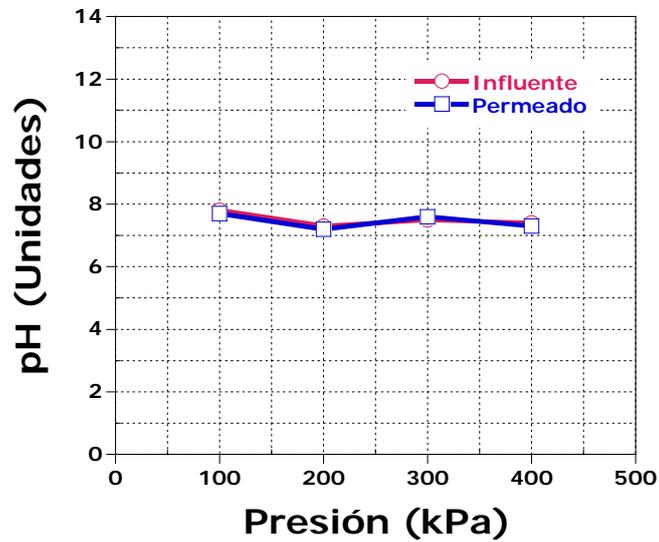


Figura 4.5. Resultados pH

4.2.8 Temperatura

En la temperatura se observó lo siguiente:

Tabla 4.9. Resultados temperatura

Presión (kPa)	Temperatura ($\Delta^{\circ}\text{C}$)	
	Alimentación	Permeado
100	19	22
200	19	26
300	18	24
400	19	26

En la Figura 4.6 se observa que la temperatura osciló en ± 2 grados centígrados, siendo más constante la temperatura del alimentación que la del permeado.

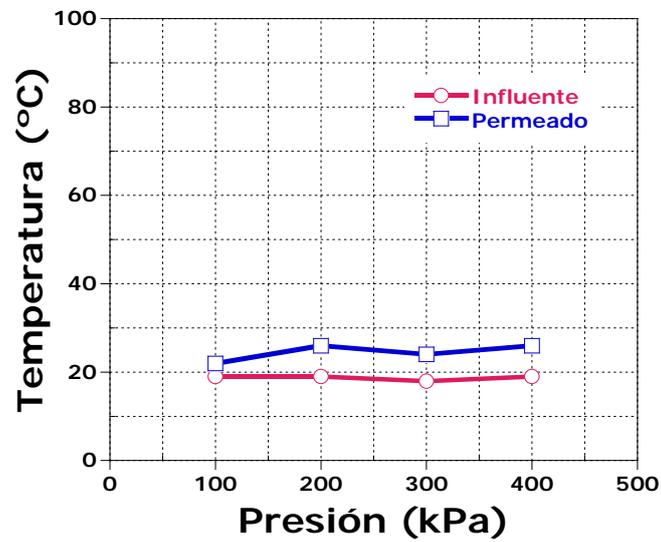


Figura 4.6. Gráfica de resultados temperatura

4.2.9 Balance de masa

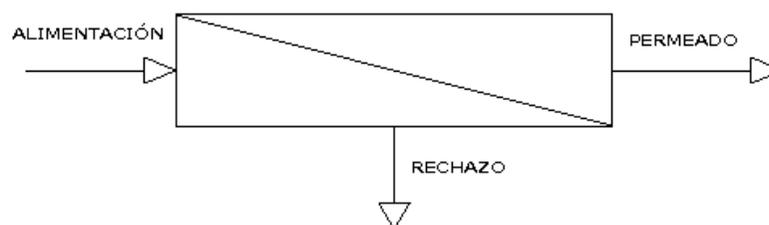
Se realizó un balance de masa a cada una de las presiones para DQO, SS, color y coliformes fecales para ver el comportamiento del cartucho frente a los parámetros estudiados (Figura 4.7 y Figura 4.8).



CAPÍTULO 4: Resultados y discusión

Q	63.38	L/h
DQO	0.176	kg/d
SS	0.030	kg/d
Color	143	UC(Pt-Co)
Coliformes fecales	28000	UFC/ml

100 kPa

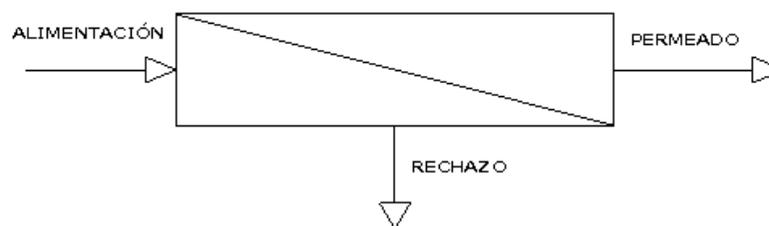


Q	57.84	L/h
DQO	0.165	kg/d
SS	0.028	kg/d
Color	27.170	UC(Pt-Co)
Coliformes fecales	28000	UFC/ml

Q	5.54	L/h
DQO	0.01	kg/d
SS	0.001	kg/d
Color	116	UC(Pt-Co)
Coliformes fecales	0	UFC/ml

Q	254.8	L/h
DQO	0.763	kg/d
SS	0.104	kg/d
Coliformes fecales	26000	UFC/ml

200 kPa



Q	213.99	L/h
DQO	0.669	kg/d
SS	0.092	kg/d
Coliformes fecales	26000	UFC/ml

Q	40.76	L/h
DQO	0.09	kg/d
SS	0.012	kg/d
Coliformes fecales	0	UFC/ml

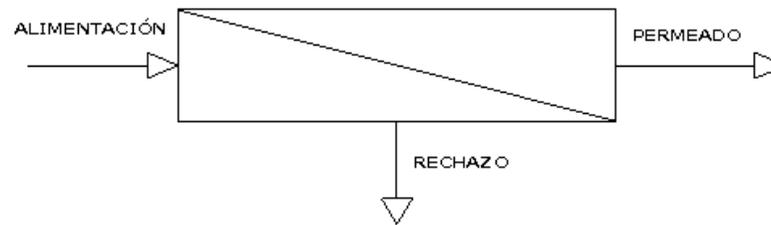
Figura 4.7. Balance de masa a 100 y 200 kPa



CAPÍTULO 4: Resultados y discusión

Q	296.3	L/h
DQO	0.914	kg/d
SS	0.110	kg/d
Color	178	UC(Pt-Co)
Coliformes fecales	29000	UFC/ml

300 kPa

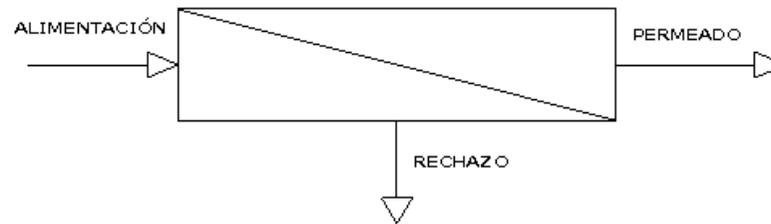


Q	228.15	L/h
DQO	0.744	kg/d
SS	0.094	kg/d
Color	26.700	UC(Pt-Co)
Coliformes fecales	29000	UFC/ml

Q	68.15	L/h
DQO	0.17	kg/d
SS	0.016	kg/d
Color	151	UC(Pt-Co)
Coliformes fecales	0	UFC/ml

Q	471.2	L/h
DQO	1.344	kg/d
SS	0.181	kg/d
Color	224	UC(Pt-Co)
Coliformes fecales	34000	UFC/ml

400 kPa



Q	348.63	L/h
DQO	1.075	kg/d
SS	0.144	kg/d
Color	22.400	UC(Pt-Co)
Coliformes fecales	34000	UFC/ml

Q	122.5	L/h
DQO	0.27	kg/d
SS	0.037	kg/d
Color	202	UC(Pt-Co)
Coliformes fecales	0	UFC/ml

Figura 4.8. Balance de masa a 300 y 400 kPa



4.3 Diseño del filtro de arena

4.3.1 Prueba granulométrica

Con esta prueba se determinó el coeficiente de uniformidad, concavidad y el tamaño de las partículas. Se tamizó la grava para establecer un diámetro comprendido entre 2 y 4.76 mm (tamiz ocho y cuatro) y la arena en un rango de 0.24 a 1 mm (tamiz 60 y 18). Los valores obtenidos durante la prueba se consignan en la Tabla 4.10 y su representación grafica en la Figura 4.9.

Tabla 4.10. Resultados de la prueba granulométrica

TAMIZ N°	ABERTURA TAMIZ (mm)	SUELO RETENIDO (g)	RETENIDO (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	PASA (%)
18	1.0000	2.02	0.96%	0.96%	99.04%
20	0.8407	30.32	14.43%	15.39%	84.61%
30	0.5943	82.83	39.42%	54.81%	45.19%
40	0.4191	58.59	27.88%	82.69%	17.31%
50	0.2971	20.21	9.62%	92.31%	7.69%
60	0.2489	11.11	5.29%	97.60%	2.40%
100	0.1498	4.04	1.92%	99.52%	0.48%
Fondo	-	0.00	0.001%	99.52%	0.48%

Para determinar el coeficiente de uniformidad, se obtuvo la relación entre el D₆₀ (tamaño tal que el 60 % en peso del suelo sea igual o menor) y el D₁₀ (diámetro efectivo tal que sea igual o mayor que el 10 % en peso del suelo) leídos en la Figura 4.9, por lo tanto:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0.68\text{mm}}{0.33\text{mm}} = 2$$

En realidad la relación anterior es un coeficiente de no uniformidad, ya que su valor numérico decrece cuando la uniformidad aumenta, por consiguiente, los suelos con $C_u < 3$ se consideran muy uniformes; aun las arenas naturales



muy uniformes rara vez presentan $C_u < 2$. Por lo tanto la arena empleada es uniforme al obtenerse un valor de 2.

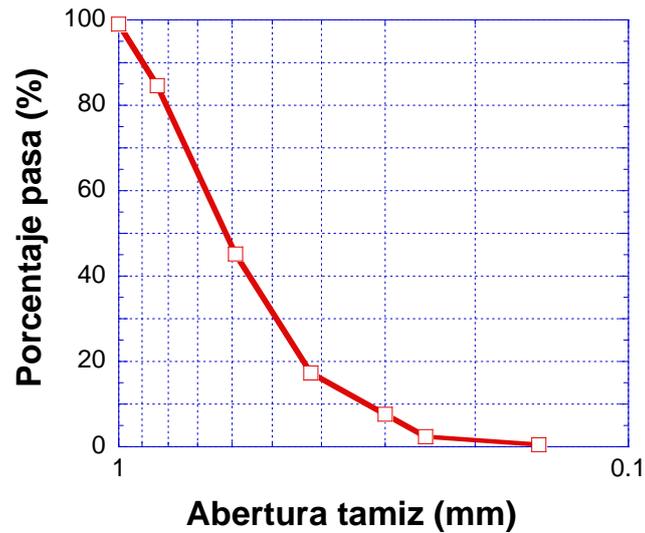


Figura 4.9. Curva granulométrica

4.3.2 Coeficiente de permeabilidad

Esta prueba consistió en establecer una longitud (L) y un área transversal (A) con una carga hidráulica constante (h) y observar el tiempo que tardaba en pasar 20 L de agua a través del medio empleado. Aplicando la ley de Darcy se tiene que:

$$V = k_p \times A \times h_L \times t^\circ \tag{Ecuación 4.1}$$

Donde:



$V =$ volumen, $[m^3]$

$h_L = \frac{l}{L}$

$l =$ carga hidráulica constante, $[m]$

$t^\circ =$ tiempo, $[s]$

Por lo tanto el coeficiente se obtiene así:

$$k_p = \frac{V \times L}{l \times A \times t^\circ} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Los ensayos se efectuaron con tres cargas hidráulicas diferentes, 1.45, 1.63 y 1.81 m; se estableció un volumen de veinte litros y el tiempo que tardaba en llenarse cada litro para un total de veinte lecturas. Los valores de permeabilidad obtenidos para los ensayos anteriores son los mostrados en el apéndice 4.

Se procedió a graficar los coeficientes obtenidos (Figura 4.10) para las diferentes cargas hidráulicas, ajustando una línea de tendencia de tipo lineal para obtener la pendiente, la cual, viene siendo el coeficiente de permeabilidad de acuerdo al siguiente planteamiento:

$$\frac{Q}{A} = k \frac{h_L}{L}; \text{ donde } k = 0.89 \frac{m}{h} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

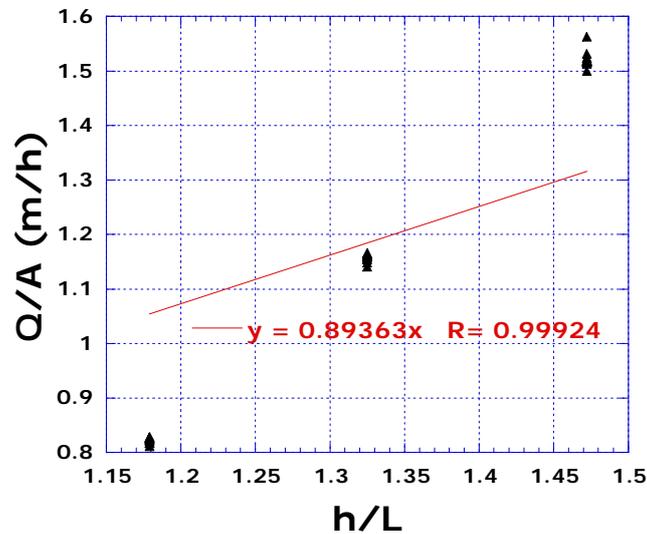


Figura 4.10. Coeficiente de permeabilidad

Como el coeficiente de permeabilidad para el filtro de arena es de 0.89 m/h ($2,47 \text{ E}^{-2} \text{ cm/s}$), esto permite establecer que tiene buen drenaje, el tipo de arena empleada es limpia y que la determinación de la permeabilidad por el método de carga constante fue el apropiado (Tabla 4.11).

4.3.3 Construcción del filtro de arena

Se empleó un tubo cilíndrico de acrílico con un diámetro de 0.25 m y una altura de 1.9 metros. La carga hidráulica máxima de operación es 1.6 m, la capa de arena es de 1.02 m, la de grava de 0.21 m y un falso fondo de 0.04 metros. Sus principales componentes son: una bomba de 0.5 Hp, bomba peristáltica, cuatro válvulas y dos tanques para almacenamiento.

Su funcionamiento comienza cuando el agua a filtrar es almacenada en el tanque uno (1) y bombeada al filtro por medio de la bomba peristáltica; se abre V1, V2 y V3, se cierra la válvula V4 y V5 y el agua filtrada es guardada en el tanque dos (2).

El sistema de limpieza se realiza por retrolavado. Se cierra V3 y se abren V5, V4, V2 y V1 y se inyecta agua por medio de la bomba y con ayuda de la bomba peristáltica se evacua el agua sucia al tanque 1 (Figura 4.11).



Tabla 4.11. Pruebas de permeabilidad factibles de acuerdo al tipo de suelo

	k, en cm/seg (escala logarítmica)											
	10^2	10^1	10^0	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
PROPIEDADES DE DRENAJE	BUENO						MALO			PRACTICAMENTE IMPERMEABLE		
APLICACIÓN EN PRESAS DE TIERRA Y DIQUES	Secciones permeables de presas y diques						Secciones impermeables de presas y diques					
TIPOS DE SUELOS	Grava limpia		Arenas limpias Arenas limpias y mezclas de grava			Arenas muy finas, limos orgánicos e inorgánicos. Mezclas de arena, limo y arcilla morena glaciár, depósitos estartificados de arcilla, etc.				Suelos impermeables Arcillas homogéneas a la intemperie		
							Suelos impermeables modificados por los efectos de la vegetación e intemperie					
DETERMINACIÓN DIRECTA DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD	Prueba directa del suelo en su estado natural (prueba de bombeo) Segura si se hace correctamente. Se requiere bastante experiencia.											
	Permeámetro de carga constante. Se requiere poca experiencia.											
DETERMINACIÓN INDIRECTA DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD	PERMEÁMETRO DE CARGA VARIABLE											
	SEGURO			INSEGURO				RELATIVAMENTE SEGURO				
	No se requiere mucha experiencia			Se requiere mucha experiencia				Se requiere mucha experiencia				
	Cálculo por medio de la distribución del tamaño del grano (vg fórmula de Hazen). Aplicable solamente en arenas y gravas limpias y sin cohesión.						Cálculo por medio de pruebas de consolidación. Se requiere equipo de laboratorio costoso. Requiere mucha experiencia.					
				PRUEBA DE CAPILARIDAD HORIZONTAL Se requiere poca experiencia, útil para pruebas rápidas en campo								
	$C10^6$	$C10^5$	$C10^4$	$C10^3$	$C10^2$	$C10^1$	$C10^0$	$C10^{-1}$	$C10^{-2}$	$C10^{-3}$	$C10^{-4}$	$C10^{-5}$
	k, en m/año (escala logarítmica)											

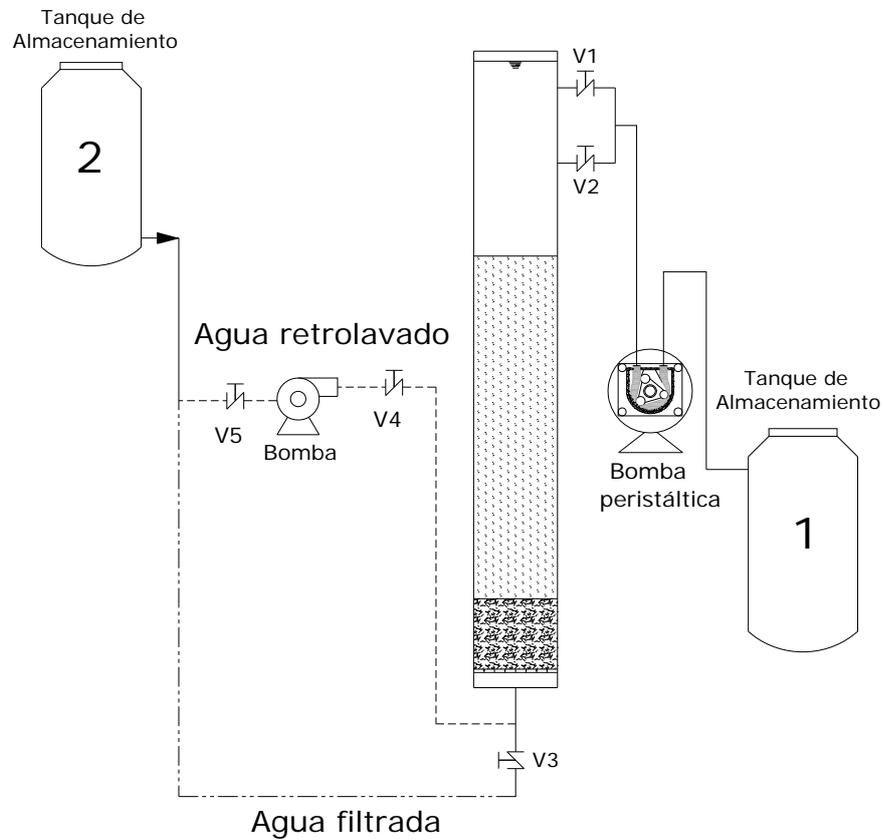


Figura 4.11. Filtro de arena

4.4 Prototipo de ultrafiltración

4.4.1 Pruebas hidráulicas

Antes de realizar los correspondientes ensayos experimentales, se verificó que cada uno de los componentes no presentara fugas y que las piezas usadas estuvieran en perfectas condiciones.

- Hidroneumático: logra una presión máxima de operación de 360 kPa y la presión mínima obtenida es de 220 kilopascales. Consta de un motor de 0.5 Hp el cual es denominado bomba 1 (Figura 4.12).



Figura 4.12. Hidroneumático

- Bomba 2: suministra una presión de 120 kPa (Figura 4.13)



Figura 4.13. Bomba 2

- Bomba 3: Por ser igual a la bomba dos, la presión suministrada es la misma (Figura 4.14).



Figura 4.14. Bomba 3

Al momento de realizar las pruebas la presión mínima de operación alcanzada en el sistema con la bomba 2 y 3 en marcha fue de 250 kPa, sin embargo, con la válvula de compuerta manual se logró obtener una presión máxima de 400 kilopascales.

4.4.2 Pruebas de presión

Para realizar estos ensayos, se variaron los controles uno y dos de presión (Figura 4.15) del hidroneumático para verificar los rangos de operación del hidroneumático.



Figura 4.15. Controles de presión del hidroneumático



Por ser los controles tornillos comunes, las pruebas se realizaron contando el número de giros suministrados a cada uno (control 1 y 2 por separado) en un tiempo de dos minutos con un total de quince pruebas.

- Control 1: Se hicieron tres pruebas sobre éste, el cero se estableció alineando la tuerca con el inicio de la rosca del tornillo, contando a partir de este punto siete vueltas.
- Control 2: Se hicieron tres pruebas sobre éste, el cero se estableció alineando la tuerca con el inicio de la rosca del tornillo, contando a partir de este punto once vueltas.

Se concluyó que el prototipo suministra una presión máxima de 360 kPa (hidroneumático, bombas 2 y 3 encendidas), una intermedia de 260 kPa (bombas 2 y 3 encendidas) y baja de 100 kPa (solo una bomba encendida). Los resultados de los ensayos se consignan en el apéndice 5.

4.5 Evaluación del flux

4.5.1 Flux Preliminares

Se ensayaron cartuchos a través de pruebas preliminares con diferentes materiales y pegamentos seleccionados, con el objetivo de evaluar la calidad del permeado, cantidad de flux, tiempo de operación, hallar fugas, observar el desempeño de los componentes empleados al entrar en contacto con agua y ajustar las dimensiones del armado.

Estas pruebas se basaron en el tiempo requerido para llenar 40 L de permeado con un sólo módulo en operación con agua potable, lo anterior con el fin de observar su comportamiento individual. Las condiciones de armado de los cartuchos espirales fueron manuales, por lo tanto, se estableció una metodología para reducir al mínimo las interferencias y variaciones.

Como parámetros operacionales se tuvo en cuenta una presión constante de 100 kPa y algunas pruebas se descartaron por tener ruptura del cartucho durante el desarrollo de las mismas. Por criterio selectivo se encontró que los



resultados oscilan en un intervalo de 29.84 a 320 litro sobre hora por metro cuadrado.

En la Figura 4.16 se presenta el conjunto de todos los ensayos realizados, para los cuales, se observa que el 64 % de los datos presentan un flux de 30 a 103 L/h*m² y el 36 % presentaron fugas y rupturas. Los valores de cada gráfica se encuentran en el apéndice 5.

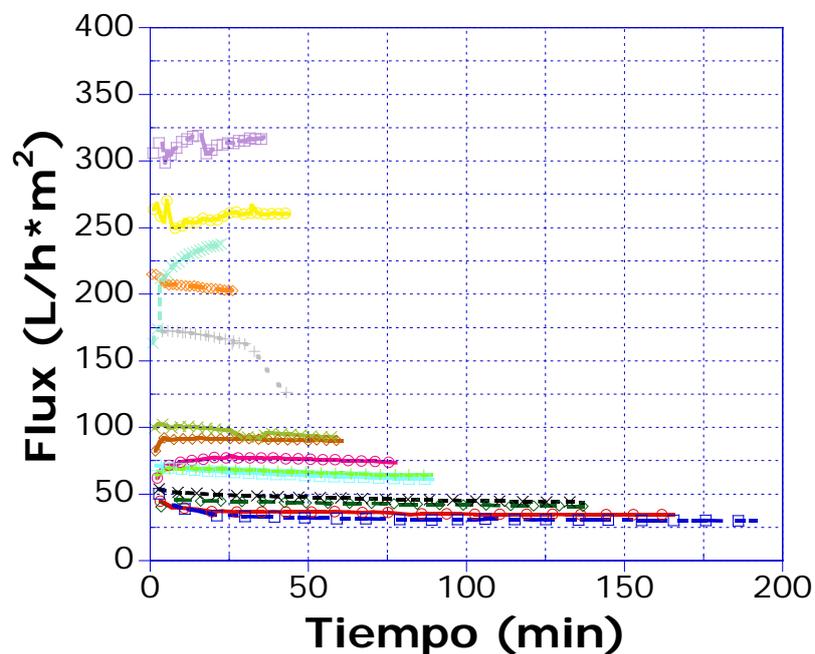


Figura 4.16. Permeado bajo, medio y alto

4.5.2 Flux de Ajuste

Durante esta etapa se empleó agua de la PTAR de ciudad universitaria, por lo tanto, se unificó el filtro de arena y el quipo de UF (Figura 4.18). La metodología empleada fue filtrar 200 L de agua residual tratada antes de la cloración y después del filtro y almacenarla en el tanque dos (2), del cual se suministraba al módulo de UF por medio de una de las bombas. La duración de las pruebas se basó en el tiempo que se empleaba para usar 400 L, debido a que no se realizó retrolavado de limpieza. La metodología empleada para determinar el flux fue la misma de las pruebas preliminares.



Los resultados de estas pruebas se indican en la y se observa que el intervalo de flux obtenido es de 36.02 a 94.4 L/h*m2.

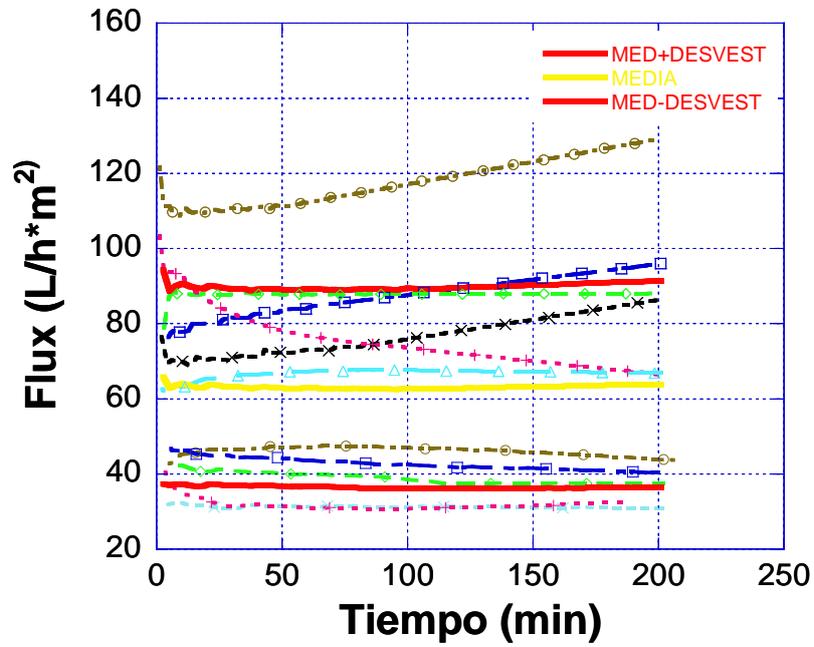
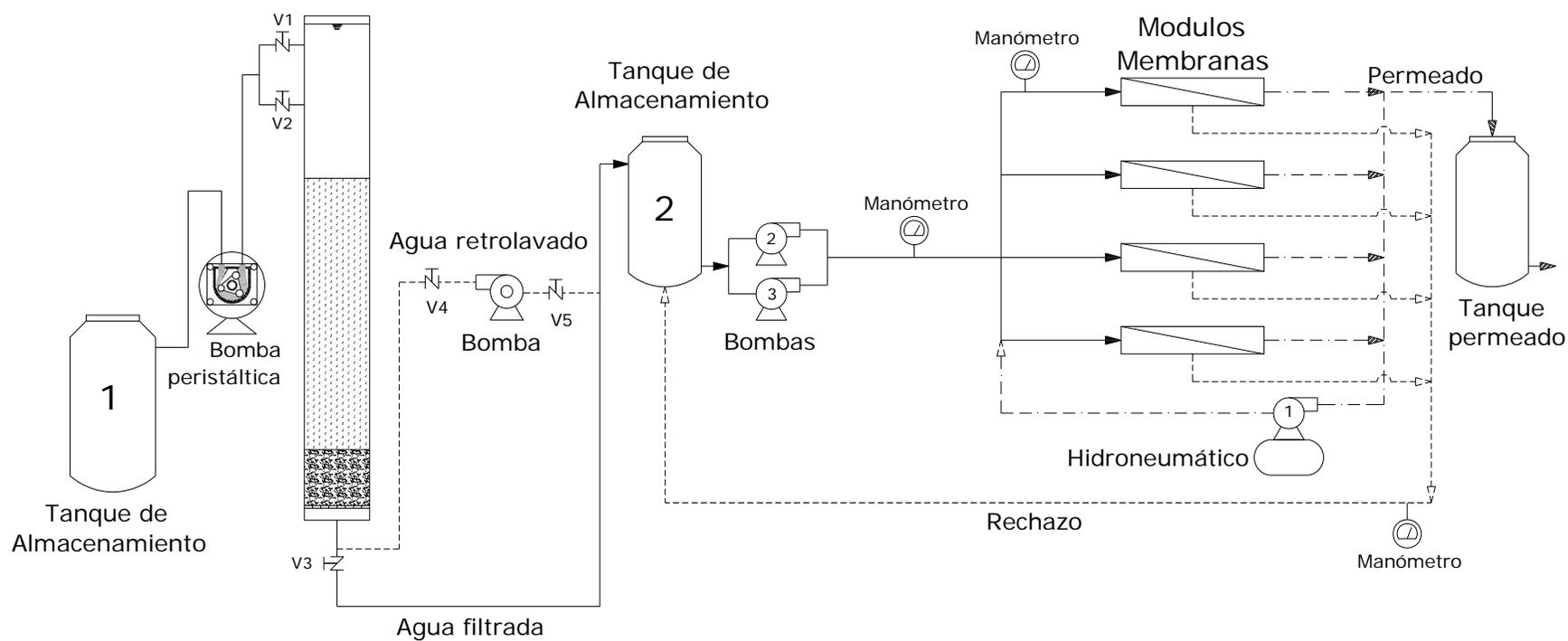


Figura 4.17. Pruebas de ajuste de los cartuchos



FILTRO DE ARENA

EQUIPO DE ULTRAFILTRACIÓN

Figura 4.18. Esquema completo equipo experimental



4.5.3 Flux preliminar vs. ajuste

El 29 % de las pruebas preliminares realizadas presentan un permeado bajo, el 36 % son permeado medio y el permeado alto presenta el mismo porcentaje que el anterior.

Durante los ensayos de ajuste a los cartuchos, se encontró que el 45 % de los ensayos están en un intervalo de flux de 62 a 94 L/h*m², sin embargo, el 27 % se encuentra entre 36 y 62 L/h*m².

Al comparar los intervalos de flux obtenidos durante las pruebas preliminares y de ajuste, se concluye que cambios como el uso de resina epóxica para el sello lateral de los cartuchos, la adición de un sello interno de silicona entre los separadores y la membrana, la instalación de cinchos plásticos y el recubrimiento final con hilo nylon, demostraron que el flux se redujo tres punto cinco (3.5) veces de los ensayos preliminares (Tabla 4.12).

Tabla 4.12. Flux preliminar y de ajuste

TIPO DE FLUX	INTERVALO	UNIDADES
Preliminares	17.46 – 218.76	L/h*m ²
Ajuste	36.02 – 94.4	L/h*m ²

También se observó que la velocidad aumenta un promedio de uno punto ocho (1.8) veces, cada vez que se cambia de presión de operación (Tabla 4.13).

Tabla 4.13. Parámetros operacionales de los cartuchos

ΔP (kPa)	v (m/h)	Flux (L/h*m ²)
100	0.013 – 0.064	13 – 77.14
200	0.022 – 0.13	22.13 – 139.37
300	0.035 – 0.23	35.37 – 234.58
400	0.059 – 0.44	59.36 – 440.09



4.5.4 Flux Final

Estas pruebas se realizaron de acuerdo a la metodología planteada en el flux de ajuste y sus resultados se muestran a continuación.

- 100 kPa

A esta presión el flux oscila en un intervalo de 81 y 15 L/h*m² (Figura 4.19). Se observan dos comportamientos: una rápida reducción inicial en la región de cero (0) a noventa (90) minutos y una disminución relativamente lenta comenzando en los noventa (90) minutos. El descenso brusco observado al principio se atribuye probablemente a la adsorción de especies coloidales y la acumulación de la capa de concentración de polarización. Sin embargo, el ensuciamiento interno debido al taponamiento del poro a una etapa temprana no puede ser eliminado. Ahora la baja declinación hacia un estado casi estacionario, tiende, a ser atribuido al ensuciamiento por el bloqueo del poro y la acumulación de la torta. El efecto del ensuciamiento se puede sobreponer a la concentración de polarización, el cual sigue siendo constante a través del tiempo.

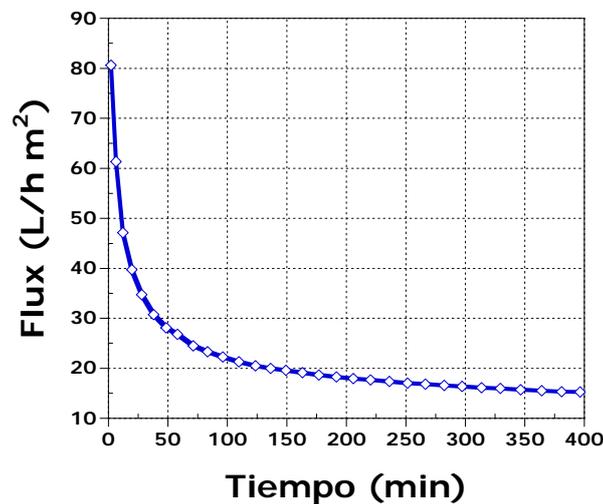


Figura 4.19. Valores de Flux a 100 kPa



- 200 kPa

A esta presión se observó que el flux comienza a aumentar después de sesenta minutos por presentar ruptura el cartucho (Figura 4.20).

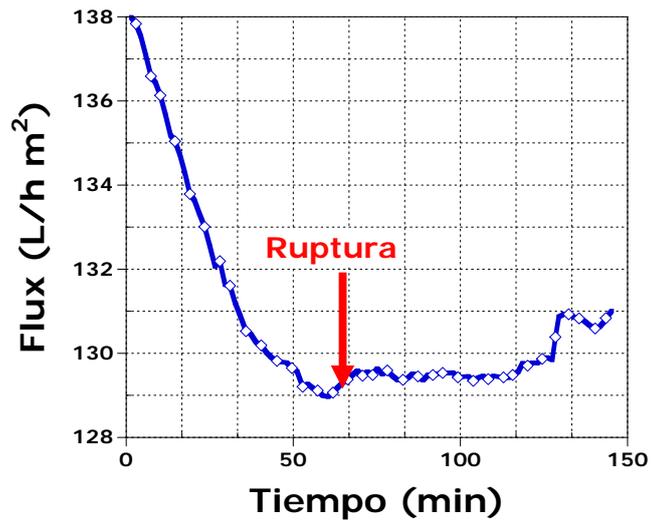


Figura 4.20. Valores de Flux a 200 kPa

- 300 kPa

Durante esta prueba se observó que el flux obtenido no era lo esperado, por lo tanto, se procedió a parar la prueba a los noventa y dos minutos por presentar una ruptura prematura a los veintiocho minutos de iniciada (Figura 4.21).

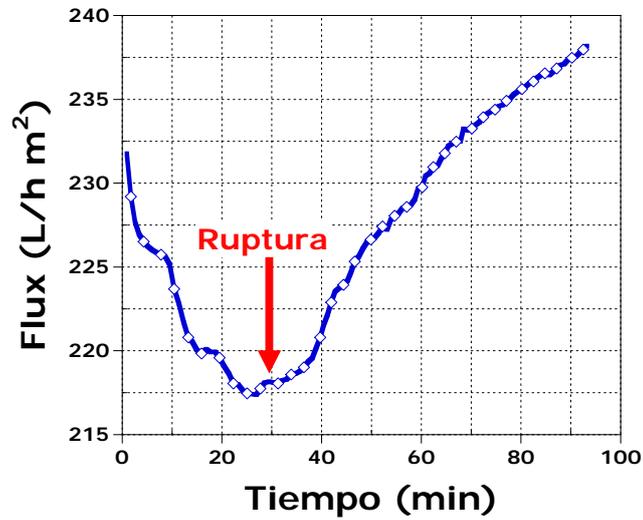


Figura 4.21. Valores de Flux a 300 kPa

- 400 kPa

A esta presión sucedió lo mismo que a 300 kPa, por lo que se detuvo a los ciento siete minutos de su inicio (Figura 4.22).

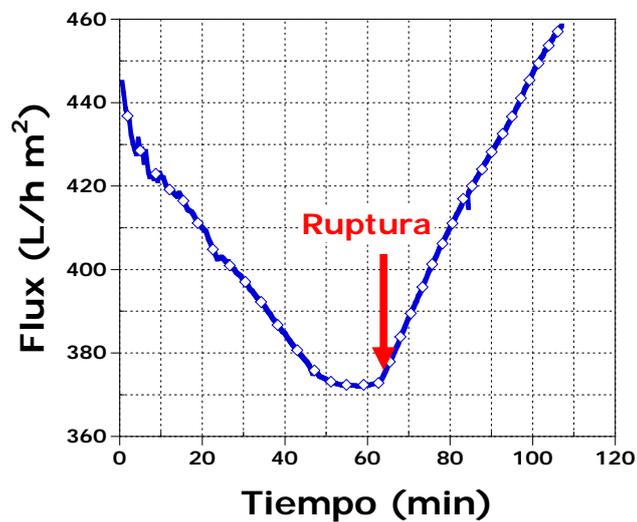


Figura 4.22. Valores de Flux a 400 kPa

A 200 y 400 kPa se observa una ruptura del cartucho al minuto sesenta (60), lo cual se ve reflejado en el aumento del flux. La prueba continuó por un



tiempo adicional esperando que esta falla fuera momentánea, pero las lecturas demostraron lo contrario. A 100 kPa se presenta una fuga a un tiempo muy corto de iniciado el ensayo (27 min) y se dio el mismo tratamiento que a las presiones anteriores obteniendo los mismos resultados.

Para determinar si la presión estaba controlada durante los ensayos, se hizo la relación entre flux del permeado y la presión a un tiempo establecido de veintidós (22) segundos y se encontró que son proporcionales, por lo tanto, la condición deseada se cumple (Figura 4.23).

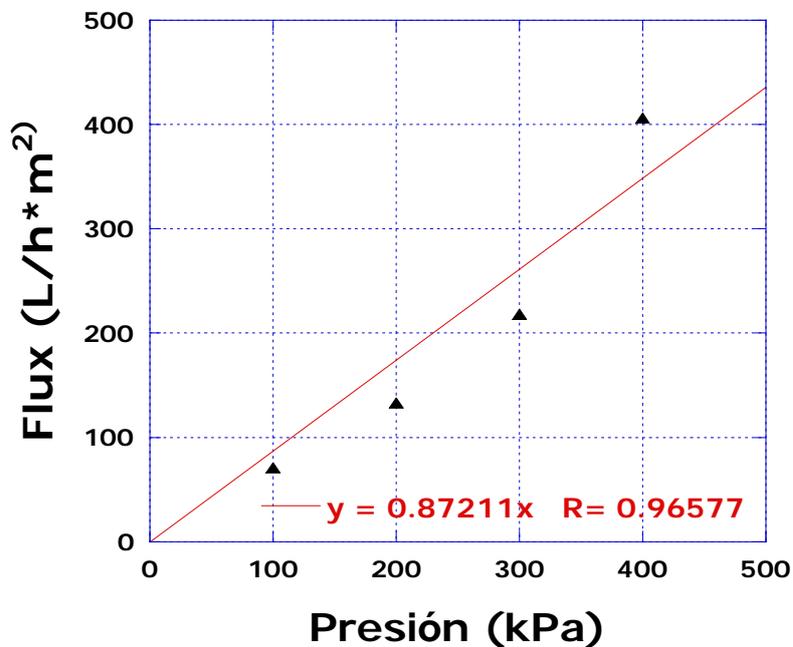


Figura 4.23. Flux de permeado en función de la presión

Se planteó un modelo de comportamiento entre el flux calculado por la ecuación de Hagen-Poiseuille y los valores del flux final y se encontró que el flux obtenido para las presiones de 100, 200 y 300 kPa con el equipo de UF se duplicó en comparación a los valores calculados, asimismo, se percibe que el flux para una presión de 400 kPa no está dentro de esta tendencia, por consiguiente no se tubo presente para la determinación de este análisis (Figura 4.24).

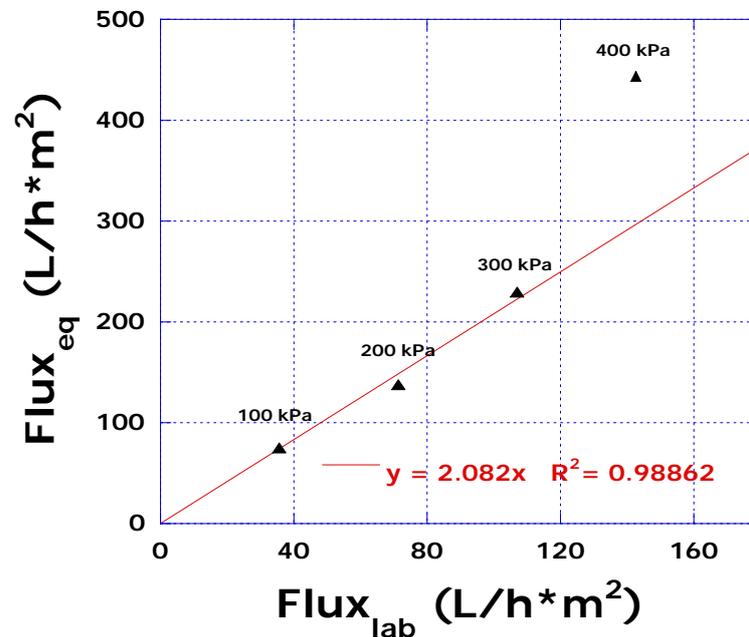


Figura 4.24. Comparación del flux obtenido en laboratorio y equipo de UF

De acuerdo al modelo de comportamiento encontrado la proporción hallada en la Figura 4.24, ésta se multiplicó por los datos de flux calculados con el equipo de laboratorio, obteniendo los siguientes valores:

- A 100 kPa el flux es: 74.26 L/h*m²
- A 200 kPa el flux es: 148.52 L/h*m²
- A 300 kPa el flux es: 222.79 L/h*m²
- A 400 kPa el flux es: 297.05 L/h*m²

Estos datos se establecieron como "comportamiento esperado".

Por consiguiente la Figura 4.25 expone el flux de la membrana obtenido con la unidad de laboratorio, equipo de UF y comportamiento esperado.

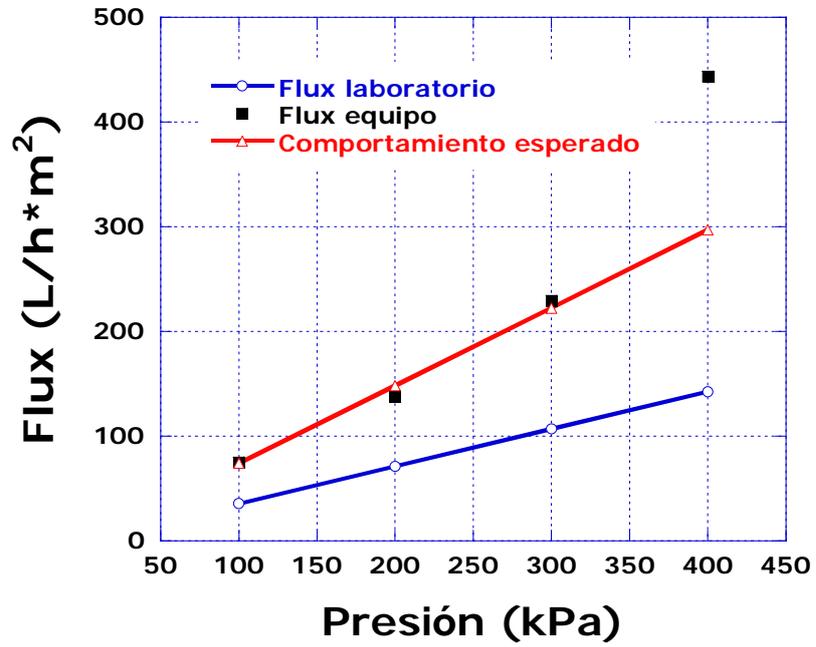


Figura 4.25. Comparación de flux



5 CONCLUSIONES

- En las pruebas realizadas con el prototipo y el equipo de laboratorio se observó, que al incrementar la presión el flux aumentó proporcionalmente como se esperaba. Lo que permite concluir que esta correlación se mantiene sin importar el área de la membrana siempre y cuando las condiciones de temperatura y presión de operación sean constantes.
- Durante los ensayos realizados con la membrana de acetato de celulosa se encontró que su permeabilidad hidráulica es de $0.35 \text{ kPa m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ y que puede trabajar en intervalos de presión de 100 a 500 kPa sin presentar fallas en su estructura.
- La inclusión del filtro de arena permitió homogeneizar la calidad del agua residual proveniente de Ciudad Universitaria a valores de 122 mg/L de DQO, 15 mg/L de SS y 20×10^3 UFC/100ml de coliformes fecales.
- Durante la fase experimental se realizaron ajustes y modificaciones al prototipo que permitieron establecer la metodología óptima de su operación.
- Se observó que la implementación de un separador como capa final en el armado del cartucho mejora el flujo del agua a través de la membrana, pues no permite que ésta se adhiera al material aislante al momento de las pruebas y de realizar el embobinado sobre el difusor.



- De las pruebas finales realizadas, la de 100 kPa fue la que presentó el mejor comportamiento, ya que no exhibió fuga durante las 6.6 horas de su realización. El resto de los ensayos mostraron ruptura del sello hidráulico a los 60 minutos (200 Kpa), 28 minutos (300kPa) y 62 minutos (400 kPa).
- El ensayo que mejor describe el ensuciamiento típico de una membrana fue a 100 kPa, ya que al graficar el flux de permeado se aprecia al ensuciamiento gradual de la membrana en el transcurso de la prueba.
- Como fue concluido anteriormente la presión óptima de operación fue de 100 kPa, ya que presentó los porcentaje más altos de remoción con respecto a las otras presiones, en cuanto a coliformes fecales (100%), sólidos suspendidos (44%), DQO (26%) y color (19%).
- Para una presión de cien kilopascales, un módulo genera un promedio de 144 litros por día, lo cual es un rendimiento de 576 litros por día considerando todo el prototipo, por lo tanto, en un día normal de operación se suministraría agua a un total de tres habitantes, con una dotación de 200 litros por habitante día, que es muy alta, dado que el consumo doméstico mínimo per cápita al día es de 100 L, de acuerdo con los lineamiento técnicos de la Comisión Nacional de Agua.



6 RECOMENDACIONES

- Dados los resultados obtenidos con el prototipo se recomienda realizar una comparación con equipos comerciales para evaluar la producción de flux y su calidad.
- Es importante ensayar con otros tipos de cartuchos como son tubular, fibra hueca, así como configuraciones, materiales y pegamentos para observar que módulo de ultrafiltración se ajusta mejor a las condiciones del prototipo empleado.
- Estudiar las fenómenos de transporte que suceden entre la membrana y el fluido.



NOMENCLATURA

$Q =$ gasto $[\text{m}^3 \text{s}^{-1}]$

$A =$ área $[\text{m}^2]$

$k_p =$ coeficiente de permeabilidad hidráulica, $[\text{m s}^{-1}]$

$h_L =$ pérdida de carga hidráulica a través del medio poroso, $[\text{m}]$

$L =$ espesor del medio poroso, $[\text{m}]$

$J =$ flux del agua a través de la membrana, $[\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}]$

$\Delta P =$ diferencial de presión a través de la membrana, $[\text{kg m s}^{-2}]$

$\mu =$ viscosidad del fluido, $[\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}]$

$R_M =$ coeficiente de resistencia de la membrana, $[\text{m}^{-1}]$

$R =$ rechazo, [adimensional]

$C_p =$ concentración del permeado, $[\text{kg m}^{-3}]$

$C_F =$ concentración de la alimentación, $[\text{kg m}^{-3}]$

$J_s =$ flux convectivo, $[\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}]$

$C_B =$ concentración soluto rechazado, $[\text{mol m}^{-3}]$

$D =$ coeficiente de difusión, $[\text{m s}^{-1}]$

$C_G =$ concentración de gel, $[\text{mol m}^{-3}]$

$\delta =$ espesor capa límite, $[\text{m}]$

$k =$ coeficiente de transferencia de masa, $[\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}]$



- R_c = resistencia concentración de polarización, $[m^{-1}]$
- R_{pL} = resistencia por encostrado, $[m^{-1}]$
- π = presión osmótica $[kg\ m\ s^{-2}]$
- R° = constante de los gases, $[J\ K^{-1}\ mol^{-1}]$
- T = temperatura absoluta, $[^\circ C]$
- M = molaridad, $[mol\ m^{-1}]$
- K_w = coeficiente de proporcionalidad entre flux y presión, $[s^1]$
- P_a = presión aplicada, $[kg\ m^{-1}\ s^{-2}]$
- ε = porosidad, [adimensional]
- r_p = radio del poro, $[m]$
- ρ = densidad del fluido, $[kg\ m^{-3}]$
- T° = factor tortuosidad (tamaño poro/espesor membrana), [adimensional]
- δ_m = espesor membrana, $[m]$
- $J_{w,25}$ = flux a 25 °C, $[m^{-3}\ s^{-1}\ m^{-2}]$
- $J_{w,t}$ = flux a la temperatura t, $[m^{-3}\ s^{-1}\ m^{-2}]$
- t = temperatura, $[^\circ C]$
- V = volumen, $[m^3]$
- $h_L = \frac{l}{L}$
- l = carga hidráulica constante, $[m]$
- t° = tiempo, $[s]$



REFERENCIAS

- Afonso M D, Ferrer J y Bórquez R (2004), An Economic Assessment of Proteins Recovery From Fish Meal Effluents by Ultrafiltration, *Trends in Food Science & Technology* **15**, 506–512
- Arkhangelsky E, Goren U y Gitis V (2008), Retention of Organic Matter by Cellulose Acetate Membranes Cleaned with Hypochlorite, *Desalination* **223**, 97–105
- Arnal J M, León M C, Lora J, Gozávez J M, Santafé A, Sanz D y Tena J (2008), Ultrafiltration as a Pre-treatment of Other Membrane Technologies in the Reuse of Textile Wastewaters, *Desalination* **221**, 405–412
- Arthanareeswaran G, Srinivasan K, Mahendran R, Mohan D, Rajendran M y Mohan V (2004), Studies on Cellulose Acetate and Sulfonated Poly(ether ether ketone) Blend Ultrafiltration Membranes, *European Polymer Journal* **40**, 751–762
- Asatekin A, Menniti A, Kang S, Elimelech M, Morgenroth E y Mayes A M (2006), Antifouling Nanofiltration Membranes for Membrane Bioreactors from Self-Assembling Graft Copolymers, *Journal of Membrane Science* **285**, 81–89
- AWWA (1998) *Tratamiento del Agua por Procesos de Membrana: Principios, Procesos y Aplicaciones*, American Water Works Association Research



- Foundation, Lyonnaise des Eaux, Water Research Commission of South África. Primera edición en español, McGraw-Hill, México D.F., México
- Azrague K, Aimar P, Benoit M F y Maurette M T (2007), A New Combination of a Membrane and a Photocatalytic Reactor for the Depollution of Turbid Water, *Applied Catalysis B: Environmental* **72**, 197–204
- Barbosa B V, Granhen T C R y Doce C R (2005.), Ultrafiltração Para O Tratamento De Efluentes De Laticínios, *23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*
- Belfort G, Davis R H y Zydney A L (1994), The Behavior of Suspensions and Macromolecular Solutions in Crossflow Microfiltration, *Journal of Membrane Science* **96**, 109-122
- Bemberis I y Neely K (1979), Ultrafiltration as a Competitive Unit Process, *AIChE Sym Ser*, Research Advances in Separation Techniques III
- Bird R B, Stewart W E y Lightfoot E N (1960), Transport Phenomena, *J Wiley & Sons*, New York
- Bodzek M, Dudziak M y Luks B K (2004), Application of Membrane Techniques to Water Purification. Removal Ofphthalates, *Desalination* **162**, 121-128
- Bodzek M, Waniekb A y Konieczny K (2002), Pressure Driven Membrane Techniques in the Treatment of Water Containing THMs, *Desalination* **147**, 101-107
- Bourgeois K N, Darby J L y Tchobanoglous G (2001), Ultrafiltration of Wastewater: Effects of Particles, Mode of Operation, and Backwash Effectiveness, *Water Research* **35**(1), 77-90



- Bruning W (1989), A General Description of Flows and Pressures in Hollow Fibre Membrane Modules, *Chem Eng Sci* **44**(6), 1441-1447
- Chang R (1995), *Química*, Cuarta edición, McGraw-Hill. México
- Chen V, Fane A G, Madaeni S y Wenten I G (1997), Particle Deposition During Membrane Filtration of Colloids: Transition Between Concentration Polarization and Cake Formation, *Journal of Membrane Science* **125**, 109-122
- Cherkasov A N, Tsareva S V y Polotsky A E (1995), Selective Properties of Ultrafiltration Membranes From the Standpoint of Concentration Polarization and Adsorption Phenomena, *Journal of Membrane Science*, **104**, 157-164
- Cheryan M (1998), *Ultrafiltration and Microfiltration Handbook*, CRC Press
- Crozes G F, Jacangelo J G, Anselme C, Laine J M (1997), Impact of Ultrafiltration Operating Conditions on Membrane Irreversible Fouling, *Journal of Membrane Science* **124**, 63-76
- Debra J y Cheryan M (1980), Production of Soy Isolates by Ultrafiltration: Process Engineering Characteristics of the Hollow Fibre System, *J Food Process* **5**, 103-117
- Del Castillo L F (1986), El Fenómeno Mágico de la Ósmosis, *La Ciencia desde México*. **16**, Secretaría de Educación Pública, Fondo de Cultura Económica y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México
- Diario oficial de la federación (1994), Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización, *publicada el 30 de Noviembre de 1995*



- Freeman H (1988), *Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal*, U S Environmental Protection Agency; Hazardous Waste Engineering Research Laboratory, McGraw-Hill
- Geankoplis, C J (1978), *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias Cia.* Editorial Continental, México ISBN- 968-26-0300-5
- Gómez M, Plaza F, Garralón G, Pérez J y Gómez M A (2007), A Ccomparative Study of Tertiary Wastewater Treatment by Physico-Chemical-UV Process and Macrofiltration–ultrafiltration Technologies, *Desalination* **202**, 369–376
- Guerrero G L, Ortega J M y Sanz A J (2003), Tratamientos De Regeneración De Aguas Residuales Depuradas Para La Recarga De Acuíferos. Filtración Granular Y Sistemas Integrados De Membranas, *Tecnología de la intrusión de agua de mar en acuíferos costeros: países mediterráneo*, **84**, 7840-470-8
- Harrison, J F y McGowan W (2000), *WQA Glossary of Terms 4a Edición*, Water Quality Association, Lisle, Illinois, EE.UU
- Heijman S G J, Vantieghem M, Raktoe S, Verberk J Q J C y Van D J C (2007), Blocking of Capillaries as Fouling Mechanism for Dead-end Ultrafiltration, *Journal of Membrane Science* **287**(1), 119-125
- Hernández A, Tejerina F, Arribas J I, Martínez L y Martínez F (1990), *Microfiltración, Ultrafiltración y Ósmosis Inversa*, Universidad de Murcia, 140 pp
- Ho W y Sirkar K (1992), *Membrane Handbook*, Edit Chapman & Hall
- Hwang S T y Kammermeyer K (1975), *Membranes in Separations*, Wiley Interscience, New York



- Ing. Cartwright P S (2004), Causas de y Curas para el Ensuciamiento de Membranas, *Agua Latinoamérica*, 10-12
- Iritani E (1991), Analysis of Filtration of Crossflow Upward and Downward Ultrafiltration, *J Chem Eng Japan* **24**, 39-44
- Lakshminarayanaiah N (1984), Equations of Membrane Biophysics, *Academic Press*, New York
- Lara, J A y Hernández A (2003), Reutilización De Aguas Residuales: Aprovechamiento De Los Nutrientes En Riego Agrícola, *Seminario Internacional sobre Métodos Naturales para el Tratamiento de Aguas Residuales*
- Majewska N K, Kowalska I y Kabsch K M (2005), Ultrafiltration of SDS Solutions Using Polymeric membranas, *Desalination* **184**, 415–422
- Majewska N K, Kowalska I y Kabsch K M (2006), Ultrafiltration of Aqueous Solutions Containing a Mixture of Dye and Surfactant, *Desalination* **198**, 149–157
- Meares P (1976), Membrane Separation Processes, *Elsevier scientific publishing company*
- Metcalf y Eddy Inc (2003), *Wastewater engineering: Treatment and reuse*, McGraw-Hill Cuarta edición, Nueva York
- Michael B P (2002), Membrane technology for century XXI, *Opflow*, American Waterworks Association
- Michaels A (1968), New Separation Technique for the CPI, *Chem Eng Prog* **64**(12), 31-43
- Moftah K (2003), For Water Treatment, Consider High-pH Reverse Osmosis, *Chemical Engineering*, 62-69 N.Y. U.S.



- Mohammed T A, Birima A H, Megat M N J M, Muyibi Suleyman A y Idris A (2008), Evaluation of Using Membrane Bioreactor for Treating Municipal Wastewater at Different Operating Conditions, *Desalination* **221**, 502–510
- Muñoz J I, Mendoza R J A, Iborra C A, Bes P A, Fajardo M V, Martínez F F J y Bernácer B I (2008), Study of Different Alternatives of Tertiary Treatments for Wastewater Reclamation to Optimize the Water Quality for Irrigation Reuse, *Desalination* **222**, 222–229
- MWH (2005), *Water Treatment: Principles and Design*, John Wiley and Sons, Segunda edición Inc., Nueva Jersey, Estados Unidos
- Nikolova J D e Islam M A (1998), Contribution of Absorbed layer Resistance to de Flux-Divine in an Ultrafiltration Process, *Journal Membrane Science* (146), 105-111
- Noordman T R, Jonge A, Wesselingh J A, Dekker B W M, Voorde E T y Grijpma S D (2002), Application of Fluidized Particles as Turbulence Promoters in Ultrafiltration Improvement of Flux and Rejection, *Journal of Membrane Science* **5331**, 1-13
- Porter M (1979), What, When and Why of Mebranes MF, UF and RO, AIChE Sym Ser, Recent Advances in Separation Techniques III
- Remize P J, Guigui C y Cabassud C (2006), From a New Method to Consider Backwash Efficiency to the Definition of Remaining Fouling, *Desalination* **199**(1-3), 86-88
- Reynolds, T D (1977), *Unit Operations And Processes in Environmental Engineering*, Boston M A PWS-Kent
- Romero R J A (1999), *Calidad del Agua*, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Alfaomega Segunda Edición



- Sablani S S, Goosen M F A, Al-Belushi R, Wilf M (2001), Concentration Polarization in Ultrafiltration and Reverse Osmosis: a Critical Review, *Desalination* **141**, 269-289
- Sancho M, Arnal J M, Verdú G, Lora J y Villaescusa J I (2006), Ultrafiltration and Reverse Osmosis Performance in the Treatment of Radioimmunoassay Liquid Wastes, *Desalination* **201**(1-3), 207-215
- Sartor M, Kaschek M y Mavrov V (2008), Feasibility Study for Evaluating the Client Application of Membrane Bioreactor (MBR) Technology for Decentralised Municipal Wastewater Treatment in Vietnam, *Desalination* **224**, 172–177
- Schafer A I, Fane A G y Waite T D (2001), Cost Factors and Chemical Pretreatment Effects in the Membrane Filtration of Waters Containing Natural Organic Matter, *Water Research* **35**(6), 1509-1517
- Scott K y Hughes R (1996), Industrial Membrane Separation Technology, *Blackie Academic & Professional* 1-112 y 151-180
- Song L (1998), Flux Decline en Crossflow Microfiltration and Ultrafiltration: Mechanisms and Modeling of Membrane Fouling, *Journal of Membrane Science* **139**, 183-200
- Sourirajan S (1970), Reverse Osmosis, *Academic Press*, New York
- Taylor J S, Duranceau S J, Barret W M y Goigel J F (1989), Assessment Of Potable Water Membrane Applications And Research Needs, *American Water Works Association*, Research Foundation. E U
- Thorsen T (2004), Concentration Polarisation by Natural Organic Matter (NOM) in NF and UF, *Journal of Membrane Science* **233**, 79–91



Toray Membrane America Inc (2003), Procedimientos de limpieza para Elementos Membrana OI a base de compuesto de poliamida, TMATB 006 Rev B, 12 pp

Vigo F, Gallego S y Sepúlveda J (2006), Soluciones al Ensuciamiento de Membranas en Instalaciones de Ósmosis Inversa, *Agua Latinoamérica* **6**(4), 6-11

Wagner J (2001), *Membrane Filtration Handbook*, Practical Tips and Hints, segunda edición, Osmonic

Weber W J (1972), *Physicochemical Processes for Water Quality Control*, New York: John Wiley and Sons

You S H, Tseng D H y Hsu W Ch (2007), Effect and Mechanism of Ultrafiltration Membrane Fouling Removal by Ozonation, *Desalination* **202**, 224–230

Páginas web:

www.kochmembrane.com

www.sterigenics.com

www.aguamarket.com



APÉNDICES

A1. HOJA TÉCNICA DE LA MEMBRANA

Cellophane™ P00

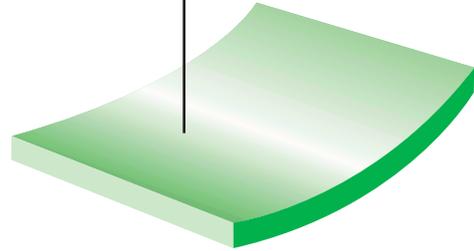
Data

Features - Non Heat-Sealable Battery Separator Film

Uncoated regenerated cellulose film (RCF) with no softeners incorporated.

- Highly permeable to water vapour
- Excellent transparency and gloss
- Anti-static properties
- Enhanced dimensional stability
- Biodegradable and compostable
- Hydrophilic

Regenerated Cellulose



Applications

350P00 is an unsoftened cellulose film containing only moisture to impart flexibility and is for use as a separator in batteries. It reduces the initial voltage decay and increases the life (especially for intermittent use) of alkaline batteries. It is also beneficial for nickel cadmium accumulators used in heavy industry and specialised types of Leclanché cell.

Technical Properties (Typical Values)

Property	Test Method	Test Conditions	Units	P00 350
Thickness	Innovia Films test		micron	24.4
Yield	Innovia Films test		m ² /kg	28.6
Permeability to: Water vapour	ASTM E 96	38 °C 90% RH	g/m ² .24 hrs	Not applicable
Oxygen	ASTM F 1927	23 °C 0-5% RH	cc/m ² .24 hrs. bar	Not applicable
Coefficient of friction (film to film)	ASTM D 1894	Static Dynamic		0.50 0.40
Tensile strength	ASTM D 882		MN/m ² MD TD	180 115
Elongation at break	ASTM D 882		% MD TD	18 34
Elasticity modulus (1% secant)	ASTM D 882		MN/m ² MD TD	>3000 >1500
Sealing range	Innovia Films test	0.5 secs; 69 kN/m ²	°C	Not applicable
Seal strength	Innovia Films test	135 °C; 0.5 secs; 69 kN/m ²	g(f)/30mm	Not applicable

All properties are tested under standard laboratory conditions: 23± 2°C; 50±5% RH, unless otherwise stated.

MD Machine Direction TD Transverse Direction

Reel Specifications

Reel Lengths

Film	Length/(metres)	
	Standard	Double Standard
350P00	3200	6400

Other reel lengths are available subject to negotiation.

Approximate Outside Diameter vs Core Size

Core Size / (mm)	Approximate Outside Diameter/(mm)	
	Standard	Double Standard
77	330	non-standard
120	non-standard	non-standard
153	non-standard	450

Film Storage

To maintain the high quality of this product during storage it is recommended that Cellophane P00 should be stored in its original wrapping away from any source of local heating or direct sunlight.

Recommended conditions of storage are:

Temperature: 17-23 °C

Relative Humidity: 35-55%

Cellophane P00 is suitable for use for 6 months from the date of delivery and stocks should be used in rotation.

Films should be allowed to reach operating room temperatures for 24 hours before use.

Food Contact

Cellophane P00 is designed for use as a separator in batteries and is **not** intended for direct food contact applications. For specific enquiries, please contact our Technical Services Department.

Health & Safety Guidelines

For Health and Safety information, please refer to literature reference A190.



CERTIFICATE NUMBER Q929

www.innoviafilms.com
 email: filmsinfo@innoviafilms.com
 ™Trademark of Innovia Films Group

Sales Offices

Europe (UK)	Tel +44 (0)16973 42281
Americas (USA)	Tel +1 877 822 3456
Asia-Pacific (Aus)	Tel +61 3 9303 0600

Disclaimer: Innovia Films Ltd or any of its affiliated companies (hereinafter 'Innovia Films') declines any liability with respect to the use made by any third party of the information contained herein. The information contained herein represents Innovia Films' best knowledge thereon without constituting any express or implied guarantee or warranty of any kind (including, but not limited to, the accuracy, the completeness or relevance of the data set out herein). Innovia Films is the sole owner or authorised user of the intellectual property rights relating to the information communicated.

The information relating to the use of the products is given for information purposes only. No guarantee or warranty is provided that the product is adapted to the client's specific use. The client should perform his own tests to determine the suitability for a particular purpose. The final choice of use of a product remains the sole responsibility of the client.



A2. DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA DE LAS BOMBAS

De acuerdo a estudios realizados con anterioridad en el laboratorio, los valores de flujo obtenidos a diferentes tiempos de operación se muestran en la Figura A1.1.

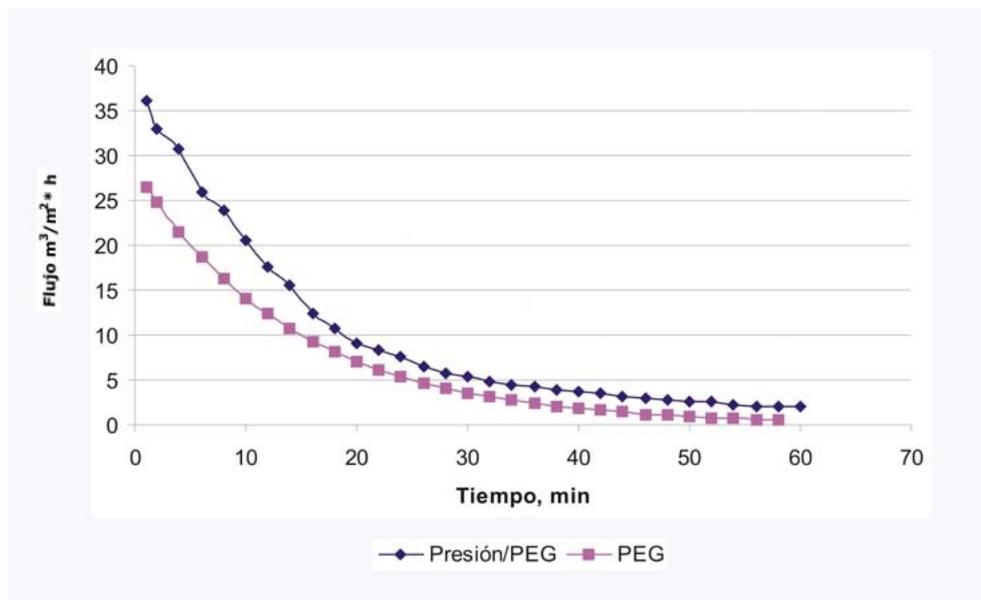


Figura A1. 1. Flux contra tiempo

En la figura anterior el flujo se estabiliza en los siguientes valores:

Flujo: 2.5 m³/m²xh



$$\text{Flujo} := 0.0007 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

$$\text{Flujoderechazo} := 75\%$$

ÁREA DE FILTRACIÓN

La unidad de ultrafiltración es del tipo en espiral, por lo cual el área de filtración depende de las siguientes propiedades del cartucho:

Diámetro del eje de la espiral

$$De := 20\text{mm}$$

Número de revoluciones sobre el eje

$$Nr := 3.5$$

Longitud del eje

$$Le := 0.4\text{m}$$

Con estas dimensiones se obtiene el perímetro del eje

Perímetro del eje

$$P := 2 \cdot \pi \cdot \frac{De}{2}$$

$$P = 0.063\text{m}$$

Área de la membrana

$$A := P \cdot Nr \cdot 2 \cdot Le$$

$$A = 0.176\text{m}^2$$

GASTO DE DISEÑO



Se determinaran cuatro tipos de gastos:

Gasto de permeado

$$Q_p := \text{Flujo} \cdot A$$

$$Q_p = 1.23 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Gasto de rechazo

Éste se determina realizando un balance de gastos en la membrana, lo cual da la siguiente ecuación:

$$Q_r := \frac{Q_p \cdot \text{Flujoderechazo}}{1 - \text{Flujoderechazo}}$$

$$Q_r = 3.695 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Gasto por cartucho

$$Q_c := Q_p + Q_r$$

$$Q_c = 4.926 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Gasto del influente

$$Q_i := Q_c \cdot 2$$

$$Q_i = 9.852 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

RÉGIMEN DE FLUJO

El tipo de flujo se determina con base a la formula del Número de Reynolds



$$R = V \times \frac{D}{\nu}$$

Donde:

V: velocidad media, m/s

D: diámetro interno del conducto, m

ν : viscosidad cinemática del fluido

Los datos son:

Temperatura de fluido (agua)

$$T_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

Viscosidad cinemática del fluido

$$\nu := 0.00000113 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Diámetro propuesto

$$D_p := 13\text{mm}$$

Área de la sección transversal

$$A_{st} := \pi \cdot \frac{D_p^2}{4}$$

$$A_{st} = 1.327 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Velocidad del fluido

$$V_f := \frac{Q_i}{A_{st}}$$



$$V_f = 7.422 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Número de Reynolds

$$R := V_f \frac{D_p}{\nu}$$

$$R = 85391.42$$

Característica del Flujo

Si el número de reynolds es menor a 2000 se comporta como laminar y si es mayor a 10000 es turbulento.

$$Re := \text{if}(R < 2000, \text{"LAMINAR"}, \text{if}(R > 10000, \text{"TURBULENTO"}, \text{"TRANSICIONAL"}))$$

$$Re = \text{"TURBULENTO"}$$

PÉRDIDAS DE CARGA EN TUBERÍAS POR EFECTO DE FRICCIÓN

Como el flujo es a presión, se emplea la formula de Darcy´s-Weisbach:

$$h_f = f \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{V^2}{2g} \right)$$

Donde:

hf: pérdidas por fricción, m

f: factor de fricción, adimensional

L: longitud de tubería, m

D: diámetro interior de tubería, m

V: velocidad del fluido, m/s

g: constante de la aceleración gravitacional, m/s²



Para flujo turbulento el factor de fricción se calcula con base en la Fórmula de Colebrook:

$$\frac{1}{f^{0.5}} = -2 \log \left[\left(\frac{e}{3.7D} \right) + \left(\frac{2.51}{R f^{0.5}} \right) \right]$$

Donde:

$e = 0.00004572\text{m}$ factor de rugosidad (acero)

Factor de fricción

$$f := \frac{64}{R}$$

$$f = 0.001$$

El factor de fricción se determina por iteración por el Método de Newton-Raphson y el valor obtenido es $f_t := 0.0118$

Área requerida

$$A_r := \frac{Q_i}{V_f}$$

$$A_r = 1.327 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Diámetro

$$D := \sqrt{\frac{A_r \cdot 4}{\pi}}$$

$$D = 0.013\text{m}$$

Velocidad

$$V := \frac{Q_i}{A_r}$$



$$V = 7.422 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Longitud de la tubería de conducción

$$L := 3.5\text{m}$$

Perdidas de carga por fricción en tuberías

$$g := 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$h_t := \text{ft} \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

$$h_t = 8.966\text{m}$$

Perdidas de carga por accesorios

1. Válvula de compuerta: 1

Pérdidas: 0.18

2. Codos de 90°: 2

Pérdidas: 0.69

3. Te: 1

Pérdidas: 0.46

4. Salida: 1

Pérdidas: 1

5. Entrada: 1

Pérdidas: 0.5

$$f_a := (1 \cdot 0.18) + (2 \cdot 0.69) + (1 \cdot 0.46) + (1 \cdot 1) + (1 \cdot 0.5)$$



$$f_a = 3.52$$

Obteniendo las pérdidas según Darcy-Weisbach

$$h_a := f_a \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

$$h_a = 9.884\text{m}$$

Perdidas totales

$$h_T := h_t + h_a$$

$$h_T = 18.85\text{m}$$

CARGA DINÁMICA TOTAL

Presión de operación máxima permisible

$$h_p := 10.2\text{m}$$

Carga estática del nivel de descarga

$$h_e := 1.5\text{m}$$

Carga total del sistema

$$H_t := h_T + h_p + (h_e \cdot 0.102)$$

$$H_t = 29.203\text{m}$$

ESTIMACIÓN DE LA POTENCIA DE LA BOMBA

Se usa la siguiente ecuación:

$$HP = \frac{Q \cdot 1.2 H_t}{75 \cdot \eta_f}$$

Donde:



Q: Gasto en LPS

Ht: Carga dinámica total

ef: factor de eficiencia aprox. 0.5-0.6

$$HP := \frac{Q \cdot 1000 \cdot 1.2 \cdot Ht}{75 \cdot 0.6}$$

$$HP = 0.767 m^4 s^{-1}$$



A3. PERMEABILIDAD DE LA MEMBRANA

En la Tabla A3. 1 se consignan los valores obtenidos durante la prueba de permeabilidad hidráulica.

Tabla A3. 1. Valores de flux para determinar la permeabilidad hidráulica de la membrana.

PRUEBAS	P (kPa)	v (m/h)	F (L/h*m2)
1	100	2.57E-04	27.717
2	100	2.58E-04	27.820
3	100	2.59E-04	27.865
4	200	5.18E-04	55.789
5	200	5.19E-04	55.846
6	200	5.21E-04	56.094
7	300	1.04E-03	112.016
8	300	1.04E-03	111.591
9	300	1.04E-03	111.579
10	400	1.29E-03	139.116
11	400	1.29E-03	139.089
12	400	1.29E-03	139.285
13	500	1.73E-03	186.337
14	500	1.72E-03	185.106
15	500	1.73E-03	186.799



A4. PERMEABILIDAD DEL FILTRO DE ARENA

En la Tabla A4. 1 se consignan los tiempos obtenidos para cada litro y carga constante.

Tabla A4. 1. Lecturas de las cargas hidráulicas

VOLUMEN	ALTURA 1	ALTURA 2	ALTURA 3
	TIEMPO	TIEMPO	TIEMPO
m ³	s	s	S
0.001	91	65	50
0.002	182	130	96
0.003	275	196	144
0.004	370	263	197
0.005	459	324	245
0.006	548	389	297
0.007	635	453	347
0.008	730	517	396



APÉNDICE 4: Permeabilidad del filtro de arena

VOLUMEN	ALTURA 1	ALTURA 2	ALTURA 3
	TIEMPO	TIEMPO	TIEMPO
m ³	s	s	S
0.009	821	581	445
0.01	910	645	494
0.011	1000	710	544
0.012	1091	776	593
0.013	1182	840	642
0.014	1273	904	692
0.015	1359	965	741
0.016	1453	1035	791
0.017	1542	1095	839
0.018	1630	1159	886
0.019	1729	1226	939
0.02	1815	1291	986

En la Tabla A4. 2 están los valores de permeabilidad obtenidos para cada altura y tiempo de llenado.



Tabla A4. 2. Permeabilidad del filtro a diferentes alturas

ENSAYOS	ALTURA 1	ALTURA 2	ALTURA 3
	k1	k2	k3
	m/h	m/h	m/h
1	0.699	0.871	1.019
2	0.699	0.871	1.108
3	0.684	0.858	1.062
4	0.670	0.845	0.962
5	0.715	0.928	1.062
6	0.715	0.871	0.980
7	0.731	0.884	1.019
8	0.670	0.884	1.040
9	0.699	0.884	1.040
10	0.715	0.884	1.040
11	0.707	0.871	1.019
12	0.699	0.858	1.040
13	0.699	0.884	1.040
14	0.699	0.884	1.019
15	0.740	0.928	1.040
16	0.677	0.809	1.019
17	0.715	0.943	1.062
18	0.723	0.884	1.084
19	0.643	0.845	0.962
20	0.740	0.871	1.084



A5. PRUEBAS PROTOTIPO DE ULTRAFILTRACIÓN

A 5.1. PRUEBAS HIDRÁULICAS

En la Tabla A5. 1 se muestran los resultados de las pruebas para el control uno del hidroneumático.

Tabla A5. 1. Pruebas del control uno

PRUEBA 1-CONTROL 1			
Número de giros:	1	Tiempo de la prueba:	2 min
Apagado hidroneumático:	310 kPa	Tiempo de encendido:	22 s
BOMBAS	MANÓMETROS (kPa)		
	M-1	M-2	M-3
Bomba 1	260	-	-
Bomba 2	-	260	-
Bomba 3	-	-	220
PRUEBA 2-CONTROL 1			
Número de giros:	3	Tiempo de la prueba:	2 min
Apagado hidroneumático:	360 kPa	Tiempo de encendido:	63 s
BOMBAS	MANÓMETROS (kPa)		
	M-1	M-2	M-3
Bomba 1	260	-	-
Bomba 2	-	260	-
Bomba 3	-	-	220



APÉNDICE 5: Pruebas prototipo de ultrafiltración

PRUEBA 3-CONTROL 1			
Número de giros:	2	Tiempo de la prueba:	2 min
Apagado hidroneumático:	340 kPa	Tiempo de encendido:	50 s
BOMBAS	MANÓMETROS (kPa)		
	M-1	M-2	M-3
Bomba 1	260	-	-
Bomba 2	-	260	-
Bomba 3	-	-	220

En la Tabla A5. 2 se muestran los resultados de las pruebas para el control dos del hidroneumático.

Tabla A5. 2. Pruebas del control dos

PRUEBA 1-CONTROL 2			
Número de giros:	1	Tiempo de la prueba:	2 min
Apagado hidroneumático:	290 kPa	Tiempo de encendido:	16 s
BOMBAS	MANÓMETROS (kPa)		
	M-1	M-2	M-3
Bomba 1	250	-	-
Bomba 2	-	260	-
Bomba 3	-	-	219
PRUEBA 2-CONTROL 2			
Número de giros:	1	Tiempo de la prueba:	2 min
Apagado hidroneumático:	270 kPa	Tiempo de encendido:	14 s
BOMBAS	MANÓMETROS (kPa)		
	M-1	M-2	M-3
Bomba 1	240	-	-
Bomba 2	-	250	-
Bomba 3	-	-	210
PRUEBA 3-CONTROL 2			
Número de giros:	3	Tiempo de la prueba:	2 min
Apagado hidroneumático:	220 kPa	Tiempo de encendido:	8 s



BOMBAS	MANÓMETROS (kPa)		
	M-1	M-2	M-3
Bomba 1	240	-	-
Bomba 2	-	250	-
Bomba 3	-	-	210

A 5.2. FLUX PRELIMINARES

En la Tabla A5. 3 están los valores de las cuatro primeras pruebas de flux preliminar.

Tabla A5. 3. Permeado 1

P1		P2		P3		P4	
Tiempo min	Flux L/h*m ²						
3.20	44.64	2.85	50.13	3.55	40.24	2.77	53.95
7.17	39.87	6.77	42.22	6.27	45.59	5.75	51.91
10.85	39.50	11.05	38.78	9.37	45.75	8.73	51.27
14.83	38.52	15.30	37.35	12.62	45.29	11.70	51.03
19.50	36.63	21.18	33.72	16.05	44.50	14.78	50.48
23.00	37.27	25.20	34.01	19.07	44.96	17.95	49.89
27.37	36.54	30.00	33.33	22.37	44.71	21.08	49.55
31.23	36.59	34.85	32.79	25.70	44.47	24.23	49.27
35.32	36.41	39.33	32.69	29.02	44.31	27.42	49.00
39.00	36.63	43.97	32.49	32.25	44.30	30.57	48.83
42.97	36.57	48.98	32.08	35.58	44.16	33.83	48.53
47.23	36.29	53.87	31.82	39.00	43.96	37.08	48.30
51.00	36.41	59.10	31.42	42.52	43.68	40.42	48.01
55.00	36.36	63.55	31.47	45.73	43.73	43.68	47.83
58.33	36.73	68.22	31.41	49.25	43.51	47.02	47.62
62.87	36.36	73.27	31.20	52.77	43.32	50.28	47.49
67.10	36.19	78.88	30.79	56.32	43.12	53.72	47.24
70.65	36.40	83.88	30.65	59.63	43.12	57.08	47.06



P1		P2		P3		P4	
Tiempo min	Flux L/h*m ²						
75.18	36.10	89.05	30.48	63.08	43.03	60.32	47.02
82.38	34.68	92.97	30.73	66.62	42.89	63.75	46.82
85.87	34.94	97.30	30.83	69.98	42.87	67.17	46.66
89.97	34.93	102.58	30.64	73.57	42.72	70.70	46.44
93.83	35.02	105.98	31.00	77.13	42.60	74.27	46.22
97.88	35.03	110.43	31.05	80.83	42.42	77.80	46.04
102.65	34.79	115.35	30.96	84.45	42.29	81.48	45.79
106.35	34.93	121.27	30.63	88.02	42.20	84.93	45.69
110.57	34.89	125.15	30.82	91.60	42.11	88.43	45.57
114.77	34.85	130.73	30.60	95.32	41.97	92.17	45.34
119.12	34.78	135.43	30.59	99.07	41.82	95.77	45.20
122.82	34.90	140.18	30.57	102.73	41.72	99.40	45.05
127.30	34.79	144.92	30.56	106.33	41.65	102.88	44.97
131.77	34.69	149.87	30.50	110.32	41.44	106.77	44.73
136.15	34.63	155.40	30.34	114.00	41.35	110.38	44.62
140.33	34.61	160.42	30.28	117.58	41.31	114.17	44.45
144.18	34.68	165.57	30.20	121.33	41.21	117.73	44.37
148.67	34.59	169.77	30.29	125.35	41.03	121.48	44.23
152.80	34.59	175.75	30.08	129.25	40.90	125.30	44.07
157.08	34.56	181.05	29.98	132.95	40.83	128.90	44.00
161.80	34.43	185.92	29.97	136.87	40.71	132.65	43.88
165.50	34.53	191.50	29.84	140.80	40.58	136.62	43.70

En la Tabla A5. 4 están los valores de las cinco pruebas siguientes de flux preliminar.



Tabla A5. 4. Permeado 2

P1		P2		P3		P4		P5	
Tiempo min	Flux L/hm ²	Tiempo min	Flux L/hm ²	Tiempo min	Flux L/hm ²	Tiempo min	Flux L/h*m ²	Tiempo min	Flux L/hm ²
2.30	62.11	1.90	71.62	1.65	82.47	1.37	99.57	2.22	64.45
4.07	70.26	3.87	70.39	3.07	88.75	2.65	102.70	4.23	67.49
6.00	71.43	5.87	69.59	4.43	92.08	3.98	102.49	6.18	69.31
7.97	71.73	7.87	69.19	6.02	90.47	5.40	100.80	8.27	69.12
9.65	74.02	9.88	68.84	7.48	90.92	6.82	99.81	10.32	69.24
11.45	74.86	11.93	68.42	8.93	91.40	8.10	100.80	12.28	69.78
13.28	75.28	14.00	68.04	10.42	91.45	9.47	100.62	14.50	68.97
15.13	75.52	16.10	67.62	11.95	91.10	10.87	100.18	16.57	68.99
16.88	76.15	18.18	67.35	13.43	91.17	12.17	100.66	18.65	68.94
18.62	76.74	20.27	67.14	14.83	91.74	13.60	100.06	20.77	68.79
20.33	77.28	22.42	66.77	16.32	91.74	14.95	100.13	22.87	68.72
22.32	76.82	24.60	66.38	17.85	91.48	16.42	99.47	24.95	68.71
24.10	77.06	26.70	66.26	19.33	91.50	17.80	99.38	27.17	68.36
25.45	78.59	28.88	65.96	20.80	91.59	19.20	99.22	29.28	68.30
27.77	77.17	31.08	65.67	22.30	91.53	20.65	98.85	31.52	67.99
29.62	77.18	33.25	65.48	23.80	91.48	22.08	98.59	33.70	67.83
31.47	77.18	35.48	65.20	25.32	91.38	23.55	98.23	35.92	67.62
33.37	77.07	37.68	65.00	26.80	91.40	25.00	97.98	38.13	67.43
35.23	77.04	39.87	64.85	28.23	91.58	27.18	95.11	40.43	67.13
37.23	76.74	42.22	64.47	29.82	91.28	29.33	92.78	42.57	67.12
38.93	77.05	44.23	64.60	31.25	91.45	30.83	92.68	44.73	67.06
40.85	76.94	46.50	64.38	32.77	91.37	32.37	92.49	46.97	66.92
42.92	76.56	48.88	64.03	34.35	91.12	33.87	92.42	49.32	66.62
44.80	76.53	51.23	63.75	35.87	91.06	35.42	92.21	51.65	66.38
46.80	76.31	53.60	63.47	37.42	90.92	36.15	94.11	54.00	66.14



APÉNDICE 5: Pruebas prototipo de ultrafiltración

P1		P2		P3		P4		P5	
Tiempo min	Flux L/hm ²	Tiempo min	Flux L/hm ²	Tiempo min	Flux L/hm ²	Tiempo min	Flux L/h*m ²	Tiempo min	Flux L/hm ²
48.73	76.22	55.80	63.41	38.90	90.95	36.88	95.93	56.32	65.95
50.75	76.00	58.15	63.18	40.43	90.87	38.42	95.64	58.63	65.78
52.70	75.90	60.47	63.01	41.97	90.79	39.97	95.33	60.98	65.59
54.67	75.78	62.93	62.71	43.53	90.65	41.52	95.05	63.48	65.26
56.67	75.63	65.25	62.57	45.20	90.32	43.12	94.68	65.83	65.10
58.55	75.64	67.50	62.50	46.50	90.72	44.53	94.73	68.17	64.97
60.75	75.25	70.00	62.21	48.15	90.44	46.15	94.36	70.53	64.81
62.65	75.25	72.30	62.11	49.95	89.90	47.72	94.11	72.80	64.76
64.73	75.03	74.62	62.01	51.17	90.42	49.27	93.91	75.15	64.63
66.77	74.89	77.07	61.80	52.70	90.38	50.87	93.63	77.48	64.53
68.97	74.57	79.43	61.67	54.20	90.38	52.42	93.46	79.58	64.62
71.07	74.38	81.87	61.50	55.72	90.37	54.17	92.95	81.82	64.60
73.20	74.16	84.28	61.35	57.30	90.24	55.58	93.03	84.13	64.52
75.42	73.88	86.77	61.17	58.85	90.18	57.18	92.81	86.50	64.41
77.65	73.59	89.30	60.95	60.43	90.07	58.82	92.54	88.78	64.36

En la Tabla A5. 5 están los valores de las cinco pruebas siguientes de flux preliminar.

Tabla A5. 5. Permeado 3

P1		P2		P3		P4		P5	
Tiempo min	Flux L/h*m ²								
1.08	263.74	0.93	306.12	3.20	212.62	0.63	214.86	0.83	163.29
2.13	267.86	1.85	308.88	3.90	209.35	1.28	212.07	1.58	171.89
3.32	258.44	2.73	313.59	4.57	208.59	1.90	214.86	2.35	173.72
4.50	253.97	3.63	314.55	5.25	207.36	2.55	213.46	3.15	172.80
5.28	270.39	4.78	298.66	5.92	206.99	3.22	211.52	3.95	172.25
6.82	251.48	5.58	307.04	6.55	207.75	3.88	210.25	4.75	171.89



APÉNDICE 5: Pruebas prototipo de ultrafiltración

P1		P2		P3		P4		P5	
Tiempo min	Flux L/h*m2								
8.02	249.48	6.57	304.57	7.22	207.42	4.48	212.47	5.52	172.67
9.10	251.18	7.40	308.88	7.88	207.14	5.08	214.16	6.32	172.34
10.23	251.28	8.30	309.81	8.55	206.90	5.70	214.86	7.12	172.09
11.17	255.86	9.20	310.56	9.22	206.70	6.25	217.73	7.88	172.62
12.38	253.80	10.00	314.29	9.88	206.53	6.78	220.67	8.70	172.05
13.50	253.97	10.93	313.59	10.55	206.38	7.38	221.17	9.52	171.59
14.63	253.82	11.73	316.56	11.22	206.24	7.95	222.52	10.33	171.20
15.70	254.78	12.62	317.04	11.88	206.12	8.55	222.82	11.10	171.63
16.68	256.89	13.47	318.25	12.55	206.02	9.10	224.31	11.93	171.05
17.85	256.10	14.27	320.43	13.23	205.66	9.65	225.62	12.73	170.99
19.02	255.42	15.22	319.20	13.85	206.33	10.20	226.80	13.57	170.52
20.02	256.93	16.08	319.76	14.53	205.99	10.80	226.80	14.38	170.30
21.22	255.86	17.77	305.55	15.22	205.68	11.33	228.13	15.17	170.47
22.13	258.18	18.70	305.58	15.93	204.97	11.93	228.07	16.03	169.75
23.22	258.44	19.47	308.22	16.60	204.94	12.42	230.15	16.83	169.76
24.15	260.28	20.32	309.39	17.27	204.91	12.98	230.58	17.70	169.14
25.18	260.94	21.07	311.93	18.00	204.12	13.55	230.98	18.55	168.72
26.25	261.22	21.90	313.11	18.63	204.48	14.10	231.62	19.42	168.20
27.28	261.80	22.88	312.14	19.33	204.12	14.68	231.69	20.27	167.86
28.65	259.29	23.72	313.22	20.00	204.12	15.22	232.51	21.12	167.55
29.65	260.18	24.62	313.38	20.68	203.95	15.77	233.03	21.98	167.13
30.68	260.73	25.48	313.93	21.37	203.80	16.32	233.52	22.85	166.75
31.80	260.56	26.45	313.26	22.05	203.66	16.87	233.97	23.73	166.28
32.13	266.75	27.15	315.71	22.75	203.37	17.43	234.17	24.68	165.39
33.92	261.14	28.10	315.20	23.45	203.10	17.92	235.45	25.95	162.56
35.13	260.23	29.05	314.73	24.12	203.13	18.50	235.38	26.42	164.84
36.27	259.98	29.92	315.16	24.82	202.88	19.03	235.93	27.30	164.49
37.37	259.97	30.80	315.40	25.47	203.05	19.58	236.26	28.25	163.78



P1		P2		P3		P4		P5	
Tiempo min	Flux L/h*m2								
38.40	260.42	31.53	317.12	26.18	202.69	20.15	236.37	29.25	162.83
39.38	261.17	32.53	316.16	-	-	20.72	236.47	30.08	162.84
40.58	260.49	33.42	316.35	-	-	21.27	236.75	31.07	162.07
41.77	259.95	34.23	317.15	-	-	21.77	237.57	32.93	157.01
42.75	260.65	35.20	316.56	-	-	22.33	237.63	38.85	136.60

A 5.3. FLUX AJUSTE

A continuación se muestran los resultados de las pruebas realizadas durante la fase de ajuste (Tabla A5. 6., Tabla A5. 7., Tabla A5. 8.).

Tabla A5. 6. Pruebas de ajuste 1

P1		P2		P3		P4		P5	
Tiempo min	Flux L/hm2								
1.17	122.45	1.83	77.92	1.90	75.19	1.87	76.53	1.38	103.27
2.55	112.04	3.80	75.19	3.52	81.25	4.12	69.40	3.05	93.68
3.85	111.32	5.53	77.45	4.93	86.87	6.10	70.26	4.58	93.68
5.13	111.32	7.28	78.46	6.42	89.05	8.17	69.97	6.10	93.68
6.52	109.61	9.18	77.78	8.12	88.00	10.22	69.91	7.65	93.37
7.87	108.96	11.02	77.80	9.77	87.76	12.40	69.12	9.28	92.33
9.20	108.70	12.80	78.13	11.55	86.58	14.40	69.44	10.85	92.17
10.33	110.60	14.30	79.92	13.02	87.80	16.08	71.06	12.70	89.99
11.62	110.68	16.08	79.94	14.67	87.66	18.20	70.64	14.42	89.18
13.00	109.89	17.87	79.96	16.30	87.64	20.30	70.37	16.20	88.18
14.35	109.51	19.62	80.11	17.88	87.87	22.22	70.73	18.00	87.30
15.62	109.77	21.28	80.55	19.50	87.91	24.33	70.45	19.83	86.43
16.97	109.46	23.02	80.69	21.13	87.88	26.40	70.35	21.67	85.71
18.33	109.09	24.98	80.05	22.78	87.82	28.47	70.26	23.67	84.51



APÉNDICE 5: Pruebas prototipo de ultrafiltración

P1		P2		P3		P4		P5	
Tiempo min	Flux L/hm ²								
19.54	109.66	26.45	81.02	24.42	87.76	30.17	71.03	25.46	84.17
20.75	110.15	28.08	81.39	26.05	87.74	32.10	71.21	27.25	83.88
22.03	110.22	29.75	81.63	27.68	87.73	34.00	71.43	29.28	82.93
23.32	110.28	31.53	81.55	29.30	87.76	36.00	71.43	31.20	82.42
24.65	110.11	33.30	81.51	30.87	87.94	38.07	71.30	33.22	81.71
26.00	109.89	35.03	81.55	32.43	88.09	40.12	71.22	35.03	81.55
27.32	109.82	36.80	81.52	34.05	88.11	42.00	71.43	37.10	80.86
28.42	110.60	38.20	82.27	35.67	88.12	43.05	73.00	39.02	80.55
29.67	110.75	39.75	82.66	37.28	88.13	45.47	72.27	41.10	79.94
30.98	110.66	41.48	82.65	39.00	87.91	47.45	72.26	43.12	79.52
32.28	110.63	43.05	82.96	40.68	87.79	49.33	72.39	45.18	79.04
33.58	110.60	44.77	82.97	42.28	87.84	51.30	72.40	47.23	78.64
34.90	110.52	46.52	82.92	43.87	87.93	53.45	72.16	49.22	78.37
36.25	110.34	48.23	82.93	45.48	87.94	55.30	72.33	51.30	77.97
37.38	110.82	49.62	83.50	47.10	87.96	57.02	72.66	53.33	77.68
38.55	111.17	51.23	83.65	48.82	87.79	58.75	72.95	55.33	77.45
39.82	111.22	52.85	83.80	50.52	87.67	60.63	73.04	57.50	77.02
41.17	111.05	54.48	83.91	52.00	87.91	62.50	73.14	59.56	76.76
42.43	111.10	56.13	83.98	53.65	87.87	64.50	73.09	61.62	76.51
43.82	110.85	57.87	83.94	55.30	87.83	66.47	73.08	63.55	76.43
45.22	110.58	59.58	83.92	56.90	87.87	68.63	72.85	65.58	76.24
46.30	111.08	60.93	84.40	58.65	87.69	70.17	73.29	67.63	76.05
47.38	111.55	62.35	84.77	60.17	87.85	71.70	73.72	69.67	75.87
48.73	111.39	64.02	84.80	61.87	87.75	73.67	73.69	71.82	75.59
50.00	111.43	65.58	84.95	63.47	87.79	75.60	73.70	73.90	75.39
51.32	111.35	67.25	84.97	65.09	87.79	77.48	73.75	76.00	75.19
52.62	111.32	68.78	85.15	66.72	87.79	79.38	73.78	77.98	75.11
53.90	111.52	70.40	85.23	68.38	87.74	81.22	73.88	80.07	74.94



APÉNDICE 5: Pruebas prototipo de ultrafiltración

P1		P2		P3		P4		P5	
Tiempo min	Flux L/hm ²								
54.95	111.79	71.97	85.36	69.97	87.80	82.73	74.25	82.10	74.82
56.25	111.75	73.50	85.54	71.59	87.80	84.63	74.28	84.08	74.62
57.53	111.95	75.12	85.61	73.22	87.75	86.47	74.38	86.17	74.54
58.58	112.23	76.68	85.74	74.88	87.81	87.98	74.75	88.20	74.37
59.88	112.19	78.22	85.93	76.47	87.81	89.88	74.78	90.18	74.25
61.17	112.39	79.83	86.00	78.09	87.76	91.72	74.88	92.27	74.05
62.22	112.66	81.40	86.13	79.72	87.81	93.23	75.25	94.30	73.97
63.52	112.63	82.93	86.31	81.38	87.82	95.13	75.28	96.28	73.80
64.80	112.83	84.55	86.39	82.97	87.77	96.97	75.38	98.37	73.68
65.85	113.10	86.12	86.52	84.59	87.82	98.48	75.75	100.40	73.48
67.15	113.06	87.65	86.70	86.22	87.83	100.38	75.84	102.38	73.40
68.43	113.26	89.27	86.77	87.88	87.78	102.22	76.22	104.47	73.23
69.48	113.54	90.83	86.90	89.47	87.83	103.73	76.25	106.50	73.11
70.78	113.50	92.37	87.08	91.09	87.83	105.63	76.34	108.48	72.91
72.07	113.70	93.98	87.16	92.72	87.78	107.47	76.72	110.57	72.83
73.12	113.97	95.55	87.29	94.38	87.84	108.98	76.75	112.60	72.66
74.42	113.94	97.08	87.47	95.97	87.84	110.88	76.84	114.58	72.54
75.70	114.14	98.70	87.54	97.59	87.79	112.72	77.22	116.67	72.34
76.75	114.41	100.27	87.67	99.22	87.85	114.23	77.31	118.70	72.26
78.05	114.37	101.80	87.86	100.88	87.85	116.13	77.68	120.68	72.09
79.33	114.57	103.42	87.93	102.47	87.80	117.97	77.72	122.77	71.97
80.38	114.85	104.98	88.06	104.09	87.86	119.48	77.81	124.80	71.77
81.68	114.81	106.52	88.24	105.72	87.86	121.38	78.18	126.78	71.69
82.97	115.01	108.13	88.32	107.38	87.81	123.22	78.22	128.87	71.52
84.02	115.28	109.70	88.45	108.97	87.87	124.73	78.31	130.90	71.40
85.32	115.25	111.23	88.63	110.59	87.87	126.63	78.68	132.88	71.20
86.60	115.45	112.85	88.70	112.22	87.82	128.47	78.78	134.97	71.12
87.65	115.72	114.42	88.83	113.88	87.87	129.98	79.15	137.00	70.95



APÉNDICE 5: Pruebas prototipo de ultrafiltración

P1		P2		P3		P4		P5	
Tiempo min	Flux L/hm ²								
88.95	115.68	115.95	89.02	115.47	87.88	131.88	79.18	138.98	70.83
90.23	115.88	117.57	89.09	117.09	87.83	133.72	79.28	141.07	70.63
91.28	116.16	119.13	89.22	118.72	87.88	135.23	79.65	143.10	70.55
92.58	116.12	120.67	89.40	120.38	87.89	137.13	79.68	145.08	70.38
93.87	116.32	122.28	89.48	121.97	87.84	138.97	79.78	147.17	70.26
94.92	116.59	123.85	89.61	123.59	87.89	140.48	80.15	149.20	70.06
96.22	116.56	125.38	89.79	125.22	87.89	142.38	80.24	151.18	69.98
97.50	116.76	127.00	89.86	126.88	87.84	144.22	80.61	153.27	69.81
98.55	117.03	128.57	89.99	128.47	87.90	145.73	80.65	155.30	69.69
99.85	116.99	130.10	90.17	130.09	87.90	147.63	80.74	157.28	69.49
101.13	117.19	131.72	90.25	131.72	87.85	149.47	81.12	159.37	69.41
102.18	117.46	133.28	90.38	133.38	87.91	150.98	81.15	161.40	69.24
103.48	117.43	134.82	90.56	134.97	87.91	152.88	81.24	163.38	69.12
104.77	117.63	136.43	90.63	136.59	87.86	154.72	81.62	165.47	68.92
105.82	117.90	138.00	90.76	138.22	87.92	156.23	81.71	167.50	68.84
107.12	117.87	139.53	90.95	139.88	87.92	158.13	82.08	169.48	68.67
108.40	118.07	141.15	91.02	141.47	87.87	159.97	82.12	171.57	68.55
109.45	118.34	142.72	91.15	143.09	87.93	161.48	82.21	173.60	68.35
110.75	118.30	144.25	91.33	144.72	87.93	163.38	82.58	175.58	68.27
112.03	118.50	145.87	91.41	146.38	87.88	165.22	82.62	177.67	68.10
113.08	118.77	147.43	91.54	147.97	87.93	166.73	82.71	179.70	67.98
114.38	118.74	148.97	91.72	149.59	87.94	168.63	83.08	181.68	67.78
115.67	118.94	150.58	91.79	151.22	87.89	170.47	83.18	183.77	67.70
116.72	119.21	152.15	91.92	152.88	87.94	171.98	83.55	185.80	67.53
118.02	119.17	153.68	92.10	154.47	87.95	173.88	83.58	187.78	67.41
119.30	119.37	155.30	92.18	156.09	87.90	175.72	83.68	189.87	67.21
120.35	119.65	156.87	92.31	157.72	87.95	177.23	84.05	191.90	67.13
121.65	119.61	158.40	92.49	159.38	87.96	179.13	84.08	193.88	66.96



APÉNDICE 5: Pruebas prototipo de ultrafiltración

P1		P2		P3		P4		P5	
Tiempo min	Flux L/hm ²								
122.93	119.81	160.02	92.56	160.97	87.90	180.97	84.18	195.97	66.84
123.98	120.08	161.58	92.69	162.59	87.96	182.48	84.55	198.00	66.64
125.28	120.05	163.12	92.88	164.22	87.96	184.38	84.64	199.98	66.56
126.57	120.25	164.73	92.95	165.88	87.91	186.22	85.01	202.07	66.39
127.62	120.52	166.30	93.08	167.47	87.97	187.73	85.05	-	-
128.92	120.48	167.83	93.26	169.09	87.97	189.63	85.14	-	-
130.20	120.68	169.45	93.34	170.72	87.92	191.47	85.51	-	-
131.25	120.96	171.02	93.47	172.38	87.98	192.98	85.55	-	-
132.55	120.92	172.55	93.65	173.97	87.98	194.88	85.64	-	-
133.83	121.12	174.17	93.72	175.59	87.93	196.72	86.01	-	-
134.88	121.39	175.73	93.85	177.22	87.99	198.23	86.11	-	-
136.18	121.36	177.27	94.04	178.88	87.99	200.13	86.48	-	-
137.47	121.56	178.88	94.11	180.47	87.94	201.97	86.52	-	-
138.52	121.83	180.45	94.24	182.09	88.00	-	-	-	-
139.82	121.79	181.98	94.42	183.72	88.00	-	-	-	-
141.10	121.99	183.60	94.50	185.38	87.95	-	-	-	-
142.15	122.27	185.17	94.63	186.97	88.00	-	-	-	-
143.45	122.23	186.70	94.81	188.59	88.01	-	-	-	-
144.73	122.43	188.32	94.88	190.22	87.96	-	-	-	-
145.78	122.70	189.88	95.01	191.88	88.01	-	-	-	-
147.08	122.67	191.42	95.19	193.47	88.02	-	-	-	-
148.37	122.87	193.03	95.27	195.09	87.96	-	-	-	-
149.42	123.14	194.60	95.40	196.72	88.02	-	-	-	-
150.72	123.10	196.13	95.58	198.38	88.02	-	-	-	-
152.00	123.30	197.75	95.65	199.97	87.97	-	-	-	-
153.05	123.58	199.32	95.78	201.59	88.03	-	-	-	-
154.35	123.54	200.85	95.97	-	-	-	-	-	-
155.63	123.74	-	-	-	-	-	-	-	-



APÉNDICE 5: Pruebas prototipo de ultrafiltración

P1		P2		P3		P4		P5	
Tiempo min	Flux L/hm ²								
156.68	124.01	-	-	-	-	-	-	-	-
157.98	123.98	-	-	-	-	-	-	-	-
159.27	124.18	-	-	-	-	-	-	-	-
160.32	124.45	-	-	-	-	-	-	-	-
161.62	124.41	-	-	-	-	-	-	-	-
162.90	124.61	-	-	-	-	-	-	-	-
163.95	124.89	-	-	-	-	-	-	-	-
165.25	124.85	-	-	-	-	-	-	-	-
166.53	125.05	-	-	-	-	-	-	-	-
167.58	125.32	-	-	-	-	-	-	-	-
168.88	125.29	-	-	-	-	-	-	-	-
170.17	125.49	-	-	-	-	-	-	-	-
171.22	125.76	-	-	-	-	-	-	-	-
172.52	125.72	-	-	-	-	-	-	-	-
173.80	125.92	-	-	-	-	-	-	-	-
174.85	126.20	-	-	-	-	-	-	-	-
176.15	126.16	-	-	-	-	-	-	-	-
177.43	126.36	-	-	-	-	-	-	-	-
178.48	126.63	-	-	-	-	-	-	-	-
179.78	126.60	-	-	-	-	-	-	-	-
181.07	126.80	-	-	-	-	-	-	-	-
182.12	127.07	-	-	-	-	-	-	-	-
183.42	127.03	-	-	-	-	-	-	-	-
184.70	127.23	-	-	-	-	-	-	-	-
185.75	127.51	-	-	-	-	-	-	-	-
187.05	127.47	-	-	-	-	-	-	-	-
188.33	127.67	-	-	-	-	-	-	-	-
189.38	127.94	-	-	-	-	-	-	-	-



APÉNDICE 5: Pruebas prototipo de ultrafiltración

P1		P2		P3		P4		P5	
Tiempo min	Flux L/hm ²								
190.68	127.91	-	-	-	-	-	-	-	-
191.97	128.11	-	-	-	-	-	-	-	-
193.02	128.38	-	-	-	-	-	-	-	-
194.32	128.34	-	-	-	-	-	-	-	-
195.60	128.54	-	-	-	-	-	-	-	-
196.65	128.81	-	-	-	-	-	-	-	-
197.95	128.78	-	-	-	-	-	-	-	-
199.23	128.98	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla A5. 7. Pruebas de ajuste 2

P6		P7		P8		P9		P10	
Tiempo min	Flux L/hm ²								
2.28	62.57	3.38	42.22	2.83	50.42	3.45	41.41	4.48	31.86
4.75	60.15	6.62	43.18	6.17	46.33	6.80	42.02	8.77	32.59
7.02	61.08	9.50	45.11	9.28	46.17	10.13	42.29	13.55	31.63
9.05	63.14	12.60	45.35	12.37	46.21	13.82	41.36	18.10	31.57
11.32	63.12	15.67	45.59	15.78	45.26	17.57	40.66	22.96	31.11
13.47	63.65	18.58	46.12	19.00	45.11	21.17	40.49	27.77	30.87
15.55	64.31	21.50	46.51	22.33	44.78	24.33	41.10	32.42	30.85
17.62	64.87	24.55	46.55	25.22	45.32	27.68	41.28	36.07	31.69
19.68	65.32	27.62	46.56	28.63	44.90	31.50	40.82	40.60	31.67
21.88	65.28	30.78	46.41	32.20	44.37	35.18	40.60	45.37	31.49
23.97	65.57	33.83	46.45	35.35	44.45	38.83	40.47	50.02	31.42
26.10	65.68	36.97	46.37	38.62	44.39	42.35	40.48	54.63	31.38
28.18	65.90	39.73	46.74	41.93	44.29	46.03	40.34	59.42	31.26
30.50	65.57	42.72	46.82	45.32	44.13	49.80	40.16	64.27	31.12



APÉNDICE 5: Pruebas prototipo de ultrafiltración

P6		P7		P8		P9		P10	
Tiempo min	Flux L/hm ²								
32.40	66.14	45.35	47.25	48.28	44.38	53.55	40.02	68.15	31.44
34.38	66.48	48.52	47.11	51.97	43.98	57.22	39.95	72.88	31.36
36.50	66.54	51.52	47.14	55.35	43.88	60.82	39.93	77.53	31.32
38.67	66.50	54.57	47.12	58.97	43.61	64.63	39.78	82.20	31.28
40.78	66.55	57.52	47.19	62.40	43.50	68.33	39.72	87.05	31.18
42.92	66.57	60.67	47.10	66.07	43.25	72.02	39.67	91.73	31.15
44.98	66.69	63.53	47.22	69.73	43.02	75.97	39.49	96.55	31.07
47.42	66.28	66.17	47.50	72.77	43.19	79.58	39.49	100.75	31.19
49.00	67.06	69.22	47.47	76.12	43.17	83.32	39.44	104.88	31.33
51.17	67.01	72.45	47.32	79.87	42.93	87.17	39.33	109.85	31.21
53.13	67.22	75.48	47.31	83.33	42.86	91.07	39.22	114.32	31.24
55.23	67.25	78.53	47.30	87.10	42.64	94.75	39.20	118.90	31.24
57.38	67.22	81.73	47.19	90.68	42.53	100.13	38.52	123.62	31.20
59.57	67.15	84.80	47.17	94.35	42.40	104.40	38.31	128.42	31.15
61.52	67.35	87.57	47.31	97.40	42.53	108.63	38.14	132.38	31.29
63.62	67.37	90.88	47.16	101.12	42.38	114.32	37.49	137.28	31.22
65.63	67.47	94.03	47.10	104.80	42.26	117.58	37.66	141.93	31.20
67.72	67.51	97.18	47.04	108.42	42.17	121.62	37.59	146.72	31.16
69.83	67.51	100.47	46.92	112.07	42.07	125.37	37.60	151.70	31.08
71.97	67.49	103.77	46.81	115.90	41.91	129.18	37.60	156.53	31.03
74.33	67.26	107.13	46.67	119.85	41.72	133.25	37.52	161.75	30.91
76.12	67.57	109.88	46.80	122.85	41.86	136.83	37.58	165.67	31.04
78.03	67.74	112.80	46.86	125.97	41.96	140.67	37.58	169.75	31.14
80.25	67.65	116.45	46.62	130.02	41.75	144.48	37.57	174.90	31.04
82.30	67.70	119.55	46.60	133.57	41.71	148.35	37.56	179.63	31.02
84.38	67.72	122.78	46.54	137.38	41.59	152.32	37.52	184.52	30.97
86.53	67.69	126.33	46.36	141.13	41.50	156.10	37.52	189.48	30.91
88.65	67.68	129.55	46.31	144.80	41.44	159.78	37.55	194.17	30.90



APÉNDICE 5: Pruebas prototipo de ultrafiltración

P6		P7		P8		P9		P10	
Tiempo min	Flux L/hm ²								
90.60	67.67	132.25	46.45	147.87	41.54	163.67	37.53	198.48	30.95
92.75	67.64	135.80	46.27	151.62	41.42	167.63	37.49	203.45	30.90
94.87	67.63	139.02	46.22	155.28	41.33	171.42	37.50	-	-
96.82	67.62	141.72	46.09	158.35	41.27	175.10	37.53	-	-
98.97	67.59	145.27	45.91	162.10	41.23	178.98	37.51	-	-
101.08	67.59	148.48	45.86	165.77	41.11	182.95	37.47	-	-
103.03	67.57	151.18	45.73	168.83	41.01	186.73	37.48	-	-
105.18	67.54	154.73	45.55	172.58	40.95	190.42	37.50	-	-
107.30	67.54	157.95	45.50	176.25	40.91	194.30	37.49	-	-
109.25	67.53	160.65	45.37	179.32	40.79	198.27	37.45	-	-
111.40	67.49	164.20	45.19	183.07	40.70	202.05	37.45	-	-
113.52	67.49	167.42	45.14	186.73	40.63	-	-	-	-
115.47	67.48	170.12	45.01	189.80	40.59	-	-	-	-
117.62	67.45	173.67	44.83	193.55	40.47	-	-	-	-
119.73	67.44	176.88	44.78	197.22	40.38	-	-	-	-
121.68	67.43	179.58	44.65	200.28	40.32	-	-	-	-
123.83	67.40	183.13	44.47	204.03	40.28	-	-	-	-
125.95	67.39	186.35	44.42	-	-	-	-	-	-
127.90	67.38	189.05	44.29	-	-	-	-	-	-
130.05	67.35	192.60	44.11	-	-	-	-	-	-
132.17	67.34	195.82	44.06	-	-	-	-	-	-
134.12	67.33	198.52	43.93	-	-	-	-	-	-
136.27	67.30	202.07	43.75	-	-	-	-	-	-
138.38	67.30	205.28	43.70	-	-	-	-	-	-
140.33	67.28	207.98	43.57	-	-	-	-	-	-
142.48	67.25	-	-	-	-	-	-	-	-
144.60	67.25	-	-	-	-	-	-	-	-
146.55	67.24	-	-	-	-	-	-	-	-



APÉNDICE 5: Pruebas prototipo de ultrafiltración

P6		P7		P8		P9		P10	
Tiempo min	Flux L/hm ²								
148.70	67.20	-	-	-	-	-	-	-	-
150.82	67.20	-	-	-	-	-	-	-	-
152.77	67.19	-	-	-	-	-	-	-	-
154.92	67.16	-	-	-	-	-	-	-	-
157.03	67.15	-	-	-	-	-	-	-	-
158.98	67.14	-	-	-	-	-	-	-	-
161.13	67.11	-	-	-	-	-	-	-	-
163.25	67.10	-	-	-	-	-	-	-	-
165.20	67.09	-	-	-	-	-	-	-	-
167.35	67.06	-	-	-	-	-	-	-	-
169.47	67.06	-	-	-	-	-	-	-	-
171.42	67.04	-	-	-	-	-	-	-	-
173.57	67.01	-	-	-	-	-	-	-	-
175.68	67.01	-	-	-	-	-	-	-	-
177.63	67.00	-	-	-	-	-	-	-	-
179.78	66.96	-	-	-	-	-	-	-	-
181.90	66.96	-	-	-	-	-	-	-	-
183.85	66.95	-	-	-	-	-	-	-	-
186.00	66.92	-	-	-	-	-	-	-	-
188.12	66.91	-	-	-	-	-	-	-	-
190.07	66.90	-	-	-	-	-	-	-	-
192.22	66.87	-	-	-	-	-	-	-	-
194.33	66.86	-	-	-	-	-	-	-	-
196.28	66.85	-	-	-	-	-	-	-	-
198.43	66.82	-	-	-	-	-	-	-	-
200.55	66.81	-	-	-	-	-	-	-	-
202.50	66.80	-	-	-	-	-	-	-	-



Tabla A5. 8. Pruebas de ajuste 3

P11		MEDIA	MED+DESVEST	MEDIA	MED-DESVEST
Tiempo min	Flux L/hm ²	Tiempo min	Flux L/hm ²	Tiempo min	Flux L/hm ²
3.53	40.43	2.56	94.40	65.84	37.28
8.08	35.35	5.29	88.67	62.83	36.99
12.48	34.33	7.91	90.01	63.65	37.30
16.90	33.81	10.54	90.70	63.99	37.29
21.92	32.59	13.35	89.90	63.36	36.83
27.30	31.40	16.15	89.49	63.06	36.63
32.05	31.20	18.82	89.33	63.07	36.81
35.98	31.76	21.23	90.11	63.71	37.31
40.35	31.86	23.94	89.94	63.57	37.19
45.33	31.51	26.77	89.50	63.25	36.99
50.12	31.36	29.47	89.38	63.20	37.02
55.00	31.17	32.20	89.36	63.14	36.93
59.92	31.00	34.95	89.19	63.05	36.92
65.05	30.75	37.81	88.73	62.75	36.78
69.05	31.03	40.26	89.12	63.08	37.05
73.88	30.94	43.01	89.31	63.11	36.91
78.65	30.88	45.74	89.24	63.06	36.88
83.62	30.75	48.55	89.16	62.95	36.75
88.45	30.69	51.33	89.02	62.86	36.69
93.55	30.54	54.14	88.96	62.78	36.60
98.35	30.50	56.94	88.87	62.70	36.54
102.12	30.78	59.38	89.31	63.00	36.69
106.15	30.95	62.00	89.30	63.01	36.73
110.93	30.91	64.86	89.15	62.88	36.61
115.08	31.03	67.54	89.13	62.88	36.63
119.55	31.07	70.29	89.08	62.83	36.59
124.13	31.07	73.24	88.98	62.69	36.40



APÉNDICE 5: Pruebas prototipo de ultrafiltración

P11		MEDIA	MED+DESVEST	MEDIA	MED-DESVEST
Tiempo min	Flux L/hm2	Tiempo min	Flux L/hm2	Tiempo min	Flux L/hm2
128.58	31.11	76.06	88.89	62.62	36.34
132.22	31.33	78.56	89.14	62.78	36.42
136.33	31.44	81.48	89.23	62.73	36.24
140.73	31.47	84.18	89.20	62.72	36.24
144.95	31.54	86.94	89.19	62.71	36.22
149.20	31.60	89.72	89.17	62.67	36.17
153.63	31.62	92.54	89.06	62.60	36.13
158.15	31.62	95.49	88.91	62.47	36.03
161.63	31.82	97.88	89.15	62.65	36.15
164.98	32.04	100.32	89.42	62.83	36.23
169.28	32.07	103.23	89.30	62.72	36.13
173.25	32.16	105.93	89.32	62.73	36.13
177.07	32.27	108.69	89.28	62.70	36.11
181.20	32.32	111.48	89.29	62.68	36.07
184.85	32.46	114.16	89.33	62.69	36.06
187.90	32.69	116.59	89.47	62.80	36.14
3.53	40.43	119.38	89.48	62.79	36.09
8.08	35.35	122.06	89.52	62.80	36.09
12.48	34.33	124.49	89.66	62.91	36.17
16.90	33.81	127.28	89.67	62.90	36.12
21.92	32.59	129.96	89.71	62.91	36.11
27.30	31.40	132.39	89.85	63.02	36.20
32.05	31.20	135.18	89.85	63.00	36.15
35.98	31.76	137.86	89.90	63.02	36.14
40.35	31.86	140.29	90.04	63.13	36.22
45.33	31.51	143.08	90.04	63.11	36.18
50.12	31.36	145.76	90.08	63.13	36.17
55.00	31.17	148.19	90.22	63.24	36.25



APÉNDICE 5: Pruebas prototipo de ultrafiltración

P11		MEDIA	MED+DESVEST	MEDIA	MED-DESVEST
Tiempo min	Flux L/hm2	Tiempo min	Flux L/hm2	Tiempo min	Flux L/hm2
59.92	31.00	150.98	90.23	63.22	36.21
65.05	30.75	153.66	90.27	63.24	36.20
69.05	31.03	156.09	90.41	63.35	36.28
73.88	30.94	158.87	90.42	63.33	36.24
78.65	30.88	161.56	90.46	63.35	36.23
83.62	30.75	163.98	90.60	63.46	36.31
88.45	30.69	166.77	90.61	63.44	36.27
93.55	30.54	169.46	90.65	63.45	36.26
98.35	30.50	171.88	90.79	63.56	36.34
102.12	30.78	174.67	90.79	63.55	36.30
106.15	30.95	177.35	90.84	63.56	36.29
110.93	30.91	179.78	90.97	63.67	36.37
115.08	31.03	182.57	90.98	63.65	36.33
119.55	31.07	185.25	91.02	63.67	36.32
124.13	31.07	187.68	91.16	63.78	36.40
128.58	31.11	190.47	91.17	63.76	36.36
132.22	31.33	193.15	91.21	63.78	36.35
136.33	31.44	195.58	91.35	63.89	36.43
140.73	31.47	198.37	91.36	63.87	36.39
144.95	31.54	201.05	91.40	63.89	36.38
149.20	31.60	-	-	-	-
153.63	31.62	-	-	-	-
158.15	31.62	-	-	-	-
161.63	31.82	-	-	-	-
164.98	32.04	-	-	-	-
169.28	32.07	-	-	-	-
173.25	32.16	-	-	-	-
177.07	32.27	-	-	-	-



P11		MEDIA	MED+DESVEST	MEDIA	MED-DESVEST
Tiempo min	Flux L/hm ²	Tiempo min	Flux L/hm ²	Tiempo min	Flux L/hm ²
181.20	32.32	-	-	-	-
184.85	32.46	-	-	-	-
187.90	32.69	-	-	-	-

A 5.4. FLUX FINALES

A continuación se muestran los resultados de las pruebas realizadas durante la fase de ajuste (Tabla A5. 9).

Tabla A5. 9. Flux final

100 kPa		200 kPa		300 kPa		400 kPa	
Tiempo min	Flux L/hm ²						
2.42	80.61	1.47	137.99	0.92	212.51	0.55	354.19
6.35	61.36	2.97	137.84	1.75	222.63	1.02	383.22
12.40	47.13	4.40	137.53	2.57	227.69	1.48	393.99
19.62	39.72	5.93	137.07	3.43	226.96	1.93	403.05
28.05	34.72	7.37	136.59	4.30	226.52	2.33	417.44
38.03	30.73	8.78	136.44	5.17	226.23	2.77	422.47
48.57	28.08	10.25	136.13	6.03	226.02	3.17	430.62
58.08	26.83	11.77	135.67	6.90	225.86	3.63	428.93
71.45	24.54	13.18	135.19	7.77	225.74	4.10	427.62
83.43	23.35	14.65	135.04	8.63	225.64	4.52	431.30
96.25	22.26	16.08	134.73	9.52	225.17	5.00	428.57
109.83	21.28	17.58	134.27	10.45	223.70	5.45	428.93
123.62	20.49	19.03	133.79	11.37	222.80	5.95	425.62
136.37	20.00	20.43	133.64	12.30	221.73	6.37	428.37
149.33	19.57	21.92	133.33	13.23	220.81	6.90	423.49
163.08	19.11	23.43	133.01	14.13	220.53	7.38	422.15



APÉNDICE 5: Pruebas prototipo de ultrafiltración

100 kPa		200 kPa		300 kPa		400 kPa	
Tiempo min	Flux L/hm ²						
177.13	18.70	24.98	132.56	15.05	220.05	7.83	422.77
191.75	18.29	26.55	132.07	15.95	219.84	8.32	421.62
206.02	17.97	28.00	132.19	16.82	220.10	8.75	423.01
220.37	17.68	29.60	131.63	17.72	219.91	9.25	421.20
236.18	17.32	31.08	131.61	18.60	219.94	9.67	423.20
251.57	17.04	32.67	131.20	19.52	219.59	10.15	422.24
266.30	16.83	34.23	130.88	20.45	219.10	10.62	422.03
282.38	16.56	35.82	130.53	21.38	218.64	11.12	420.57
297.23	16.38	37.33	130.45	22.33	218.07	11.62	419.24
313.60	16.15	38.88	130.26	23.23	218.00	12.08	419.17
329.55	15.96	40.40	130.19	24.17	217.64	12.55	419.10
346.50	15.74	41.95	130.02	25.08	217.46	13.03	418.51
364.23	15.51	43.52	129.90	25.98	217.42	13.52	417.95
380.98	15.34	45.08	129.82	26.88	217.39	14.00	417.44
396.37	15.24	46.42	129.80	27.73	217.75	14.43	418.40
-	-	48.03	129.78	28.58	218.09	14.93	417.44
-	-	49.58	129.65	29.47	218.16	15.43	416.54
-	-	51.12	129.57	30.37	218.11	15.93	415.69
-	-	52.77	129.21	31.27	218.07	16.45	414.48
-	-	54.25	129.27	32.13	218.25	16.93	414.15
-	-	55.80	129.17	33.02	218.31	17.42	413.84
-	-	57.33	129.12	33.87	218.58	17.92	413.17
-	-	58.90	128.99	34.75	218.63	18.43	412.16
-	-	60.42	128.97	35.62	218.78	18.95	411.20
-	-	61.88	129.07	36.47	219.02	19.45	410.64
-	-	63.33	129.19	37.30	219.35	19.95	410.12
-	-	64.78	129.30	38.15	219.57	20.45	409.61
-	-	66.25	129.38	38.93	220.16	20.95	409.14



APÉNDICE 5: Pruebas prototipo de ultrafiltración

100 kPa		200 kPa		300 kPa		400 kPa	
Tiempo min	Flux L/hm ²						
-	-	67.70	129.49	39.70	220.81	21.52	407.42
-	-	69.15	129.59	40.45	221.53	22.07	406.09
-	-	70.72	129.47	41.22	222.14	22.62	404.83
-	-	72.17	129.57	41.95	222.90	23.17	403.63
-	-	73.72	129.49	42.70	223.55	23.72	402.48
-	-	75.13	129.64	43.53	223.74	24.18	402.77
-	-	76.72	129.50	44.37	223.93	24.65	403.05
-	-	78.17	129.59	45.18	224.19	25.17	402.51
-	-	79.75	129.46	45.95	224.69	25.68	402.00
-	-	81.32	129.36	46.68	225.34	26.17	402.02
-	-	82.82	129.37	47.48	225.64	26.72	401.03
-	-	84.30	129.41	48.25	226.10	27.25	400.33
-	-	85.73	129.52	49.03	226.46	27.75	400.14
-	-	87.28	129.45	49.85	226.65	28.30	399.25
-	-	88.85	129.36	50.68	226.77	28.82	398.85
-	-	90.27	129.49	51.48	227.03	29.33	398.47
-	-	91.77	129.49	52.25	227.43	29.90	397.43
-	-	93.25	129.52	53.15	227.24	30.42	397.08
-	-	94.75	129.53	53.87	227.84	30.95	396.53
-	-	96.25	129.53	54.67	228.06	31.53	395.38
-	-	97.75	129.54	55.48	228.22	32.07	394.88
-	-	99.33	129.43	56.27	228.50	32.62	394.19
-	-	100.83	129.44	57.10	228.58	33.18	393.33
-	-	102.33	129.45	57.92	228.72	33.72	392.88
-	-	103.92	129.35	58.68	229.05	34.27	392.26
-	-	105.37	129.42	59.37	229.70	34.82	391.66
-	-	106.83	129.46	60.20	229.75	35.40	390.71
-	-	108.40	129.39	60.87	230.44	35.97	389.97



APÉNDICE 5: Pruebas prototipo de ultrafiltración

100 kPa		200 kPa		300 kPa		400 kPa	
Tiempo min	Flux L/hm ²						
-	-	109.85	129.46	61.67	230.61	36.53	389.25
-	-	111.37	129.44	62.42	230.96	37.13	388.21
-	-	112.88	129.43	63.23	231.06	37.70	387.54
-	-	114.40	129.42	63.97	231.45	38.28	386.73
-	-	115.65	129.49	64.72	231.78	38.87	385.93
-	-	117.28	129.56	65.43	232.22	39.45	385.17
-	-	118.60	129.76	66.23	232.35	40.00	384.74
-	-	120.15	129.71	67.03	232.49	40.62	383.70
-	-	121.58	129.78	67.87	232.50	41.22	382.84
-	-	123.10	129.76	68.48	233.25	41.80	382.15
-	-	124.50	129.87	69.35	233.15	42.40	381.34
-	-	125.97	129.90	70.15	233.27	42.98	380.70
-	-	127.52	129.85	70.92	233.49	43.60	379.78
-	-	128.48	130.39	71.70	233.66	44.18	379.18
-	-	129.50	130.87	72.45	233.93	44.78	378.45
-	-	130.93	130.93	73.22	234.14	45.37	377.87
-	-	132.42	130.93	74.00	234.29	46.00	376.91
-	-	133.98	130.86	74.80	234.39	46.75	375.03
-	-	135.50	130.83	75.57	234.59	47.17	375.84
-	-	137.05	130.77	76.37	234.68	47.75	375.33
-	-	138.65	130.67	77.12	234.93	48.38	374.44
-	-	140.33	130.59	77.90	235.07	48.93	374.22
-	-	141.67	130.63	78.65	235.30	49.48	373.99
-	-	143.02	130.76	79.42	235.48	50.05	373.65
-	-	143.57	130.84	80.20	235.61	50.62	373.32
-	-	145.32	131.01	80.97	235.79	51.17	373.11
-	-	-	-	81.73	235.96	51.72	372.91
-	-	-	-	82.52	236.08	52.25	372.83



APÉNDICE 5: Pruebas prototipo de ultrafiltración

100 kPa		200 kPa		300 kPa		400 kPa	
Tiempo min	Flux L/hm ²						
-	-	-	-	83.27	236.29	52.82	372.52
-	-	-	-	84.03	236.46	53.35	372.45
-	-	-	-	84.82	236.57	53.90	372.26
-	-	-	-	85.68	236.45	54.40	372.42
-	-	-	-	86.43	236.65	54.93	372.35
-	-	-	-	87.18	236.85	55.47	372.28
-	-	-	-	87.93	237.04	56.00	372.22
-	-	-	-	88.73	237.10	56.53	372.15
-	-	-	-	89.45	237.38	57.05	372.20
-	-	-	-	90.23	237.48	57.60	372.02
-	-	-	-	91.02	237.58	58.12	372.07
-	-	-	-	91.77	237.76	58.62	372.22
-	-	-	-	92.50	237.98	59.12	372.37
-	-	-	-	93.23	238.20	59.67	372.20
-	-	-	-	-	-	60.18	372.24
-	-	-	-	-	-	60.68	372.38
-	-	-	-	-	-	61.18	372.52
-	-	-	-	-	-	61.68	372.66
-	-	-	-	-	-	62.18	372.80
-	-	-	-	-	-	62.70	372.83
-	-	-	-	-	-	63.13	373.36
-	-	-	-	-	-	63.55	373.98
-	-	-	-	-	-	63.95	374.68
-	-	-	-	-	-	64.33	375.48
-	-	-	-	-	-	64.72	376.27
-	-	-	-	-	-	65.08	377.14
-	-	-	-	-	-	65.47	377.91
-	-	-	-	-	-	65.85	378.66



APÉNDICE 5: Pruebas prototipo de ultrafiltración

100 kPa		200 kPa		300 kPa		400 kPa	
Tiempo min	Flux L/hm ²						
-	-	-	-	-	-	66.22	379.51
-	-	-	-	-	-	66.58	380.35
-	-	-	-	-	-	66.95	381.17
-	-	-	-	-	-	67.32	381.99
-	-	-	-	-	-	67.72	382.61
-	-	-	-	-	-	68.00	383.88
-	-	-	-	-	-	68.38	384.58
-	-	-	-	-	-	68.73	385.45
-	-	-	-	-	-	69.08	386.32
-	-	-	-	-	-	69.43	387.18
-	-	-	-	-	-	69.80	387.94
-	-	-	-	-	-	70.17	388.68
-	-	-	-	-	-	70.52	389.52
-	-	-	-	-	-	70.87	390.34
-	-	-	-	-	-	71.23	391.07
-	-	-	-	-	-	71.58	391.88
-	-	-	-	-	-	71.95	392.59
-	-	-	-	-	-	72.27	393.56
-	-	-	-	-	-	72.65	394.17
-	-	-	-	-	-	73.00	394.95
-	-	-	-	-	-	73.33	395.81
-	-	-	-	-	-	73.68	396.57
-	-	-	-	-	-	74.02	397.42
-	-	-	-	-	-	74.37	398.17
-	-	-	-	-	-	74.68	399.09
-	-	-	-	-	-	75.03	399.82
-	-	-	-	-	-	75.40	400.46
-	-	-	-	-	-	75.72	401.36



APÉNDICE 5: Pruebas prototipo de ultrafiltración

100 kPa		200 kPa		300 kPa		400 kPa	
Tiempo min	Flux L/hm ²						
-	-	-	-	-	-	76.07	402.07
-	-	-	-	-	-	76.43	402.69
-	-	-	-	-	-	76.77	403.48
-	-	-	-	-	-	77.10	404.26
-	-	-	-	-	-	77.43	405.04
-	-	-	-	-	-	77.80	405.64
-	-	-	-	-	-	78.17	406.22
-	-	-	-	-	-	78.50	406.98
-	-	-	-	-	-	78.83	407.73
-	-	-	-	-	-	79.18	408.39
-	-	-	-	-	-	79.53	409.04
-	-	-	-	-	-	79.87	409.77
-	-	-	-	-	-	80.22	410.41
-	-	-	-	-	-	80.57	411.05
-	-	-	-	-	-	80.92	411.68
-	-	-	-	-	-	81.25	412.39
-	-	-	-	-	-	81.58	413.09
-	-	-	-	-	-	81.93	413.70
-	-	-	-	-	-	82.28	414.31
-	-	-	-	-	-	82.62	415.00
-	-	-	-	-	-	82.95	415.68
-	-	-	-	-	-	83.17	416.94
-	-	-	-	-	-	83.68	416.69
-	-	-	-	-	-	84.10	416.94
-	-	-	-	-	-	84.52	414.89
-	-	-	-	-	-	84.32	418.18
-	-	-	-	-	-	84.67	418.75
-	-	-	-	-	-	85.00	419.40



APÉNDICE 5: Pruebas prototipo de ultrafiltración

100 kPa		200 kPa		300 kPa		400 kPa	
Tiempo min	Flux L/hm ²						
-	-	-	-	-	-	85.33	420.05
-	-	-	-	-	-	85.68	420.61
-	-	-	-	-	-	86.03	421.16
-	-	-	-	-	-	86.38	421.71
-	-	-	-	-	-	86.72	422.33
-	-	-	-	-	-	87.05	422.95
-	-	-	-	-	-	87.40	423.49
-	-	-	-	-	-	87.75	424.02
-	-	-	-	-	-	88.08	424.63
-	-	-	-	-	-	88.38	425.39
-	-	-	-	-	-	88.73	425.91
-	-	-	-	-	-	89.07	426.50
-	-	-	-	-	-	89.40	427.09
-	-	-	-	-	-	89.75	427.59
-	-	-	-	-	-	90.08	428.17
-	-	-	-	-	-	90.43	428.67
-	-	-	-	-	-	90.75	429.32
-	-	-	-	-	-	91.08	429.89
-	-	-	-	-	-	91.43	430.38
-	-	-	-	-	-	91.77	430.93
-	-	-	-	-	-	92.07	431.65
-	-	-	-	-	-	92.38	432.28
-	-	-	-	-	-	92.77	432.59
-	-	-	-	-	-	93.08	433.21
-	-	-	-	-	-	93.48	433.44
-	-	-	-	-	-	93.77	434.21
-	-	-	-	-	-	94.08	434.82
-	-	-	-	-	-	94.40	435.42



APÉNDICE 5: Pruebas prototipo de ultrafiltración

100 kPa		200 kPa		300 kPa		400 kPa	
Tiempo min	Flux L/hm ²						
-	-	-	-	-	-	94.72	436.02
-	-	-	-	-	-	95.03	436.62
-	-	-	-	-	-	95.35	437.21
-	-	-	-	-	-	95.67	437.80
-	-	-	-	-	-	95.97	438.46
-	-	-	-	-	-	96.28	439.05
-	-	-	-	-	-	96.58	439.70
-	-	-	-	-	-	96.88	440.35
-	-	-	-	-	-	97.17	441.07
-	-	-	-	-	-	97.48	441.63
-	-	-	-	-	-	97.77	442.35
-	-	-	-	-	-	98.05	443.06
-	-	-	-	-	-	98.35	443.68
-	-	-	-	-	-	98.65	444.31
-	-	-	-	-	-	98.95	444.93
-	-	-	-	-	-	99.28	445.40
-	-	-	-	-	-	99.60	445.94
-	-	-	-	-	-	99.87	446.70
-	-	-	-	-	-	100.17	447.31
-	-	-	-	-	-	100.45	447.98
-	-	-	-	-	-	100.77	448.51
-	-	-	-	-	-	101.12	448.88
-	-	-	-	-	-	101.43	449.40
-	-	-	-	-	-	101.72	450.07
-	-	-	-	-	-	102.02	450.65
-	-	-	-	-	-	102.33	451.16
-	-	-	-	-	-	102.65	451.67
-	-	-	-	-	-	102.92	452.39



APÉNDICE 5: Pruebas prototipo de ultrafiltración

100 kPa		200 kPa		300 kPa		400 kPa	
Tiempo min	Flux L/hm ²						
-	-	-	-	-	-	103.27	452.74
-	-	-	-	-	-	103.60	453.17
-	-	-	-	-	-	103.90	453.73
-	-	-	-	-	-	104.22	454.22
-	-	-	-	-	-	104.52	454.78
-	-	-	-	-	-	104.83	455.27
-	-	-	-	-	-	105.15	455.75
-	-	-	-	-	-	105.47	456.23
-	-	-	-	-	-	105.78	456.70
-	-	-	-	-	-	106.12	457.11
-	-	-	-	-	-	106.43	457.58
-	-	-	-	-	-	106.75	458.04
-	-	-	-	-	-	107.07	458.51