

Universidad de Matanzas

“Camilo Cienfuegos”

Facultad de Ingenierías

Departamento de Química e Ingeniería Química



Trabajo Diploma

Título: *Monitoreo y control de las deposiciones e incrustaciones de sales sobre la superficie de las Membranas de la planta de Tratamiento de Agua por Osmosis Inversa de ENER GAS-Varadero.*

Autor: *Yasmany Ramos Suárez.*

Tutores: *Ing. Eduardo Miguel Crespo.*

Ing. Kennys Colina Ceballos

Dr. Ing. Mario Yll Lavín.

Matanzas, 2011

Declaración de Autoridad

Yo Yasmany Ramos Suárez declaro que soy el único autor de este Trabajo de Diploma realizado en la Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”, en el “Monitoreo y control de las incrustaciones de sales sobre las superficie de las membranas de la planta de Tratamiento de agua por osmosis inversa (OI) de ENERGAS en Varadero”. Como parte de la culminación de los estudios en la especialidad de Ingeniería Química, optando por el título de Ingeniero Químico, autorizo que el mismo sea utilizado por la UMCC y la planta ENERGAS-Varadero como material de consulta para todo aquel que lo necesite.

Yasmany Ramos Suárez

*“No hay perfección sin esfuerzo, los
mediocres no siembran rosas por temor a
las espinas.”*

José Ingenieros.

Dedicatoria

Les dedico este trabajo de diploma en especial y en primer lugar a mi madre que es lo más grande que tengo en el mundo ya que ha sido la protagonista de que este sueño se haga realidad, a mi padre por enseñarme a seguir siempre adelante, a mi hermano por su apoyo y preocupación, a mi novia, por permanecer a mi lado en los momentos buenos y malos durante estos años de estudio, a toda mi familia, por haber tenido tanta preocupación sobre mis resultados obtenidos y por haber confiado de que algún día llegaría al final de mi meta trazada.

*“Todo lo que una persona puede imaginar,
Otras podrán hacerla realidad”*

Julio Verne.

Agradecimientos

La palabra imposible carece de sentido siempre que halla personas dispuestas a ayudarte e indicarte el camino a seguir para lograr un objetivo. Por eso, esta página es importante para mí. La ocasión existe y éste es el momento para dar mis más sentidos agradecimientos ha:

- A mi familia de Cárdenas, mamá, mi papá, mi hermano, mi novia, por apoyarme en todo momento y ayudarme a salir adelante.
- A mis abuelos, a mis tíos, a mis primos por preocuparse en saber mi desempeño en este tiempo.
- A mis tutores, Ing. Kenny Colina Ceballos Ing. Eduardo Crespo Morales, Dr.C. Ing. Mario Yll Lavin por toda su ayuda y apoyo en este año de trabajo. Y por ser los mejores.
- A la profesora Irina por tener mucha influencia en la solución de esta tesis.
- A todos los profesores de la facultad de química por sus excelentes clase impartidas en estos cinco año, ya que sin ellos no hubiese sido posible culminar mi carrera.
- A mi excelente grupo Q-51, para ellos un agradecimiento especial, ya que no me alcanzan las palabras para expresar mis más profundos sentimientos durante los cinco años de carrera, por su amistad comprensión y ayuda incondicional, me siento orgulloso por tenerlos a mi lado y triste a la vez por ser este el fin de nuestra historia juntos como estudiantes.

A todos, GRACIAS...

***“La inspiración existe, pero tiene que encontrarte
trabajando.”***

Pablo Ruiz Picasso.

Resumen

La ósmosis inversa (OI) como método de tratamiento de agua está siendo muy empleada en la desalinización con perspectivas al consumo humano e industrial, pero resulta que este proceso presenta la dificultad de la deposición de incrustaciones en las membranas que hacen disminuir la eficiencia de separación de las mismas. Se efectúa una evaluación del patrón de incrustación para mantener una adecuada calidad de operación el sistema, para el cual se plantea la necesidad de realizar un control absoluto mediante un monitoreo de las propiedades químicas del agua, desde su extracción en los pozos a través de su paso por la planta. Se confecciona un estudio con el objetivo de disminuir las incrustaciones de sales causantes y se desarrolla el método del cristal óptico que permite apreciar de forma rápida y sencilla la efectividad de las deposiciones dentro de las membranas. Quedará demostrado que el patrón de incrustaciones es la herramienta indicadora en el correcto funcionamiento del monitoreo y control de las deposiciones e incrustaciones, además se utilizará un banco de prueba para analizar el grado de ensuciamiento de cada membrana. Se emplearán métodos estadísticos para la validación del uso del patrón, se obtendrá un modelo matemático ajustado para la relación del patrón de incrustaciones sujeto al banco experimental y su aplicación a la planta de OI.

Abstract

The reverse osmosis (RO) as method of treatment of water it is being very employee in the desalination with perspectives to the human and industrial consumption, but it is that this process presents the difficulty of the deposition of inlays in the membranes that make diminish the efficiency of separation of the same ones. The inlay pattern's evaluation is made to maintain an appropriate operation quality the system, for which thinks about the necessity to carry out an absolute control by means a control of the chemical properties of the water from its extraction in the wells through its step for the plant. A study is made with the objective of diminishing the inlays of causing salts and the method of the optic glass is developed that allows appreciating in a quick and simple way the effectiveness of the depositions inside the membranes. It will be demonstrated that the pattern of inlays is the indicative tool in the correct operation of the control and control of the depositions and inlays, a test bank will also be used to analyze the grade of incrusting of each membrane. Statistical methods will be used for the validation of the pattern's use, an adjusted mathematical model will be obtained for the relationship of the pattern of inlays subject to the bank to experience and her application to the plant of RO.

Índice

Resumen

Introducción	1
Capítulo 1: Revisión bibliográfica.	4
1.1 - Principios de la ósmosis inversa.....	5
1.1.1 - Ósmosis y ósmosis inversa.....	5
1.1.2 - Aplicaciones de la ósmosis inversa.....	6
1.2 - Sistemas de ósmosis inversa.	7
1.2.1 - Materiales y propiedades que conforman las membranas.....	9
1.2.2 - Variedad de módulos de membranas en la ósmosis inversa.	10
1.2.3 - Configuraciones posibles de módulos de las membranas y capacidad de filtración.	15
1.2.4 - Ventajas y desventajas de los procesos de separación con membranas.....	17
1.3 – Polarización de las membranas.....	17
1.3.1 - Efectos de la capa de polarización y gel	18
1.3.2 - Factor Beta: Polarización de la Concentración	19
1.3.3 - Factor Beta: Posibles efectos Negativos	20
1.4 - Origen del ensuciamiento.....	21
1.4.1 - Consecuencias del ensuciamiento	22
1.5 - Tecnología de limpieza de las membranas.....	22
1.5.1 - Lavado de membranas en plantas de ósmosis inversa.	24
1.5.2 - Simuladores de membranas.....	27
Conclusiones del Capítulo 1	28
Capítulo 2: Características y funcionamiento de la planta de ósmosis inversa.	29
2.1 - Descripción y funcionamiento de la planta de ósmosis inversa de ENERGAS-Varadero.	30
2.1.1 - Etapa de pre-tratamiento.	31
2.1.2 - Etapa de ósmosis inversa.	33
2.1.3 - Etapa de pos-tratamiento.....	35
2.2 - Parámetros de operación y sistemas de control de la planta de OI.	35
Conclusiones del Capítulo 2	38
Capítulo 3: Parte Investigativa.....	39
3.1 - Materiales y métodos	40
3.1.1 - Descripción del banco experimental	40
3.1.2 - Membrana a utilizar para la experimentación	41

3.1.3 - Patrón de incrustaciones	42
3.1.4 - Funcionamiento del patrón de incrustaciones.	42
3.2 - Descripción de la experimentación	44
3.2.1 - Condición para establecer el criterio de similitud.....	45
3.2.2 - Estudio del patrón de incrustaciones en el banco experimental.....	51
3.3 - Aplicación de los métodos estadísticos para los datos experimentales.....	52
3.3.1 - Caracterización estadística de las variables	52
3.3.2 - Determinación de la regresión simple para la presión, la concentración y el tiempo.	52
3.3.4 - Análisis de los resultados estadísticos del banco experimental	56
3.4 - Aplicación del patrón de incrustaciones en el tubo D.....	58
3.4.1 - Estudio de la toma de muestra.....	58
3.4.2 - Validación del patrón mediante la prueba de calidad del ajuste	58
3.5 - Análisis de resultados de la aplicación del patrón en el banco experimental y en el tubo D.	60
3.6 - Análisis efectivo de una colocación del patrón de incrustaciones en la planta de OI.....	62
Conclusiones del Capítulo 3	64
Conclusiones.....	65
Recomendaciones.....	66
Referencias Bibliográficas	67
Anexos	

Introducción

El aumento demográfico y la contaminación progresiva de los recursos hidráulicos, así como su sobre-utilización, están provocando que la disponibilidad de este recurso descienda cada año más hasta el punto de que en ciertas áreas del planeta, el agua potable comienza a ser una sustancia escasa y muy preciada.

La demanda de agua a nivel mundial podría ser comparable con la del combustible, donde en ambos se buscan alternativas para satisfacer las necesidades cada vez más crecientes que esta amenazando a la humanidad.

El agua se le ha declarado como un recurso escaso en muchos países por lo que se han adoptado medidas que van desde su racionamiento hasta su recuperación con previos tratamientos que sean los más económicamente posibles. Con el desarrollo de la tecnología actual, se han creado nuevas alternativas para el tratamiento de aguas y efluentes, esta alternativa es la osmosis inversa la cual ha tenido un desarrollo masivo en el campo de la desalación de aguas salobres y agua de mar, sobre todo en el campo industrial, reemplazando o complementando a los métodos existentes, ya que es un método no excluyente de los otros y en algunos países se ha transformado en la única opción factible.

La sequía se ha hecho más crítica en nuestro país, basta decir que el mes de Mayo del 2009 quedo bien lejos de su tradicional condición de mes de grandes aguaceros, finalizando con un acumulado nacional de 80 milímetros, cifra equivalente al 47 % de su media histórica de lluvia. Esta situación confirma la continuidad del proceso de sequia iniciado en Noviembre del 2008, el cual se intensifico de manera notable en el transcurso del año 2009, clasificado como el año de menos lluvia durante los últimos 109 años en Cuba. Por tal motivo el empleo de la Osmosis Inversa para el tratamiento químico del agua

tiene en estos momentos una gran importancia y en los próximos años tendrá una gran repercusión en la conservación del entorno.

Muchas industrias por sus características necesita agua desmineralizada y un ejemplo de ella es en la empresa ENERGAS en Varadero donde esta instalada una planta de Ósmosis Inversa para el tratamiento del agua destinada a equipos generadores de energía como las calderas que allí se encuentran en el ciclo combinado.

Las membranas de las plantas de Ósmosis Inversa necesitan con cierta frecuencia de lavados químicos para desincrustarlas de las deposiciones y recuperar parcialmente su efectividad, para lo cual se emplean lavados ácidos, básicos y bacteriológicos, en dependencia del tipo de deposición que tenga lugar en el interior de ellas.

Con el monitoreo de la velocidad de las deposiciones en el interior de las membranas se puede llegar a establecer el momento adecuado para la realización de los lavados químicos, recuperando de esta forma la máxima capacidad de los parámetros técnicos que se exigen.

Las relativas complicaciones de las limpiezas de las membranas de una planta de OI es una de las causas que hace que la limiten en la preferencia como método de tratamiento de agua para algunos procesos, pero sin embargo los resultados de la desmineralización por OI son casi insuperables.

Prolongar el momento en que se debe realizar el lavado de las membranas disminuye el grado de recuperación de sus características técnicas y en ocasiones este proceso resulta ser irreversible, reduciendo así el tiempo de vida útil de las membranas. Esto ha motivado a que se inicie esta investigación a través del problema científico que a continuación se formula.

Definiéndose así cómo el **PROBLEMA CIENTIFICO:**

¿Cómo será posible monitorear las deposiciones e incrustaciones de sales durante el funcionamiento de las membranas en una planta de tratamiento de agua por Osmosis Inversa (OI).?

Como una vía de solución al problema científico se propone la siguiente **HIPÓTESIS:**

El uso del patrón de incrustaciones podría ser una vía para la determinación de la cantidad de sales que se encuentran depositadas sobre la superficie de las membranas en una planta de OI.

Y las direcciones en la que están encaminadas este trabajo investigativo son:

Objetivo principal:

- Validar los resultados del uso del patrón de incrustaciones obtenido a nivel experimental.

Objetivos específicos:

- ❖ Establecer el criterio que determina el momento en que se encuentren sucias las membranas a través del patrón de incrustaciones.
- ❖ Aplicar el patrón para determinar el tipo de deposiciones que presenta la membrana.
- ❖ Aplicar el patrón de incrustaciones en el tubo D.
- ❖ Relacionar el uso del banco experimental con el funcionamiento interno del tubo D de la planta de OI.

Capítulo 1: Revisión bibliográfica.

Introducción

Un proceso de separación en el que interviene una membrana ha sido definido como dos fases fluidas multicomponentes, esencialmente uniformes y homogéneas, entre las cuales, materia y energía pueden ser intercambiadas a velocidades que están controladas por las propiedades de una tercera fase, o grupo de fases que las separa: la membrana y todas las resistencias al transporte se sitúan dentro de ella. Todos estos procesos tienen en común el empleo de una membrana, generalmente sintética o semipermeable y tienen como finalidad la separación de una corriente de alimentación en dos corrientes: permeado y concentrado o rechazo, cuya composición será muy diferente para una o varias especies determinadas. La membrana ha de ser elegida de modo que evite el paso a través de una o varias especies, permitiendo el transporte de otras. Dentro de los procesos con membranas utilizados en la industria química se encuentran la ósmosis y la ósmosis inversa, este último está siendo aceptado en el tratamiento de agua para la generación de energía dada a la alta calidad resultante del agua producida.

1.1 - Principios de la ósmosis inversa.

1.1.1 - Ósmosis y ósmosis inversa.

La ósmosis es un proceso natural, gracias al cual se le debe la vida y no es más que el paso del agua a través de una membrana orgánica semipermeable. En los primeros estudios sobre la ósmosis o como se le llamo entonces “proceso osmótico” se desarrollan en los principios de la medicina, la biología, etc. y se remontan a finales del siglo XIX y las teorías por supuesto estaban basadas solamente en el concepto de la absorción y por tanto en el proceso de alimento de la célula. (Jelen, 1991)

Los filósofos en el siglo XIX, ya señalaban: “La absorción por flujo osmótico, a través de la membrana exterior que protege a la célula, que le permite a esta la alimentación y por lo mismo el mantenimiento del proceso de vital de la célula o de un organismo unicelular”. (Kedem y Katchalsky, 1958)

A partir del conocimiento del proceso de la ósmosis, la teoría permitió plantearse que pasaría si se aumentase la presión del lado del agua con sales, ya que si se producía el fenómeno inverso, es decir, pasaba agua limpia del lado salobre al otro, dispondríamos de un sistema para eliminar sales de un agua cargada de las mismas o también para concentrar un soluto que pudiéramos precisar.

Carrión, (2005) plantea que si se aplica una presión exterior, superior a su presión osmótica natural, a la solución concentrada fluye el disolvente y se produce una concentración de solutos (sales) y en consecuencia conseguiremos disminuir la salinidad de un agua. Este proceso contrario a la ósmosis natural es lo que se conoce como ósmosis inversa. Por tal motivo el proceso de “Ósmosis Inversa” u “OI” no es más que el paso del agua desde una solución salobre a través de una membrana semipermeable mediante la aplicación de una presión externa.

El proceso de la ósmosis inversa utiliza una membrana semipermeable para separar y quitar los sólidos disueltos, los orgánicos, los pirogénicos, la materia coloidal sub microorganismos, virus y bacterias provenientes del agua. El proceso se llama ósmosis "reversa e inversa" puesto que requiere de una presión para forzar el agua pura a través de una membrana, saliendo las impurezas detrás y es capaz de quitar 93%-99% de los sólidos disueltos totales (TDS) y el 99% de todas las bacterias, así proporcionando un agua segura y pura. En la figura N₀ 1.1 se representa el principio básico de la ósmosis inversa. (Fernández et al, 2008)

1.1.2 - Aplicaciones de la ósmosis inversa.

Entre 1950 y 1970, se llevaron a cabo innumerables trabajos a fin de implementar el uso de la ósmosis inversa en la desalación de aguas salobres y agua de mar. (Otero et al, 2005)

A partir de 1970, esta técnica comenzó a ser competitiva, y en muchos casos superior a algunos de los procesos y operaciones unitarios usados en concentración, separación y purificación de fluidos. Hay razones para justificar esta creciente supremacía, ya que la ósmosis inversa reúne características excepcionales, como:

- Permite remover la mayoría de los sólidos (inorgánicos u orgánicos) disueltos en el agua (hasta el 99%).
- Remueve los materiales suspendidos y microorganismos.
- Realiza el proceso de purificación en una sola etapa y en forma continua.
- Es una tecnología extremadamente simple, que no requiere de mucho mantenimiento y puede operarse con personal no especializado.
- El proceso se realiza sin cambio de fase, con el consiguiente ahorro de energía.
- Es modular y necesita poco espacio, lo que le confiere una versatilidad excepcional en cuanto al tamaño de las plantas: desde 1 m³/día, a 1.000.000 m³/día.

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica

Se han efectuado numerosas experiencias en la industria para concentrar y purificar líquidos y gases en las plantas de tratamiento de ósmosis inversa, no obstante de lo mencionado, las aplicaciones más difundidas son las que se tratan a continuación.

La OI tiene un amplio rango de aplicaciones, que pueden agruparse en dos categorías:

- Purificación del disolvente (*en este caso el producto es el permeado*).
- Concentración del soluto (*en este caso el producto es el rechazo o concentrado*).

La mayoría de las aplicaciones caen en el primer grupo y fundamentalmente, como ya se ha indicado, son relativas a la obtención de agua potable o ultra pura a partir de aguas de pozos, superficiales, residuales y salobres o de agua de mar. (McGraw-Hill, 2000)

La ósmosis inversa puede aplicarse en un campo muy vasto y entre sus diversos usos se mencionan:

- Abastecimiento de aguas para usos industriales, en la generación de energía y consumo de poblaciones.
- Tratamiento de efluentes municipales e industriales para el control de la contaminación y recuperación de compuestos valiosos reutilizables.
- En la industria de la alimentación, para la concentración de alimentos (jugo de frutas, tomate, leche, azúcar, café, etc.).
- En la industria farmacéutica, para la separación de proteínas, eliminación de virus, etc.

1.2 - Sistemas de ósmosis inversa.

Los sistemas de ósmosis inversa funcionan aprovechando las diferentes presiones osmóticas a ambos lados de una membrana. La propia presión del agua de red de distribución permite que la misma atraviese la membrana osmótica pasando al otro lado, e impidiendo el paso de los contaminantes. Proporcionan agua limpia, más cristalina y de mejor sabor. (R.O.M, 2002)

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica

Entre los dos compartimentos existe una diferencia de presiones tal que la "tendencia natural" del líquido a fluir desde el compartimiento con soluto sea compensado exactamente por la tendencia natural del fluido a circular de una zona de menor presión a una de mayor presión. Existirá equilibrio entre la disolución concentrada que circula por el cilindro interior y el disolvente que circula por el tubo exterior cuando la diferencia de presiones que existe entre el rechazado y el permeado, sea igual a la presión osmótica. Si esta diferencia de presión es superior entonces habrá un flujo neto de disolvente desde dentro hacia fuera. Si la diferencia de presión es inferior entonces no fluirá disolvente hacia el permeado. (Escobar y Sharp, 2003)

Mediante su avanzado sistema de filtración, su efectividad como sistema de depuración está rondando la media el 93-98%, aunque éste porcentaje no es homogéneo, sino que para cada contaminante el porcentaje de eficacia varía. Son sistemas normalmente compactos, que ocupan poco espacio y están diseñados para facilitar el cambio de filtros y membranas. Desde el punto de vista del manejo, todos los sistemas son automáticos y muy cómodos. (Lattemann y Höpner, 2003)

La plantas suelen constar de varios filtros previos (sedimentos, carbón activado, arena...), indicando el funcionamiento inicial como un tratamiento previo o pretratamiento de la planta, el sistema conformado por tubos con membranas osmóticas en su interior es conocida como la Ósmosis Inversa y la etapa de tratamiento o pos - tratamiento la integran generalmente los filtros de lecho mezclados con resinas de intercambio iónico o un sistema de electroionización. (Van y W.G, 2003)

Estos filtros y membranas se cambian cuando esta lo necesite, donde son tratadas después mediante un lavado, alargando así su tiempo de vida útil para la planta y aumentando de manera u otra la producción de agua desmineralizada. En la figura N_o 1.2 se muestra un esquema básico de una planta de tratamiento de agua por OI.

1.2.1 - Materiales y propiedades que conforman las membranas.

Tanto la definición como el concepto de membranas resulta difícil de establecer en la literatura, dada la gran diversidad de las mismas, tanto estructural como funcionalmente. En general, se puede decir que una membrana semipermeable es una interfase física o barrera selectiva que separa dos fluidos multicomponentes en fase líquida o gaseosa, limitando el transporte de algunas de las especies químicas presentes en una determinada dirección. (Wu y Sangyoup, 2007)

Las membranas pueden fabricarse a partir de un gran número de materiales, donde las mismas pueden ser biológicas y sintéticas, las membranas sintéticas pueden ser orgánicas e inorgánicas.

Las más importantes desde el punto de vista de los procesos de separación son las orgánicas según se refiere Rahardinato et al, (2005).

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica

En la actualidad se fabrican diferentes tipos de membranas semipermeables, estas son de diferentes tamaños y constitución:

- Acetato y triacetato de celulosa arrollada en espiral.
- Teflón.
- Poliaramida.
- Poliamida aromática.
- Polietereurea.
- Fibra hueca de poliamida.
- Poliamida arrollada en espiral.
- Polisulfona.

Según Kamalesh, (1998), atendiendo a la gran variedad de existencia de las membranas, las clasifica en dos grandes grupos: integrales y las compuestas.

Membranas integrales son aquellas en que íntegramente están constituidas por un solo material como por ejemplo:

- Poliamida arrollada en espiral: Material plástico, no biodegradable. Muy sensibles a oxidantes. Superficie relativamente áspera, más propensa al ensuciamiento. Carga superficial negativa. Trabaja a muy baja presión.
- Incremento del paso de sales progresivo y limitado con el tiempo. Muy baja o ausente compactación. Amplio espectro de pH. Límite de temperatura hasta 45 °C (40 °C continuos). (Gaeta, 2006)

Membranas compuestas también llamadas de película fina estas membranas se desarrollaron para reemplazar las membranas de acetato de celulosa. Están diseñadas a modo de capas de distintos materiales. Su mayor ventaja es su gran capacidad y rechazo a la sal, lo que hace de este tipo de membranas el perfecto material para la desalinización de agua de mar. (Redondo, 2006)

1.2.2 - Variedad de módulos de membranas en la ósmosis inversa.

Las plantas industriales que utilizan las técnicas de filtración por ósmosis inversa, las mismas requieren de un gran uso de miles de metros cuadrados de membrana para realizar la separación requerida. (Martín, 2001)

Antes de que se produzca industrialmente una separación por las técnicas de membranas se requiere métodos para empaquetar grandes áreas de membrana, estos paquetes se llaman los módulos de la membrana.

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica

Los módulos de ósmosis inversa están definidos por el tipo de material base y su geometría compuesta. Todos los tipos de membranas, para su utilización, deben estar ensambladas en determinados dispositivos llamados módulos. Dichos dispositivos serán diferentes según sea la membrana y el tipo de aplicación que se considere. (García y Ballesteros, 2001)

Los tipos de módulos más comunes son los siguientes, en orden creciente de la relación superficie/volumen.

- ✓ Módulos tubulares
- ✓ Módulos planos
- ✓ Módulos de arrollamiento en espiral
- ✓ Módulos de fibra hueca

En la tabla N_o 1.1 se resumen algunas de las características de los diferentes módulos y su aplicación más común. Se empleará uno u otro sistema según sea: la naturaleza del proceso, las consideraciones fluido-dinámicas, la minimización del efecto del gradiente, el tiempo de vida útil de la membrana, el volumen de la mezcla a tratar y los costos de mantenimiento. (Koyuncu, 2006)

Explicación de los diferentes módulos existentes de membranas:

- Módulos tubulares:

Las membranas tubulares tienen un diseño simple y fácil de comprender. Su gran ventaja es que la misma es altamente resistente a los bloqueos y se utilizan cuando la corriente de alimentación contiene gran cantidad de sólidos en suspensión o compuestos fibrosos. Sus principales desventajas son su alto consumo de energía, alto costo de limpieza y gran requerimiento de espacio. Dupont desarrollo dentro de este tipo de estructura las denominadas membranas de fibra hueca (*hollow fiber membranes*). Este tipo de estructura reduce las desventajas mencionadas pero con la contrapartida de incrementar su precio.

Sirven para ensamblar membranas en forma de filamentos o tubos perforados, con un diámetro aproximado de 0,5 - 5 cm, y longitudes entre 60 cm y 5 m. Los filamentos o tubos porosos pueden presentar la cara activa por la parte interna (el alimento circula por el interior y el permeado se recoge por el exterior) o la

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica

externa (la circulación es al revés), dependiendo del tipo de aplicación. Su ensamblado es relativamente sencillo y su encapsulado en carcasas cilíndricas de PVC o acero inoxidable, permite su instalación en procesos como MF, UF. Uno de sus inconvenientes es que presentan una relación superficie/volumen baja, la más baja de entre todos los diversos tipos de módulos existentes. En la figura N_o 1.3, se muestra un esquema del modulo tubular.

- Módulos planos o de fibra de placa y marco:

La estructura de este tipo de membranas permite soportar presiones de hasta 100 bares y su diseño de canal abierto permite que se lo utilice para productos con muy alta viscosidad. Su alto precio ha hecho de este tipo de configuración sea usado menos frecuentemente. Mantiene ciertas ventajas en aplicaciones con alto contenido de sólidos en la industria farmacéutica, alimenticia y existe aplicación muy específica como la desalinización de agua de mar en barcos.

Consisten en una serie de membranas dispuestas en capas horizontales y separadas por unos espaciadores permeables que actúan como canales que dirigen el flujo, tal como muestra la figura N_o 1.4. En este tipo de ensamblaje, la relación superficie/volumen del módulo depende de la forma y eficacia del material que actúa como espaciador. El conjunto de placas y marcos que constituye el módulo, puede asociarse en serie o en paralelo, lo que permite diseños con superficies de filtrado elevadas (de varias decenas de m²). Tienen la ventaja de ser suficientemente compactos, así, para cartuchos de 250 cm de altura y unos 30 cm de diámetro, el área contenida en su interior suele oscilar entre 0,5 a 2 m², dependiendo del espaciador. De todas formas, la relación superficie/volumen es baja comparada con otros diseños, lo que exige instalaciones de mayor tamaño. Son de fácil accesibilidad tanto para la sustitución como para la limpieza de cualquier membrana.

Módulos de fibra hueca:

Es uno de los diseños más novedosos, en los que la membrana se presenta como un tubo auto soportado, con la capa activa en la superficie interior, que es cilíndrica y uniforme. Su diámetro suele oscilar entre 0,25 y 1,25 mm., con un espesor de pared de aproximadamente 200 μ m. Las fibras se disponen en forma de haces o paquetes constituidos por un número variable de fibras, que

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica

oscila entre algunas decenas a varios millares, dependiendo de su diámetro y del tamaño del cartucho que las contiene.

Los cartuchos se sellan en sus extremos donde se enlazan las fibras mediante sendos tubos, como muestra la figura N^o 1.6. Uno de los inconvenientes de las fibras huecas es que no se pueden emplear en absoluto para separar suspensiones o disoluciones de muy alta concentración, debido a que su superficie activa se puede bloquear en poco tiempo, reduciéndose drásticamente la eficacia del proceso.

Son particularmente recomendables en procesos de SG y OI con disoluciones limpias y de baja concentración (desalinización y tratamiento de aguas). Su coste es bajo, además los elementos de membrana pueden recuperarse y ser reutilizadas para ensamblar nuevas membranas. Son de fácil accesibilidad tanto para la sustitución como para la limpieza de cualquier membrana, aunque generalmente necesitan pre filtrado. Estas suelen construirse en dos geometrías distintas según qué:

a) El alimento circule por el exterior de las fibras (por la carcasa), en cuyo caso la capa activa estará situada en la parte exterior de las mismas. Las fibras estarán cerradas por un extremo y el permeado pasará a través de las paredes de las fibras hacia el interior y saldrá por el extremo abierto. Se usa para aplicaciones que requieran altas presiones (<70 bar).

b) El alimento circule por el interior de las fibras, en cuyo caso la capa activa estará situada en la parte interior de las mismas. Las fibras estarán abiertas por ambos extremos. El alimento circula por el interior de las fibras y el permeado pasará a través de las paredes hacia la carcasa. Para minimizar la caída de presión, los diámetros son generalmente, mayores que en el caso a). Se usan para aplicaciones que requieran presiones medias (< 10 bar). (Bódalo, 2007)

- Módulos arrollados en espiral

Las membranas espirales son la configuración más usada en todo tipo de aplicaciones, debido a su diseño compacto y a la gran área de membrana relativa por elemento, son una buena solución costo-eficiencia para aplicaciones de gran volumen con sólidos mínimos suspendidos o no, con la

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica

ventaja de tener en ambos casos una baja inversión de capital y de costos de energía. Este tipo de configuración se ha hecho el más atractivo para todo tipo de industria. Su diseño está basado en una capa de membrana enrollada junto a una estructura que permite el paso de permeado y concentrado respectivamente. (Pandey, 2006)

Más del 60% de los sistemas instalados en el mundo trabajan con elementos en espiral debido a tres ventajas apreciables:

- Buena relación del área de membrana/volumen del elemento.
- Diseño que le permite ser usado sin dificultades de operación en la mayoría de las aplicaciones.
- Admite un fluido con una turbiedad más de tres veces mayor que los elementos de fibra hueca.

Consisten en una serie de membranas planas separadas entre sí por capas de tejidos de distinta naturaleza que funcionan como transportadores y generadores de turbulencia de las disoluciones de alimentación y permeado.

Para su fabricación se parte de dos láminas de membrana que se colocan paralelas situando sus caras activas hacia el exterior, y se separan por una malla. Se pegan por tres de los cuatro lados y se fijan por el lado abierto alrededor de un tubo hueco (poroso).

Finalmente todo el sistema queda protegido por una carcasa cilíndrica (al igual que en los módulos tubulares) de PVC o acero inoxidable, lo que permite trabajar a altas presiones. El alimento fluye axialmente (paralelo al tubo central), mientras que el permeado fluye radialmente hacía el tubo central donde se recolecta. (Porter, 2005)

La estructura cilíndrica multicapa permite un buen empaquetamiento y posibilita que el permeado fluya en espiral hacia el centro del módulo y desagüe a través del tubo poroso central.

La longitud del módulo suele oscilar entre 0,5 y 1,5 m. Se consiguen densidades de empaquetamiento del doble o más que en los módulos planos. La relación superficie/volumen puede oscilar entre 500 y 2000 m²/m³. Es uno de los más económicos en lo que a consumo energético se refiere.

Generalmente, suelen ensamblarse en una sola carcasa varios módulos conectados en serie a través de los tubos centrales de recogida del permeado.

De esta forma, pueden conseguirse altas áreas de membrana. Se muestra en la figura N₀ 1.5 los módulos de membranas arrolladas en espiral.

1.2.3 - Configuraciones posibles de módulos de las membranas y capacidad de filtración.

Un único módulo en ocasiones no es suficiente para soportar los caudales requeridos en una determinada separación. El uso de un solo elemento exigiría un área de membrana muy grande y en estos casos es necesario recurrir a sistemas formados por varios elementos. En la figura N₀ 1.7, se muestran algunas de las posibles configuraciones de múltiples elementos en los módulos de las membranas. La figura N₀ 1.7a podría resolver el problema de capacidad: se trata de conectar dos o más elementos en paralelo. Cuando el problema es que un único elemento no es capaz de separar una determinada cantidad de especies permeables, se pueden conectar dos o más elementos en serie se plasma el ejemplo en la figura N₀ 1.7b. La figura N₀ 1.7c representa una combinación de elementos en paralelo y serie y sería útil cuando se requiere altos flujos y alta recuperación de la especie deseada. En esta configuración, se observa que el número de elementos (módulos) en paralelo va disminuyendo a medida que se va eliminando el permeado. (QAIS et al, 2006)

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica

Otra alternativa, empleada, es la representada en la figura N₀ 1.7d que corresponde a un sistema con reciclado. Este sistema proporciona altas velocidades de los fluidos a ambos lados de la membrana, disminuyendo la probabilidad de que se produzca polarización por concentración y además proporciona altas recuperaciones de las especies deseadas. Esta última configuración se utiliza preferentemente en operaciones discontinuas para el procesado de líquidos más que de gases, como muestra la figura N₀ 1.7e.

Por último, cuando la selectividad de una membrana es demasiado baja (próxima a la unidad) para obtener un permeado suficientemente puro, puede usarse un sistema en cascada, en serie y con recirculación, como el de la figura N₀ 1.7f (Nicolaisen, 2005; Koyuncu, 2006)

La degradación de los recursos y la evolución de las normas de calidad del agua, favorecen el desarrollo de las técnicas de filtración con membranas para el tratamiento del agua en general.

La capacidad de filtración de las membranas depende:

- a) La composición química del fluido a filtrar y el material semipermeable que se requiere debido a su composición.
- b) La temperatura del fluido.
- c) La presión de operación.
- d) Sólidos totales disueltos a ser removidos.

Según Rigola, (2005) plantea que la filtración convencional (lenta y rápida) usa material particulado, mientras que la filtración por membranas emplea membranas especiales. La diferencia entre las categorías reside en el tamaño de los poros de la membrana filtrante. En tal sentido, la propiedad desinfectante de estas membranas depende de la capacidad que tengan para retener los microorganismos patógenos debido a que las dimensiones de estos son superiores al tamaño de los poros.

1.2.4 - Ventajas y desventajas de los procesos de separación con membranas.

Según Ridgway, (2005) plantea que estos procesos de separación con membranas presentan ventajas y desventajas las cuales serían favorables o desfavorables en el funcionamiento de la planta.

Ventajas:

- La separación puede llevarse a cabo de forma continua.
- El consumo de energía es generalmente bajo.
- Son fácilmente adaptables y se pueden combinar junto con otros procesos de separación.
- La separación puede llevarse a cabo en condiciones de baja capacidad de trabajo (por ejemplo a temperatura ambiente).
- Fácil cambio de escala (equipos modulares).
- Las propiedades de las membranas son variables y se pueden ajustar, según sean las necesidades específicas de separación.
- Generalmente, no requieren el uso de aditivos.

Desventajas:

- El fenómeno de la polarización por concentración, lo que provoca el ensuciamiento (o bloqueo de la membrana).
- Baja vida de uso de la membrana.
- Generalmente, baja selectividad.

1.3 – Polarización de las membranas.

La polarización es un fenómeno por el cual la concentración de un soluto en las paredes de la cámara de rechazado es mayor que en el seno de la disolución de rechazado. Este fenómeno se origina por el arrastre de las moléculas de soluto hacia la pared de la membrana por parte del disolvente que permea a través de la membrana. En condiciones estacionarias este arrastre viene compensado por la retrodifusión del soluto. (Romero, 2007; Bowen et al, 2004)

1.3.1 - Efectos de la capa de polarización y gel

A causa de la formación de esta capa de gel se incrementa la presión osmótica de la disolución en la superficie de la membrana, disminuye la velocidad de permeación del solvente, aumenta la velocidad de permeación del soluto y reduce la selectividad de las membranas. (Calvo, 2007; JJ Network, 2001)

Puede haber precipitación de soluto sobre la membrana cuando la concentración de gel sea mayor que la solubilidad del soluto y llegar hasta bloquear los poros de la membrana totalmente. Este último puede suceder con sales poco solubles, coloides y materias en suspensión sobre la superficie de la membrana. Esta situación se debe poder solucionar mediante lavado de la membrana con agua.

Por los efectos anteriores es limitar la concentración en la capa límite de tal manera que el factor de polarización no supere el valor de 1,15.

La polarización por concentración es un fenómeno inevitable en el proceso de separación con membranas, pero es posible reducir su efecto si se trabaja bien sobre las condiciones de operación a través de diferentes estrategias, una de esta puede ser trabajar con un régimen de flujo turbulento elevado, o un régimen laminar con un esfuerzo cortante de gran magnitud sobre la superficie de la membrana. (Mairal et al, 2005)

Si aumenta la concentración en el flujo de alimentación y se produce adsorción, o interacción química de sustancias en la superficie de las membranas o al interior de los poros, entonces aumenta la polarización de la membrana, puesto que los depósitos sobre las mismas retrasan la retrodifusión de los solutos hacia la corriente principal, ocasionando una disminución de la productividad y un aumento en el paso de esos solutos, y por consiguiente una mayor concentración del permeado. (Acawash, 2007)

La polarización por concentración esta representada por su ecuación característica.

Para tenerla en cuenta, se introduce el **módulo de polarización: M** :

$$M = \frac{c_w}{c_b} \quad (1.1)$$

donde: c_w = concentración de soluto en la interface alimento-membrana

c_b = concentración de soluto en flujo global (lado del alimento)

Si se admite que la membrana es totalmente semipermeable ($R^0 = 1$), el balance de materia, en estado estacionario, en el lado de la corriente alimento es:

$$\left[\begin{array}{l} \text{Flujo convectivo} \\ \text{de soluto} \\ \text{hacia la membrana} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Flujo difusivo} \\ \text{de soluto} \\ \text{desde la membrana} \end{array} \right] = 0$$

Para la mayoría de los procesos con membranas la polarización está presente en cada momento del proceso por lo que se hace muy importante destacar sus causas y consecuencias de su surgimiento justificada por la ecuación anterior.

1.3.2 - Factor Beta: Polarización de la Concentración

Es una medida del incremento de la concentración de iones en la región límite del flujo con la membrana. En esta capa límite, el flujo tiende a hacerse laminar y los iones en solución se polarizan contra las cargas de la membrana. Para evitar esta polarización, que se traduce como un incremento de la concentración que "ven" las membranas, se debe aumentar la turbulencia en el flujo de alimentación/ concentrado, mediante el aumento de la velocidad del flujo.

Para sistemas en aguas naturales, el límite recomendado para el

Factor beta es 1.2 (20% de incremento de la concentración).

Cuando la alimentación es de muy baja salinidad, como en el caso de permeados de O.I el Factor Beta pierde importancia.(Pei et al.2006)

1.3.3 - Factor Beta: Posibles efectos Negativos

- ✓ Disminución en el flujo de producto, debido al incremento de presión osmótica en la superficie de la membrana.
- ✓ Incremento del paso de sales, puesto que el paso de sales es proporcional a la diferencia de concentraciones a ambos lados de la membrana.
- ✓ Precipitación e incrustación de sales poco solubles, si su concentración en la capa límite excede la saturación, incrementando frecuencia e intensidad de limpiezas.

Cuando ocurre la separación con membranas a medida que avanza el tiempo van quedando solutos en el lado de la alimentación las cuales pertenecen mayoritariamente a sales disueltas que no han podido pasar al permeado.

Estos solutos son arrastrados por la corriente de rechazo, pero la velocidad con que ocurre el arrastre en la superficie de la membrana es casi nula, por lo que éstos solos pueden pasar a la corriente rápida de rechazo por difusión, produciéndose en sentido contrario a la del flujo a permear, razón por la cuál se le puede llamar retrodifusión. (Lee et al, 2005).

Con el tiempo esta concentración de soluto en proximidades de la superficie de la membrana se incrementa obteniendo un valor límite donde los dos flujos opuestos se igualan hasta llegar el estado estacionario. Sin embargo puede suceder que la concentración de soluto en la capa de polarización se incremente a tal punto que llegue a formarse una capa de gel que se opone a la transferencia de la materia. (Mehdizadeh, 2005)

1.4 - Origen del ensuciamiento

El ensuciamiento de las membranas puede originarse de las siguientes formas:

- Físico-químico: adsorción de moléculas sobre la superficie de la membrana.
- Químico: poca solubilidad en la capa de polarización o insolubilización por cambios de condiciones.
- Mecánico: depósitos en los poros de las membranas bloqueándolos.
- Hidrodinámicos: irregularidad en el reparto del flujo que acelera la concentración por polarización y el ensuciamiento en zonas de la membrana que trabaja con conversiones elevadas y la existencia de zonas muertas que tienen muy poco flujo.

El ensuciamiento de las membranas ocasiona una gran resistencia en el paso del permeado mientras transcurre el tiempo, por lo que existen ecuaciones que permiten demostrar esta afirmación. (Chonga et al, 2006)

$$J = \frac{\Delta P}{R_m + R_e} \quad (1.2)$$

Donde:

J: velocidad de permeación convectiva

R_m : resistencia de la membrana

R_e : resistencia del ensuciamiento

El ensuciamiento se relaciona con el tamaño de molécula o partícula (d) y el tamaño de poros de la membrana (d_p), este ensuciamiento viene dado por las siguientes condiciones:

Si $\frac{d}{d_p} > 1 \rightarrow$ existe ensuciamiento por adsorción solo en la superficie de la membrana.

Si $\frac{d}{d_p} < 1 \rightarrow$ ensuciamiento también en el interior de los poros. Esta condición si incide en la velocidad de permeación.

Es importante tener presente que una alta velocidad tangencial de circulación, resulta en un incremento del esfuerzo cortante sobre la superficie de la membrana, desfavoreciendo la adsorción de moléculas sobre ellas.

1.4.1 - Consecuencias del ensuciamiento

Entre los efectos del ensuciamiento se puede mencionar la reducción del tamaño aparente de los poros e incremento de la selectividad con el paso del tiempo, pero con reducción de la velocidad de permeado. No obstante esta reducción aparente de los poros es de acuerdo a la estructura inicial de ellos y del tamaño de las sustancias que causan el ensuciamiento. La disminución de la velocidad de permeación tiene una influencia negativa sobre la economía de una operación con membranas y por consiguiente la medida a tomar es la de reducir su ocurrencia, la cual se recomienda mediante el pre-tratamiento del flujo de alimentación, del que se espera sirva como método preventivo de este ensuciamiento y preserve la membrana de sustancias o elementos agresivos. Desde el punto de vista microscópico el aumento del GPD (galones por días) puede producir lo que se denomina "efecto de la capa limite" que no es más que los iones de sales y partículas en disolución que se depositan sobre la superficie de la membrana y se forma una alta concentración de ellos que las pueden impermeabilizar. (Bódalo et al, 2007)

1.5 - Tecnología de limpieza de las membranas.

La correcta elección del sistema de lavado de las membranas se ha convertido en un campo de investigación como la propia operación de ósmosis inversa dada la importancia que tiene la primera sobre la segunda.

No tan solo el logro de perfeccionar el sistema de lavado de las membranas es de suma importancia, sino también encontrar el tipo de lavado específico a ejecutar en las membranas ya sea ácido, básico o bacteriológico, es un factor fundamental que se caracteriza dentro de los sistemas de lavados de las membranas. (Calvo, 2007)

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica

No se concibe la implantación del tratamiento de agua por ósmosis inversa sino se tiene previsto en el mantenimiento de la planta un sistema adecuado de lavado de las membranas ya que de esta depende el éxito de la operación. (Cartwright, 2004)

En Calder, (2003) afirma que el cuidado de la membrana es uno de los problemas principales en torno al mantenimiento de los potabilizadores de agua, dependiendo de la forma en que se utilice el mismo, el cuidado de la membrana puede ser la parte principal del mantenimiento necesario. El alcance del trabajo comprometido varía notoriamente de una unidad a otra, principalmente en función de la calidad de la filtración del suministro de agua, la regularidad de uso y de si existe un circuito automático de limpieza.

Con el paso del tiempo, es inevitable que se formen incrustaciones en una membrana, en cuyo caso, el potabilizador de agua exhibe presiones mayores y caudales menores que lo normal. Sin embargo, antes de asumir que la membrana es la defectuosa, se debe de revisar la salinidad, la temperatura de la alimentación, las presiones de trabajo y los filtros. (Jaber y Ahmed, 2004)

Según se plantea en (Cartwright, 2004) la Ley de Murphy siempre prevalece y ninguna cantidad de pretratamiento eliminará por completo el ensuciamiento, en cierto momento la limpieza llegará a ser necesaria.

Teniendo en cuenta en este período de la limpieza de las membranas los principales criterios a seguir, son:

- Disminución en un 10% del rendimiento. (Consiste en el agua producida entre el agua de alimentación por 100, donde el agua producida no es más que el agua de alimentación menos el agua de rechazo o concentrado).
- Regla del 10%. (Consiste en el aumento de la presión diferencial sobre las originales de operación establecidos después de lavados o de arranque). (Sudak, 2001)

Estos dos criterios son los más utilizados, pero otros síntomas para proceder a la limpieza son:

- Aumento de la presión de operación.
- Aumento tanto de la salinidad como la conductividad del agua producto.

- Aumento de la presión de entrada en un 10% sobre lo original.
- Reducción del 10% en el caudal del agua de producto o en la calidad del agua.

Como resultado de la polarización de concentración, una disminución en la calidad del agua de producto podría señalar el inicio del ensuciamiento antes de una disminución en el caudal del permeado.

Es importante limpiar las membranas antes de que se ensucien profundamente. El ensuciamiento profundo puede mermar la efectividad de la limpieza química al impedir la penetración de los químicos. Si el funcionamiento normalizado de la membrana baja en un 30 a 50%, puede resultar imposible restaurar el funcionamiento a sus condiciones de diseño. (Vilker et al, 1981)

1.5.1 - Lavado de membranas en plantas de ósmosis inversa.

Cada planta tiene que encontrar su solución de lavado más óptima, ya que literalmente no existen dos aguas con condiciones idénticas, y la disponibilidad de reactivos varía en cada caso. Sin embargo, la experiencia establece ciertas reglas generales que pueden acortar la búsqueda de la solución óptima.

El ensuciamiento de una membrana es un problema general asociado a todos los procesos de separación por membranas y se debe al taponamiento o recubrimiento en las paredes internas o externas de las membranas con sustancias o partículas que lleva la corriente alimentada que se desea separar. (Colina, 2008)

Las incrustaciones en las membranas provocan una disminución del flujo con el tiempo, sin embargo este fenómeno es parcialmente reversible si se ejecuta un correcto y eficiente lavado y así recuperar total o en parte del flujo inicial. (Baker, 2004)

Las causas que pueden provocar este ensuciamiento pueden ser muchas tales como, la precipitación, la absorción, atracción electrostática, crecimiento biológico y polimerización. (Zhang, 2003)

Hasta el momento no existe un método que determine en una planta de OI cual de las membranas se encuentra lejos de sus parámetros de operación, es decir con una elevada concentración de sales, lo que se ha realizado para justificar

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica

esto es la autopsia de las membranas que es un método que permite obtener de forma más directa el índice de incrustamiento de la misma y que consiste en sacrificar la membrana quedando inutilizable. Este método no es recomendable aplicarlo en todo momento ya que aumentan los gastos económicos debido al alto precio que tienen las membranas.

Según Unitek, (2004) el problema del ensuciamiento de las membranas, resulta ser el más crítico a enfrentar durante la operación de las plantas de OI y aclara que la limpieza de estas no deberá transformarse en un sustituto del sistema de pretratamiento, pues los limpiadores no son generalmente efectivos en un 100% e incluso algunos podrían afectar el rechazo de sales de la membrana. Por otra parte se insiste que con un adecuado pre-tratamiento, un equipo de ósmosis inversa, no debería ser limpiado más de una vez al año y la vida útil de las membranas debería ser de al menos 3 años.

El problema fundamental durante el funcionamiento de las plantas de OI resulta ser el ensuciamiento de sus membranas pero difiere de lo antes expuesto referente a la frecuencia de los lavados planteando que estos pueden realizarse cada cuatro meses y respecto a la vida útil de las membranas se afirma que se encuentran entre los 2-3 años, tomando como referencia los reportes de la experiencia del funcionamiento de algunas plantas, aunque se reconoce que otras literaturas reportan valores mayores. (Unep-letc, 2006)

Se precisa con Baker, (2004) que la frecuencia de lavados en estas instalaciones no deben ser mayores a una o dos veces al año y que la causa de frecuencias mayores en los lavados está dada por problemas en la calidad del agua de alimentación. Aunque no deja de tener razón existen otras circunstancias que provocan el aumento de la frecuencia de lavado como son: intensidad de régimen de operación, mal diseño de pretratamiento, inadecuada dosificación de químicos y otras.

Establece (Cartwright, 2004) como criterio que para cada tipo de material que se ensucia, la forma óptima de pretratamiento puede ser diferente, por lo que es extremadamente importante que el agua de alimentación sea analizada completamente para identificar los principales candidatos que puedan causar el ensuciamiento de las membranas. En numerosos casos se recomienda hacer pruebas en el sitio para optimizar las tecnologías de pretratamiento. Además

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica

que ninguna cantidad de pretratamiento eliminará por completo el ensuciamiento de las membranas por lo que en cierto momento la limpieza llegará a ser necesaria.

Con un adecuado pre-tratamiento, un equipo de ósmosis inversa, no debería ser limpiado más de una vez al año y la vida útil de las membranas debería ser de al menos 3 años, aunque podría existir la posibilidad de un aumento de vida útil a 5 años o más en dependencia de los parámetros evaluativos y operacionales que están incidiendo en el funcionamiento de las membranas y conjuntamente con la ayuda de un procedimiento que se pueda aplicar a las mismas en particular para poder reintegrarlas reiteradamente al proceso. (Salgot y Angelakis, 2001)

Se plantea en Delgadillo y Ramírez, (2003) que el método o estrategia del sistema de limpieza de las membranas utilizadas depende de muchos factores y en la práctica los métodos más adecuados son determinados por prueba y error a medida que transcurre el tiempo de funcionamiento de una planta.

Pero (Shelef, 2002) establece que cuando se tiene un ensuciamiento que resulta en más de un 25% de pérdida de flujo, generalmente se requiere de un sistema de limpieza de membrana por membrana por empresas especializadas.

De acuerdo a los criterios de (Shammiri y Dawas, 2005) se recomienda como primer paso identificar el agente causante del ensuciamiento de las membranas y a continuación seguir de forma estricta las recomendaciones del fabricante de las membranas o el proveedor de los productos químicos para el lavado.

1.5.2 - Simuladores de membranas

El uso un simulador en paralelo da la información del contenido de deposiciones de materia orgánica existente al flujo de entrada principalmente, pero no me representa el contenido de sales incrustadas sobre la superficie interna de las membranas, siendo este un factor importante en el buen funcionamiento del estado técnico de las mismas.

Es por ello que la autopsia de las membranas como herramienta para determinar el tipo de lavado a realizar a partir de la información recibida con el sacrificio de una membrana no resulta ser un método infalible en la determinación de este, pues los resultados del tipo de deposiciones obtenidos a partir del sacrificio de una membrana dependen de la configuración de los módulos de la planta, así como la posición de la membrana sacrificada.

Para saber los materiales causantes del ensuciamiento (Vigo, 2003) realiza el análisis de la autopsia de las membranas que es una herramienta principal para solucionar los problemas de ensuciamiento en las instalaciones de ósmosis inversa. Es decir, mediante ensayos destructivos se sacrifica una membrana para su estudio con el objetivo de resolver entre muchos otros problemas el tipo de deposiciones que tiene lugar en su interior y de esta forma determinar el tipo de lavado más adecuado a ser empleado en cada caso.

Como bién se plantea anteriormente una vez que se le realice el análisis de la autopsia de la membrana luego de ser utilizada por un largo período de tiempo se puede comprobar la cantidad de incrustaciones de sales que la misma presenta en su interior pero se ha de tener en cuenta que dicha membrana será desechada una vez aplicada esta operación.

Vrouwenvelder et al, (2007) coloca un simulador en paralelo a la entrada de la planta de OI para el estudio de las deposiciones en el interior de las membranas y la misma se encuentra dentro del rango de los valores de las deposiciones obtenidos a partir de la información recibida durante la aplicación del método destructivo de la autopsia de las membranas. Dado a sus estudios realizados garantiza de manera efectiva la relación lineal que existe entre la caída de presión y la distribución del flujo, lográndose así la predicción y el control de las líneas de las plantas de OI.

Conclusiones del Capítulo 1

De la revisión bibliográfica se concluye:

- Existen diversas recomendaciones que dan lugar a un incremento de la vida útil de las membranas, pero no un procedimiento para monitorear el estado técnico de las membranas que permita lograr este objetivo.
- En toda la literatura consultada no existe un método único y mucho menos una estrategia para decidir el momento preciso y tipo de limpieza de las membranas.
- Con la realización de la limpieza de las membranas a tiempo se puede recuperar prácticamente en su totalidad la eficiencia de estas.
- Una prolongación del tiempo de realización de las limpiezas de las membranas, disminuye el porcentaje de recuperación de los indicadores técnicos de las mismas y en ocasiones resulta ser del todo irreversible.

Capítulo 2: Características y funcionamiento de la planta de ósmosis inversa.

Introducción:

La planta ENERGAS-Varadero requiere para sus calderas un agua con una alta calidad (agua totalmente desmineralizada), el empleo de la OI ofrece una serie de ventajas por ser esta un tratamiento no contaminante y el costo de producción del agua desmineralizada a partir de aguas de pozos resulta similar al que se obtiene a partir de los métodos convencionales de intercambio iónico. Resulta ser un proceso novedoso en el tratamiento del agua con fines industriales y por las características geográficas de Cuba constituye un método en la búsqueda de soluciones alternas al creciente déficit y consumo de agua para diferentes fines y a la vez contribuye a la conservación del medio ambiente.

2.1 - Descripción y funcionamiento de la planta de ósmosis inversa de ENERGAS-Varadero.

Este sistema de tratamiento de agua es el propuesto para las calderas con domos del ciclo combinado de la planta de ENERGAS-Varadero.

El agua que es utilizada para el tratamiento por ósmosis inversa debe ser previamente clasificada en aguas alcalinas, salinas, ferruginosas, sulfurosas, aciduladas y arseniosas y en dependencia de ello se conforma el diseño del proceso de tratamiento. Vicente, (2005).

En este caso el sistema de tratamiento de estas aguas lo integran dos etapas, la primera que se denomina pre-tratamiento, la cual consiste en lograr una determinada calidad de agua antes de que la misma siga hacia su segunda etapa de tratamiento.

Esta primera etapa comienza con la entrada del agua cruda, la cual como se caracterizan las aguas subterráneas resulta ser un agua con una dureza elevada. El equipamiento para este pre-tratamiento lo constituyen principalmente bombas dosificadores para el hipoclorito de sodio, un tanque de almacenamiento de agua cruda, filtros multimedia y filtros de cinco micras.

En la segunda etapa del tratamiento se comienza con la planta de Ósmosis Inversa (OI), la cual se está compuesta por dos líneas idénticas, OI-1 y OI-2. Cada una de estas líneas trabajan de forma independiente y por lo general cuando una de ellas se encuentra en producción la segunda se encuentra en reposo o en modo de espera. En el modo de espera la planta cuenta con un sistema automático, diseñado para que se garantice una buena conservación del estado técnico de las membranas, este sistema consiste en hacer recircular cada cuatro horas durante un intervalo de 20 minutos el agua cruda por el interior de las dos etapas de permeado de la planta, expulsando el concentrado hacia el drenaje. De esta forma se evita que tenga lugar las deposiciones sobre la superficie de las membranas de los sólidos solubles presentes en el concentrado, además se evita el crecimiento de materia orgánica en el interior de las membranas.

Capítulo 2: Descripción del proceso

El agua luego de pasar por ambas etapas de OI se envía hacia los filtros de lechos mezclados, a la salida de los cuales se alcanza un agua totalmente desmineralizada o agua ultra pura.

Posteriormente esta agua se deposita para su almacenamiento en dos tanques, a partir de los cuales se garantiza el volumen de reposición necesario para mantener el funcionamiento las calderas del ciclo combinado en Energas-Varadero.

A continuación se describe con más precisión las dos etapa del tratamiento.

2.1.1 - Etapa de pre-tratamiento.

El pre-tratamiento tiene como función eliminar todos los sólidos en suspensión del agua, con el objetivo de garantizar que se reúnan las condiciones adecuadas antes de ponerse en contacto directo con las membranas en el proceso de ósmosis inversa.

Para garantizar una adecuada efectividad del pretratamiento del agua se debe realizar frecuentemente un análisis del agua de alimentación, solo de esta forma se puede alcanzar un tratamiento previo del agua de forma adecuada.

Wrouwenvelder, (2002) confirma que un sistema adecuado de pre-tratamiento del agua resulta ser esencial para garantizar una vida prolongada de las membranas en las plantas de OI, con la diferencia de que este podría ser o no necesario si se cuenta con un apropiado esquema de lavado, aunque se precisa que la frecuencia de lavados en estas instalaciones no deben ser mayores a una o dos veces al año y que la causa de frecuencias mayores en los lavados está dada por problemas en la calidad del agua de alimentación.

Para cada tipo de material que las membranas se ensucian, la forma óptima de pre-tratamiento puede ser diferente, por lo que es extremadamente importante que el agua de alimentación sea analizada completamente para identificar los principales candidatos que puedan causar el ensuciamiento de las membranas. En muchos casos se recomienda hacer pruebas en el sitio para optimizar aún más las tecnologías de pre-tratamiento. (Vrijenhoek y Elimelech, 2004)

Capítulo 2: Descripción del proceso

Se debe realizar un análisis del agua de alimentación, donde deben ser representativos los valores obtenidos y esta estaría siendo la única base confiable para el diseño de un pre-tratamiento efectivo. En la tabla N₀ 2.1 se representan los datos del análisis del agua cruda de la planta de Ol de Varadero.

Esta etapa se comienza con la entrada de agua cruda desde los pozos de la Empresa Aguas Varadero, la que posteriormente se deposita en una cisterna de capacidad cinco m³, donde a partir de aquí comienza el pre-tratamiento.

Seguidamente el agua es bombeada hacia un tanque de 240m³, en el cual se inyecta una dosis exacta de hipoclorito de sodio (NaOCl), para mantener un residual libre de cloro entre 1.0 - 1.5 mg/L, con el objetivo de eliminar la presencia de microorganismos en el agua. Posteriormente el agua se bombea hacia los filtros de multimedia (TK - 3600), el cual está compuesto en su interior por una cama de arena sílice de diferentes granometrías, ordenadas de menor a mayor tamaño en el sentido de flujo, evitando de este modo el paso de sólidos dispersos y partículas coloidales hacia el interior de las membranas. De esta forma se disminuye las deposiciones de estas partículas sobre las superficies de las membranas en la segunda etapa del tratamiento.

A cada una de las líneas de agua cruda en la entrada de los filtros de cinco micras de la planta de Ol se añade un desincrustante para aumentar la solubilidad de las sales de bicarbonato de calcio y magnesio entre otras, causantes de las incrustaciones sobre la superficie de las membranas.

A la entrada de los filtros de cinco micras se inyecta además bisulfito de sodio para poder mantener el residual de cloro libre inferior a 0.1 mg/L y así evitar el daño que este le pueda ocasionar a las membranas, prolongando así la vida útil de estas.

Finalmente en esta etapa el agua pasa por la etapa final de pre-filtración, la cual se compone por los filtros de partículas de cinco micras de polipropileno, los cuales resultan ser de vital importancia para garantizar un adecuado funcionamiento de las membranas. En la figura N₀ 2.1 se observa una imagen del filtro de cinco micras.

Capítulo 2: Descripción del proceso

Con el uso de los filtros de multimedia y de los de cinco micras se disminuye la frecuencia de lavado de las membranas y por consiguiente se prolonga su vida útil. La etapa de pretratamiento del agua se refleja en la figura N_o 2.2 de los anexos.

Se puede afirmar que un pre-tratamiento ha sido correctamente diseñado cuando la frecuencia de lavado de las membranas está comprendida en una o dos veces por año. Si la misma se realiza en el rango de seis a tres meses el pre-tratamiento se puede catalogar como adecuado, pero si la limpieza se realiza de uno a tres meses resulta evidente la existencia de un problema en su selección y puede que resulte necesario realizar una mayor inversión de capital en esta etapa del tratamiento del agua, como se puede apreciar en la explicación que aparece en la tabla N_o 2.2 de los anexos.

- pre-tratamiento físico.

Se eliminan las impurezas y materia coloidal presente en el agua. Los equipos instalados son filtros de arena y filtros de cartuchos. En el caso de que el agua proceda de una corriente superficial sería necesaria la instalación de un sistema de coagulación o decantación.

- pre-tratamiento químico.

Evitar que las sales del agua precipiten sobre la superficie de la membrana y para ello, se dosifica continuamente un dispersante. Si la precipitación no puede ser controlada únicamente mediante la adición de un dispersante, puede adicionarse ácido para ajustar el pH o se reduce el factor de conversión de las membranas.

2.1.2 - Etapa de ósmosis inversa.

La segunda etapa del tratamiento donde el agua se pone en contacto directo con las membranas de cada una de las dos líneas que conforman la planta de OI en ENERGAS se le denomina ósmosis inversa.

Cada una de las líneas de la planta de OI se encuentra compuesta por siete tubos de 6.096 m de largo y 0.22 m de diámetro, en cuyo interior se colocan las seis membranas de poliamidas enrolladas en espiral de 1.016 m de largo y 0.20 m de diámetro.

Capítulo 2: Descripción del proceso

Kucera, (2010) plantea que este tipo de configuración de las membranas resulta ser la más usada en todo tipo de aplicaciones. Las mismas se encuentran colocadas en serie y concéntricamente en el interior de cada uno de los tubos que las contiene, su diseño está basado en una capa de poliamida enrollada junto a una estructura que permite el paso del permeado y concentrado.

Mediante el proceso de separación en las unidades de ósmosis inversa se retiran los sólidos disueltos totales (STD) y se obtiene al final un flujo de permeado que eventualmente puede ser agua potable.

Este sistema se divide en dos pasos de permeado: En la figura N₀ 2.3 se muestra el diagrama de los dos pasos de permeado que componen la planta de OI en ENERGAS.

- 1^{er} paso de permeado: Se encuentra compuesto de cuatro tubos A, B, C y D. El flujo de agua de alimentación entra a los tubos A, B que se encuentran conectados en paralelo, procesando cada tubo la mitad del flujo total del agua de entrada. El concentrado de estos dos tubos se dirige hacia el tubo C y el concentrado del tubo C se dirige hacia el tubo D. El permeado de cada uno de los cuatro tubos de este primer paso se dirige hacia el colector 1.

Al permeado del 1^{er} paso se le adiciona hidróxido de sodio con el objetivo de aumentar el valor de su pH y disminuir así la concentración de CO₂ y de esta forma garantizar una mayor calidad del permeado a la salida del 2^{do} paso, al poder ser eliminado el gas carbónico en forma de bicarbonato por las membranas. En la tabla N₀ 2.3 se muestra la relación de la solubilidad del bicarbonato con respecto al pH del agua.

- 2^{do} paso de permeado: Comienza a partir del permeado proveniente desde el colector 1, el cual se dirige hacia la succión de la bomba de alimentar del segundo paso de membranas. Este segundo paso se encuentra compuesto por tres tubos A, B, C. El flujo de permeado desde el colector 1 se dirige hacia los tubos A y B, que están conectados en paralelo. El concentrado de estos dos tubos se dirige hacia el tubo C y el concentrado del

mismo se hace recircular hacia el agua de alimentación del primer paso de permeado, disminuyendo el valor de la conductividad del agua de alimentar en la primera etapa de permeado de la planta de OI. El permeado de cada uno de los tres tubos que componen este segundo paso de permeado se dirige hacia el colector 2.

2.1.3 - Etapa de pos-tratamiento.

Con el objetivo de alcanzar una buena calidad en el agua que se corresponda con la de un agua totalmente desmineralizada, una vez culminado el proceso de separación en las dos etapas de la planta de OI, el permeado desde el colector 2 se dirige hacia los filtros de lecho mezclado. Estos filtros se usan principalmente como pulidor después de la ósmosis inversa, para eliminar las trazas de los sólidos solubles totales que aún quedan presentes en el permeado a la salida de la segunda etapa de la OI y obtener un agua totalmente desmineralizada con un valor de conductividad inferior a los $1\mu\text{S}/\text{cm}$, garantizando así las exigencias que para la calidad del agua de alimentar se establecen en el caso del tipo de calderas que se emplean en el ciclo combinado de Energas - Varadero.

El agua después de pasar por los filtros de lechos mezclados se almacena en un tanque de 330m^3 y 63m^3 respectivamente. Este sistema es capaz de producir hasta $15\text{ m}^3/\text{h}$ por cada línea, es decir hasta $30\text{ m}^3/\text{h}$ con ambas líneas en producción. En los documentos anexos, figura N₀ 2.4 se puede apreciar la etapa de tratamiento a partir de la OI hasta los tanques de almacenamiento.

2.2 - Parámetros de operación y sistemas de control de la planta de OI.

En las plantas de OI, al igual que ocurre en cualquier tipo de proceso industrial se necesita conocer, monitorear y controlar los diferentes parámetros que rigen su funcionamiento.

Los principales parámetros de operación y control del agua a la entrada del primer paso de permeado de la planta de OI de Varadero se pueden apreciar en la tabla N₀ 2.4.

Capítulo 2: Descripción del proceso

Cuando el valor de la presión del agua a la entrada del primer paso de permeado alcance los 1250 kPa la instalación se detiene de forma automática, para proteger a las membranas y evitar el deterioro prematuro de las mismas.

Los parámetros del permeado a la salida del 1^{er} paso de la planta de OI se deben corresponder con los valores que se muestran en la tabla N₀ 2.5, así como los valores del concentrado se deberán corresponder con los parámetros que se reflejan en la tabla N₀ 2.6.

La calidad del permeado a la salida del segundo paso se corresponderá con los valores que se reflejan en la tabla N₀ 2.7 y el mismo no se enviará hacia los filtros de lecho mezclado hasta tanto el valor de su conductividad no resulte ser inferior a los 5.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En la tabla N₀ 2.8 se representan los parámetros de la calidad del agua desmineralizada a la salida de los filtros de lechos mezclados, la cual se almacenará en los tanques de 330 y 63m³ hasta tanto su calidad no resulte ser la que se exige en el proceso.

Condiciones fundamentales

- Una primera condición es que el agua de alimentación de la planta esté perfectamente limpia, libre de sustancias coloidales y sólidos en suspensión.
- Una segunda condición importante es evitar que dentro de las membranas tenga lugar el crecimiento de la materia orgánica.
- Por último se debe disminuir la velocidad de las incrustaciones de los sólidos solubles presentes en el agua sobre la superficie de las membranas.

En cuanto al funcionamiento activo de la planta se destacan algunos arreglos y modificaciones realizadas de acuerdo a las distintas variaciones producidas en la etapa de la OI que en su momento fueron deficiencias que impidieron el correcto funcionamiento de las membranas, provocado por el incremento de las incrustaciones de sales no controladas, siendo este el factor determinante en el aumento de las caídas de presiones en cada tubo de la planta y en el deterioro prematuro de estas, trayendo consigo un incremento en el costo de operación por concepto de limpieza y reposición de las membranas.

Capítulo 2: Descripción del proceso

Una adecuada recuperación de la capacidad técnica de las membranas se alcanza siempre y cuando la variación del diferencial de presión no supere el 10%, en caso contrario el proceso de pérdida de la capacidad técnica de las membranas podría ser irreversible, lo que constituye un indicador de que es el momento de realizar la limpieza a la planta y poner en práctica el plan de mantenimiento que el fabricante sugiere, pero que en lo general el mismo no llega a ser el más óptimo.

Para poder implementar la regla del 10% como criterio a seguir para determinar el momento de realizar los lavados de las membranas se instalaron manómetros de presión a la salida de cada etapa del primer y segundo paso de permeado de la planta de OI.

Conclusiones del Capítulo 2

- La operación de OI de la planta de ENERGAS-Varadero proporciona un agua con la calidad necesaria para las calderas del ciclo combinado, para el cual esta destinado este producto, por lo que resulta ser un tratamiento muy eficaz para fuentes subterráneas de suministro agua de pozo para este caso.
- La etapa de pre-tratamiento es uno de los factores que aseguran la buena marcha del proceso de OI y ambas también determinan la vida útil de las membranas porque pueden acelerar la deposición de sólidos en suspensión desestabilizando los parámetros de operación.
- La limpieza de las membranas para librarlas de sólidos es muy importante para todo este proceso por lo que se debe diseñar un plan de mantenimiento con eficacia en que su costo sea lo menor posible desde el punto de vista de agentes químicos y tiempo a utilizar en su aplicación.

Capítulo 3: Parte Investigativa

Introducción:

La hipótesis de este trabajo investigativo está relacionada con la validación de un patrón que determine el contenido de sales incrustadas tanto en el banco experimental como en la operación de OI, el cual permitirá mantener diariamente un estricto monitoreo y control del ensuciamiento de las membranas lo cual redundará en buena marcha en la operación de una planta de este tipo.

El patrón de incrustación será la herramienta encargada de decidir y determinar predicativamente el momento en el cual se le debe realizar la limpieza a las membranas, como el tipo de químico a utilizar para la ejecución del mismo. Trayendo consigo un ahorro de insumos químicos, tiempo dedicado a la limpieza, con el consecuente tiempo de vida útil de las membranas.

3.1 - Materiales y métodos

Antes de comenzar el desarrollo de este capítulo fue realizado un algoritmo que responde al trabajo realizado en el banco experimental para facilitar el manejo de la materia aplicada. En la figura N₀ 3.1 se muestra su secuencia de pasos.

3.1.1 - Descripción del banco experimental

Para la realización de esta investigación se utilizó lo que se denomina banco experimental para las membranas. En la figura (Figura N₀ 3.2) se observa una imagen del mismo.

Este consta de un tubo de fiber glass de largo 1.1 metro y 0.22 metros de diámetro en cuyo interior se coloca una membrana de estudio igual a la que se utiliza en el proceso.

El mismo está instalado a un tanque para el almacenamiento del agua concentrada que se hará pasar por el interior de la membrana, esta solución se encuentra homogenizada para evitar que las sales presentes en ella se depositen en el fondo.

Están presentes para un adecuado control experimental dos manómetros de presión para controlar la presión de entrada y de salida del banco respectivamente, también para controlar el flujo alimentado y el flujo de permeado existen dos flujómetros instalados de forma adicional.

Para permitir el paso del agua por el interior de la membrana se hace uso de una bomba para mantener constante el flujo de entrada.

En el banco de pruebas se analizan las membranas para conocer su grado de ensuciamiento, partiendo desde una nueva hasta una totalmente sucia.

Cuando se analizan las membranas nuevas en el banco experimental se aprecia que el valor de la presión a la entrada de este se encuentra entre 44-46 psi, lo cual es propio de una membrana que se encuentre limpia.

Para el caso de las plantas que utilizan aguas de pozo para su tratamiento las cuales se caracterizan por tener una salinidad y dureza elevada, el ensuciamiento de las membranas tiene lugar fundamentalmente por las incrustaciones de sales sobre su superficie.

Por tal motivo las últimas membranas instaladas en cada etapa de permeado de una planta de OI resultan ser las que presenten el mayor número de incrustaciones.

Colina, (2008) plantea que no se debe esperar que sobre la superficie de las membranas tengan deposiciones por encima del 15%, pues a partir de estos valores resulta prácticamente imposible la recuperación de la capacidad técnica de las membranas.

El ensuciamiento de las membranas resulta ser un fenómeno inevitable con el paso del tiempo, aumentando de esta forma la presión a la entrada de la planta de OI y disminuyendo los caudales de flujo.

3.1.2 - Membrana a utilizar para la experimentación

A este banco experimental se le agrega la membrana a la cual se le realizan las pruebas pertinentes. En la tabla N_o 3.1 se muestran sus características y propiedades.

Se debe tener en cuenta que la membrana de estudio presenta las mismas características a las empleadas en el proceso de producción, en la mayoría de las operaciones de OI se utilizan membranas semipermeable y arrollada en espiral. En la figura N_o 3.3 se muestra una membrana virgen con las características anteriormente mencionadas.

El estudio con una membrana en el banco experimental me da una medida de lo que puede ocurrir en cualquier tubo de la planta, una vez aplicada las condiciones de trabajo que presenta dicho tubo, para este caso el estudio viene dado para las condiciones de operación del tubo D de la planta, por ser este el que presenta mayores problemas de incrustaciones de sales. Este banco es una pequeña escala donde simula lo ocurrido en dicho tubo.

3.1.3 - Patrón de incrustaciones

Conjuntamente con el banco experimental y la membrana viene agregado el patrón de incrustaciones, siendo este el dispositivo que permite determinar el por ciento de incrustación de sales en las membranas.

En la figura N^o 3.4 se representa una imagen de este patrón de incrustaciones consistente en un pequeño tubo plástico transparente de 0.15 m de largo y 0.04 m de diámetro, en cuyo interior se encuentra una placa plástica de 0.13 m x 0.03 m x 0.01 m, sobre la cual se depositan sales del lugar donde se coloque.

El estudio de las deposiciones que tienen lugar sobre la superficie del patrón de incrustaciones se realiza tomando como base la caída de presión y el uso de métodos y ensayos no destructivos a la membrana

Mediante el uso del patrón de incrustaciones se recibe la información referente a la cantidad de incrustaciones de sales que tienen lugar sobre la superficie de las membranas y que hasta ahora solo es posible a través de la realización de la autopsia de la membrana, lo que provocaría que la misma se desechara.

Este tipo de aditamento se instala en serie a la salida del concentrado del banco de experimento que es el lugar donde existe la mayor concentración de sales.

3.1.4 - Funcionamiento del patrón de incrustaciones.

El funcionamiento de este patrón viene dado por el pesaje de la placa que se encuentra en su interior antes de ser instalado en el banco experimental y una vez de observar cambios en la presión de entrada se vuelve a pesar la placa y se toma el valor de concentración correspondiente a esa presión.

Para la obtención de los valores de concentración se aplicó el método del cristal óptico. Es un método importante en esta investigación ya que a partir de él se puede valorar la efectividad de la dosificación y buscar el valor adecuado de la dosis y a partir de su implementación se pudo controlar la efectividad del desincrustante así como la acumulación de las incrustaciones de sales sobre la superficie de las membranas.

En la ejecución del método cristal óptico se utilizó portaobjetos de cristal con una medida de 75X26X2mm, los cuales se sumergieron en beakers de 250 mL, en los que se tomaron los 200 mL de muestra.

La muestra de concentrado se hace hervir durante 2 minutos, pasado ese tiempo se extrae el portaobjetos para el análisis de la cantidad de deposiciones que sobre su superficie tuvieron lugar.

La cantidad de incrustaciones de las sales (en este caso) se determinó a través de la siguiente ecuación:

$$D = \left[100 - \left(\frac{m_2 - m_1}{m_1} \right) \right] * 100 \quad (3.1)$$

Donde:

D - incrustaciones de sales %

m_2 – masa final del portaobjeto (g)

m_1 – masa inicial del portaobjeto (g)

Se emplea el método cristal óptico para realizar los análisis de las incrustaciones que tienen lugar sobre la superficie del patrón, herramienta base utilizada durante la realización de los análisis para valorar la efectividad de las técnicas del magnetismo, en la disminución de la velocidad de las incrustaciones de las sales presentes en el agua.

Además de la aplicación que tiene el patrón de incrustación en este trabajo en cuanto a la determinación de sales incrustadas en la superficie de la membrana, su uso se hace más amplio si se trata de cualquier proceso en el que interviene la ósmosis inversa.

Puede ser utilizado para la determinación de la deposición de materia orgánica que es arrastrada por el agua a utilizar según sus características.

Su uso se hace extenso aún más si se trata de ser utilizado para saber cuando las membranas se encuentran totalmente sucias y el tipo de limpieza que debe aplicar según el grado de incrustaciones que en el se depositen. Ningún fabricante hasta el momento define el tipo de limpieza que se realiza cuando estas se encuentran en su punto crítico de ensuciamiento, realizando en un

período de tiempo limpieza ácida seguido de un enjuague básico haciendo muy perjudicial el estado técnico de las membranas y ocasionando grandes pérdidas de su eficiencia.

3.2 - Descripción de la experimentación

Antes del comienzo del diseño experimental se realiza lo que es llamado tiempo de adaptación de la membrana, esta consiste en una prueba inicial para la correcta toma de valores de concentración depositadas en el patrón.

A través de esta se le hace pasar una solución acuosa y se requiere un cierto tiempo de adaptación de la misma a las nuevas condiciones de operación (temperatura, presión, y conversión), durante ese período tanto la conductividad como el caudal de permeado no son constantes.

Para poder establecer el tiempo necesario que la membrana requiere para adaptarse a las nuevas condiciones, se seleccionó una membrana nueva ó virgen y se le sometió a una prueba de flujo bajo las condiciones de salinidad presión y temperatura indicadas por el fabricante.

Para mantener un estricto control de este tiempo de adaptación se deben realizar mediciones prolongadas tanto al flujo de permeado como al de concentrado hasta asegurar que el mismo se mantenga constante en un determinado período de tiempo, indicando que a partir de ahí la membrana nueva se encuentra operando con una buena estabilidad.

Para la comprobación y obtención de la estabilidad de la membrana se muestra la figura N_o 3.5 donde se observa que a partir de los cinco días de operación el caudal de permeado se encuentra prácticamente estabilizado. Esto indica que a partir de este tiempo de estabilización fueron tomados los valores de concentración pertenecientes al patrón de incrustación para los cálculos que posteriormente fueron realizados.

Esta experimentación consta del monitoreo y control de las incrustaciones en un largo período de tiempo; por lo que no se tubo en cuenta el planteamiento del 15 % de las deposiciones de sales, ya que no es objetivo la limpieza de membranas sino su comportamiento respecto a las incrustaciones.

Para el estudio experimental fueron seleccionadas las variables que incurren en la parte principal del proceso, las mismas son, presión, concentración y tiempo. La selección de los valores de presiones viene dado por mediciones realizadas a través de los manómetros a la entrada y salida del banco.

La aplicación del método del cristal óptico es fundamental para conocer la variación de concentraciones existentes en el patrón de incrustaciones; la toma de muestra se refleja en función de un período de tiempo seleccionado.

En este estudio la variable presión se hace muy dependiente de la concentración, en función del tiempo. Esta dado por las características del proceso en el cual se está trabajando, describiendo la influencia que tiene la segunda sobre la primera.

Resulta de vital importancia la selección del período de tiempo por el cual se realizará el trabajo experimental, para este caso se tomó una proporción de trescientos días al año con un total de sesenta lecturas para ambas variables. Las lecturas fueron tomadas cinco veces por semana, obteniendo un promedio por cada una de ellas, las mismas fueron extraídas del patrón de incrustaciones.

3.2.1 - Condición para establecer el criterio de similitud

Para poder establecer un criterio de similitud se debe de tener en cuenta de que el banco experimental ya estaba diseñado, lo cual no se corresponden a realizar cálculos de escalado. Por tanto la similitud viene dada por el método de principio de semejanza, este contiene dos criterios:

- El criterio de semejanza geométrica.
- El criterio de igualdad en el número de Reynolds.

A partir de esto comenzamos a realizar los cálculos pertinentes a lo que respecta la membrana sujeta al banco experimental y al tubo D como tal, obteniendo las nuevas condiciones de similitud para colocar el patrón de incrustaciones en el tubo D.

El agua de alimentación que se aplica al banco es igual que la presente en el tubo D de la planta de OI, por tanto a partir de esta entrada comenzamos a

realizar el monitoreo y control de las incrustaciones de sales. Los parámetros se muestran en la tabla N₀ 3.2.

Cálculo de la velocidad lineal del solvente en la membrana.

El cálculo de esta velocidad resulta muy útil para realizar la similitud entre los dos sistemas ya mencionados puesto que su valor numérico será utilizado en la obtención del régimen de flujo mediante el cálculo del número de Reynolds. (Rosabal, 1988; pág. 37-46)

$$v = \frac{Q}{A_{efectiva}} \quad (3.2)$$

Donde

Q: flujo de entrada (m³/h)

A_{efectiva}: área efectiva (m³/m²)

El área efectiva de una membrana no se debe de encontrar obstruida por el espaciado entre los poros y su valor viene dado por la expresión (3.3).

$$A = B * d_{sp} * \varepsilon \quad (3.3)$$

Donde

B : ancho del canal (m)

d_{sp} : espesor del espaciado entre los poros (mm)

ε : porosidad

Los parámetros anteriores son propios para cada tipo de membrana a utilizar.

Es importante el cálculo del área efectiva para la obtención de la velocidad lineal en el banco experimental y en el tubo D de la planta, se debe tener en cuenta que el área efectiva en el tubo D es mayor, esto se corresponde con las seis membranas que aumentan el área de la superficie de trabajo, es decir que el área activa de la membrana sujeta al banco experimental es seis veces menor que la que presenta el tubo D.

Cálculo del número de Reynolds en la superficie de la membrana para el banco experimental y para el tubo D.

Se determina el número de Reynolds para conocer el régimen de flujo existente en la superficie de la membrana y en el poro.

Para el cálculo del número de Reynolds se utiliza la ecuación (3.4), (Rosabal, 1988; pág. 25-37).

$$Re = \frac{\rho * d_{ext} * v}{\mu} \quad (3.4)$$

Donde:

ρ : densidad del agua (kg/m^3)

d_{ext} : diámetro exterior (m)

v : velocidad lineal (m/s)

μ : viscosidad ($\text{kg/m} \cdot \text{s}$)

Criterios establecidos para la comparación del régimen de flujo para las membranas.

- ✓ Si el $Re \leq 2000$ el régimen es laminar, el movimiento es de forma de capa bien delimitada.
- ✓ Si está $2000 \leq Re \leq 4000$ el régimen es de transición, está la zona crítica, el flujo es impredecible.
- ✓ Si el $Re > 4000$ el régimen es turbulento.

Cálculo del número de Reynolds en el interior de los poros para el banco experimental y para el tubo D.

Se quiere comprobar también el régimen de flujo que presenta el paso del solvente por el interior de los poros para esto se utiliza la misma expresión (3.4) ya representada. Su diferencia está en los diámetros seleccionados, ya que para este caso se utiliza el diámetro hidráulico de los poros de la membrana.

En las membranas microporosas reales los poros no son rectos y cilíndricos, por tanto se utiliza el procedimiento, propuesto por Carman-Kozeny y por Ergun, consiste en sustituir el diámetro del poro por el diámetro hidráulico definido por:

$$d_H = 4 \left[\frac{\text{Volumen disponible para el fluido}}{\text{Area total de los poros}} \right] = 4 \left[\frac{\left[\frac{\text{Volumen total de los poros}}{\text{Volumen de la membrana}} \right]}{\left[\frac{\text{Area total de los poros}}{\text{Volumen de la membrana}} \right]} \right]$$
$$d_H = \frac{4 \varepsilon}{a} \quad (3.5)$$

Donde el volumen de la membrana incluye el volumen de los poros. Si se define el área efectiva, A_{efectiva} , como el área superficial del poro por unidad de volumen de membrana:

$$a_v = \frac{A_{\text{efectiva}}}{1 - \varepsilon} \quad (3.6)$$

Donde:

d_h : diámetro hidráulico en los poros de la membrana (mm).

a_v : área superficial del poro por unidad de volumen (m^3/m^2).

Cálculo del coeficiente de retención (R^o)

El cálculo del coeficiente de retención tiene una gran aplicación en la OI, este se utiliza para medir la capacidad de separación de una membrana en mezclas líquidas. El valor de R^o varía entre 0 (membrana que permite el paso a su través tanto a las moléculas de soluto como a las de disolvente, esta será incapaz de separar la mezcla en cuestión) y 1 (membrana semipermeable "ideal", es decir retiene completamente al soluto).

A continuación se realizan los cálculos pertenecientes al mismo para comprobar el funcionamiento de la membrana que se estudia.

Coeficiente de retención

$$R^o = \frac{c_b - c_p}{c_b} = 1 - \frac{c_p}{c_b} \quad (3.7)$$

Donde:

c_p : concentración del permeado

C_b : concentración del rechazo ó concentrado

Una vez calculado el valor de este coeficiente tanto para el banco como para el tubo D se interpreta que no tiene importancia la cantidad de membranas con las cuales se está trabajando, sino de la diferencia que existe entre la concentración que tiene el flujo de permeado y la que sale en el rechazo.

Para este caso de estudio el coeficiente de retención describe un comportamiento razonable ya que su valor está lo más aproximado a uno, siendo el mismo de 0,98; teniendo en cuenta la colocación de membranas vírgenes o nuevas.

Cálculo de la polarización por concentración (M)

$$M = \frac{C_w}{C_b} \quad (3.8)$$

Donde:

c_w : *concentración* de soluto en la interface alimento-membrana (pared)

c_b : *concentración* de soluto en flujo global (lado del alimento)

Si se cumple que $c_w > c_b$, la presión osmótica ($\Delta\pi$) aumenta y el flujo de disolvente disminuye a medida que la influencia de la polarización es mayor. La relación que existe entre este coeficiente y el módulo de polarización viene dada por la siguiente expresión.

Admitiendo que la membrana es totalmente semipermeable porque se toma en cuenta que es nueva y $R^0 \approx 1$, el balance en estado estacionario y en el lado de la corriente de alimentación es:

$$\left[\begin{array}{l} \text{Flujo convectivo} \\ \text{de soluto} \\ \text{hacia la membrana} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Flujo difusivo} \\ \text{de soluto} \\ \text{desde la membrana} \end{array} \right] = 0$$

Ecuación diferencial que se resuelve para las condiciones límite:

$$y = 0 \text{ (pared membrana)} \quad \rightarrow \quad c = C_w$$

$$y = \delta \text{ (espesor capa de la polarización)} \quad \rightarrow \quad c = C_b$$

y suponiendo que la difusividad es constante, resulta:

$$c_w = c_b \exp \left[\frac{J_d \delta}{D} \right] \quad (3.9)$$

y recordando la definición del módulo de polarización, M:

$$M = \frac{c_w}{c_b} = \exp \left[\frac{J_d \delta}{D} \right] \quad (3.10)$$

$$J_d = \frac{P_d}{l_M} \left[\Delta P - (\pi(c_w) - \pi(c_p)) \right] \quad (3.11)$$

Donde:

J_d : densidad de flujo.

l_M : espesor de la capa activa de la membrana.

P_d : presión del disolvente.

Al cociente entre la difusividad y el espesor de la capa límite (de polarización) se le denomina coeficiente de transferencia de materia: $k = D / \delta$, por lo que:

$$M = \exp \left[\frac{J_d}{k} \right] \quad (3.12)$$

Se trata de una ecuación simplificada difícil de manejar si no se dispone de valores fiables de δ o de k , pero de la que se pueden sacar la siguiente conclusión:

La polarización por concentración aumenta:

1. Cuando el flujo de disolvente aumenta.
2. Cuando el espesor de la capa de polarización aumenta.
3. Cuando la difusividad disminuye.

3.2.2 - Estudio del patrón de incrustaciones en el banco experimental

El patrón de incrustaciones tiene una amplia gama de aplicaciones no solo por ser la herramienta principal en la determinación de sales depositadas en la superficie de una membrana si no que también participa en la selección del tipo de lavados a aplicar según el tipo de deposiciones que en el se localiza, su estudio demuestra la correcta eficiencia y exactitud del tiempo de explotación.

Lo que demuestra el buen funcionamiento de este patrón es la toma de valores de concentración en función del tiempo donde una vez llevado su placa interior al pesaje se interpreta que paulatinamente entre una muestra y otra la masa en el portaobjeto (placa) se incrementa. En la tabla N₀ 3.3 se plasman los datos seleccionados de por ciento de concentración y presión acompañados del tiempo en que se realizó la experimentación.

Estudios realizados en años anteriores demuestran que la posición a la cual se coloca el patrón de incrustaciones en el banco experimental tiene una gran influencia en cuanto al tipo de deposiciones que en el se reportan y a la decisión del momento en que se deben limpiar las membranas.

Una colocación de este patrón a la entrada del sistema a evaluar no controlaría el contenido de sales presentes en el flujo de concentrado, si no que su información estaría dirigida a la cantidad de microorganismos y materia orgánica que arrastra el agua de alimentación con un por ciento de sales poco significativo si se tratase de aplicar limpiezas a las membranas.

Con la información recibida del patrón de incrustaciones sobre el grado de ensuciamiento se puede determinar también cuál membrana presenta las mejores y las peores condiciones técnicas que le permita ser colocada en la posición que le corresponda asegurando así su buen funcionamiento.

3.3 - Aplicación de los métodos estadísticos para los datos experimentales

En general el análisis estadístico se aplica a aquellas situaciones, frecuentes de las investigaciones científicas y técnicas a nivel de laboratorio, de planta piloto o en los procesos de producción. Para este caso de estudio la última situación es la que se va a aplicar ya que está de acorde con un proceso industrial como lo es la obtención de agua desmineralizada a partir de agua de pozo profundo.

Para demostrar la correcta selección de los datos experimentales fue necesario el uso de métodos estadísticos que permitiesen relacionar el comportamiento de la variación en por ciento de la presión, la concentración en función del tiempo, los cuales vienen dado a partir del comportamiento del patrón de incrustaciones.

3.3.1 - Caracterización estadística de las variables

La caracterización estadística de ambas variables es el primer resultado que justifica si se debe o no continuar trabajando con los datos experimentales seleccionados de presión y concentración, para ello se debe tener en cuenta la normalidad de las variables. Para la aplicación de estos métodos se trabajó con los datos de la población, esto significa que no se hizo uso de la selección del tamaño de la muestra representativa.

En la tabla N₀ 3.4 se representan los valores que justifican que tanto la variable presión como concentración sigan una distribución normal y esto se comprueba con el coeficiente de skewness y el coeficiente de curtosis.

Otro parámetro a tener en cuenta es el coeficiente de variación, pero para este caso su prueba viene enmarcada en la dispersión que presentan los datos experimentales, ya que según su valor obtenido se justifica como va incrementando el ensuciamiento de la membrana.

3.3.2 - Determinación de la regresión simple para la presión, la concentración y el tiempo.

Los métodos de regresión ayudan a determinar las relaciones funcionales existentes entre las variables del proceso a partir de grandes cantidades de datos.

En cualquier sistema donde una variable cambie es de interés investigar el efecto que otras ejercen sobre la misma, para este caso se desea investigar el cambio de las presiones a la entrada de la planta de OI mediante el efecto que ejercen las concentraciones de sales sobre las membranas que intervienen en el proceso. A menudo estas variaciones no tienen significado físico pero son de gran utilidad para predecir el valor de dicha variable.

Para la obtención de los modelos matemáticos fue aplicada la regresión simple, por ser esta la base fundamental en el trabajo con datos experimentales y por la existencia de una variable dependiente y una independiente, en caso de que existiera más de una variable independiente sujeta a una o más dependientes se seleccionaría la regresión múltiple.

Este método se realiza con el objetivo de obtener un modelo matemático que más se ajuste a los valores de presión en función de la concentración, para su correcta selección se debe tener presente el coeficiente de correlación para saber si ambas están interrelacionadas totalmente.

Análisis del comportamiento de presión vs concentración.

Al ser extraídos los datos de concentración y de presión se realiza el análisis de regresión para dichas variables, determinando que su comportamiento es lineal, justificando el tipo de modelo al que corresponde este análisis. En la figura N^o 3.6 se observa el comportamiento de dicho modelo.

Conjuntamente con esta figura viene acompañada la tabla N^o 3.5 la cual refleja los resultados de los tipos de modelos que pueden estar presentes, estos están colocados con el orden que le corresponde según su ajuste seguido de sus coeficientes de correlación.

Fue seleccionada también de este análisis la ecuación del modelo de ajuste, la cual se le dará validez una vez puesto en marcha el patrón de incrustaciones en el tubo D de la planta, la ecuación es la siguiente.

Ecuación del modelo de ajuste.

$$\textit{presión} (\%) = 1,32 + 0,63 * \textit{concentración} (\%) \quad (3.13)$$

Análisis del comportamiento de la presión en función del tiempo.

Para conocer más de cerca la variable presión fue aplicada también una regresión simple para observar su comportamiento en función del tiempo y determinar el tipo de pendiente que alcanza según su ecuación ajustada. En la figura N₀ 3.7 se tiene como resultado de forma clara como asciende la pendiente durante el transcurso del tiempo, dando una medida de la relación que tiene esta con el tiempo.

Igualmente en la tabla N₀ 3.6 se representan los modelos que más se ajustan a este análisis con su correlación y su raíz cuadrada, para este caso al realizar la comparación de ellos resultó ser (raíz cuadrada – y) el que más se ajusta a estos datos experimentales. La ecuación de este modelo se muestra a continuación.

Ecuación del modelo de ajuste.

$$presión(\%) = (1,23 + 0,013 * tiempo)^2 \quad (3.14)$$

Análisis del comportamiento de la concentración en función del tiempo.

Conjuntamente con la presión se analizó las concentraciones de sales depositadas en el patrón y fue comprobado su comportamiento en función del tiempo, que de esta manera se ve la trayectoria creciente que muestra dicha variable estudiada. En la figura N₀ 3.8 se define detalladamente el resultado de su procedimiento.

En cuanto a los modelos matemáticos que esta variable responde queda definido que el más ajustado a sus condiciones de trabajo es el de (raíz cuadrada-y) resultando ser igual al modelo obtenido por la presión en función del tiempo, dando una muestra de que ambas variables se ven afectadas por un incremento en el tiempo. En la tabla N₀ 3.7 se observa los resultados del orden de ajuste de los modelos obtenidos para la misma. Unidos a estos modelos se encuentra la ecuación del más ajustado que a continuación se muestra.

Ecuación del modelo de ajuste.

$$concentración(\%) = (1,4115 + 0,0089 * tiempo)^2 \quad (3.15)$$

Es importante destacar para la conclusión de este epígrafe que el método de regresión simple tiene una amplia aplicación en diferentes sectores de la producción tanto a nivel de laboratorio como industrial.

Sus resultados se acercan a la realidad sobre el comportamiento del funcionamiento de una membrana y del uso del patrón de incrustaciones.

Con la culminación y solución de este epígrafe se puede comprobar si los modelos obtenidos para cada variable que fue evaluada son válidos, de acuerdo al comportamiento que adquieren las variables que se trabajan en esta experimentación, sustituyendo sus valores en cada ecuación obtenida.

3.3.3 - Análisis del coeficiente de variación para presión y concentración

Para la realización del análisis del coeficiente de variación se toman como variables principales la presión y la concentración en función del tiempo, ya que no se encuentran sujetas a estas la variable de temperatura, porque la misma se mantiene constante a lo largo de la experimentación.

Según los análisis estadísticos tabulados en la literatura son de suma importancia tener en cuenta el coeficiente de variación para ambas variables seleccionadas y para ello existe un criterio que indica la dispersión que presentan las mismas. (Guerra, 1976)

- Cuando el coeficiente de variación < 4 no existe casi dispersión, la media es muy representativa de los datos.
- Si se encuentra entre 4 y 8 tiene poca dispersión.
- Si se encuentra entre 8 y 12 la dispersión es aceptable.
- Si el coeficiente de variación > 12 significa que hay una gran dispersión.

Análisis para la variable presión:

En la tabla N_o 3.4 se observa el coeficiente de variación para las presiones, se puede justificar que el valor numérico del mismo es mayor que el tabulado por la literatura, por lo que se dice que hay una gran dispersión, y esto vinculado al proceso se justifica como el incremento de las incrustaciones de sales sobre la

superficie de la membrana durante un largo período de trabajo de la planta provocando un aumento en por ciento de las presiones a la entrada del banco el cual se está analizando.

Análisis para la variable concentración:

Al igual que para la presión la variable concentración también refleja su valor de coeficiente de variación en la tabla N_o 3.4 ya mencionada anteriormente, donde se observa que el mismo es mayor que el reportado por la literatura (Eilon, 1969), esto viene dado por el incremento de sales en la membrana que se van depositando sobre su superficie mediante el transcurso del tiempo de trabajo del banco donde ocurre la experimentación.

Seguidamente se plasman los valores de los coeficientes de variación que demuestran la elevada dispersión que presentan ambas variables del proceso.

Variables	Coeficiente de variación
------------------	---------------------------------

Presión	52.97%
---------	--------

concentración	62.85%
---------------	--------

3.3.4 - Análisis de los resultados estadísticos del banco experimental

La aplicación de la estadística como herramienta de cálculo fue un paso importante en el análisis de estos resultados, en la obtención de soluciones más concretas referente al objetivo principal de este trabajo, apoyado en el Software Statgraphics.

Para la aplicación de los métodos estadísticos se hizo uso de un orden de cálculo el cual comenzó con la caracterización estadística de las variables presión y concentración en función del tiempo.

Al realizar esta prueba se pudo comprobar que ambas variables siguen una distribución normal ya que el coeficiente de skewness y kurtosis están entre -2 y 2 siendo estos de:

Coeficientes	Presión	Concentración
---------------------	----------------	----------------------

skewness	1.38	1.26
Kurtosis	-1.12	-1.41

Análisis de los resultados de la regresión simple

A continuación se describen los resultados de la regresión simple para los datos experimentales de presiones en función de las concentraciones y ambas en función del tiempo tomados del banco experimental.

Para demostrar lo expuesto anteriormente por la bibliografía del primer capítulo en cuanto a la proporcionalidad directa entre la presión y la concentración se observa que el modelo que más se ajusta es el lineal, siendo esto un reflejo de lo que ocurre en el banco experimental donde a medida que aumenten las incrustaciones de sales va aumentando las presiones a la entrada del sistema.

Otro análisis fue realizado al coeficiente de correlación para demostrar que existe una buena correlación entre las variables de presión y concentración basándonos en la graficación de las mismas, mostrando una tendencia clara y definida se afirma que la correlación es positiva o creciente.

Mediante los resultados de la regresión simple para la presión se justifica que un aumento de este viene propiciado por una caída del flujo de entrada que va disminuyendo, esto ocurre por el incremento de concentraciones en la capa límite de la membrana ocasionando taponamiento en sus poros y reduciendo la velocidad lineal del flujo de permeado.

En cuanto a los resultados de la concentración se concluye que esta variable es la causante de los problemas de separación en la membrana y de la variación de los parámetros normalizados, los mismos pueden variar sus valores ya estandarizados.

Esta regresión muestra sus resultados también para las variables presión y concentración en función del tiempo, donde se vio mediante los gráficos expuestos su comportamiento durante el transcurso del tiempo de explotación de las membranas. Por lo que se concluye que en cualquier intervalo de tiempo

que se analice una membrana el comportamiento de la presión y de la concentración serán crecientes y cada vez mayor.

3.4 - Aplicación del patrón de incrustaciones en el tubo D

En lo referido al patrón de incrustaciones sobre su aplicación y validez se hace uso de un nuevo algoritmo de trabajo, pero para este caso su organización viene sustentada en el tubo D de la planta de OI. En la figura N₀ 3.9 se muestra la secuencia de pasos a seguir.

3.4.1 - Estudio de la toma de muestra.

Este estudio es de forma sencilla y esta dado por la colocación de otro patrón con las mismas características que el anterior a la salida del tubo D de la planta de OI para ir tomando las muestras en el mismo período de tiempo en el cual se analiza el banco experimental.

Teniendo en cuenta que todas las membranas del tubo D son nuevas y antes de realizar la toma de muestra en dicho tubo, se ejecuta también su estabilidad, la cual dio como resultado que a partir del octavo día de trabajo el flujo de permeado a la salida del tubo comienza a estabilizarse.

En comparación con el banco experimental este demora un poco más, debido a que el sistema debe estabilizar seis membranas al mismo tiempo incrementando la variación de permeado en mayor proporción.

Para una información más precisa se representa la figura N₀ 3.10 la cual demuestra el comportamiento de estabilidad de las membranas.

Una vez planteada y confirmada la estabilidad del sistema se prosigue a la selección de muestras de presiones y concentraciones, estas últimas extraídas del correspondientes patrón de incrustaciones instalado en el tubo D. En la tabla N₀ 3.8 se muestran estos valores en por ciento, ambos en función del tiempo.

3.4.2 - Validación del patrón mediante la prueba de calidad del ajuste

Esta prueba constituye uno de los objetivos de la investigación, ya que al ser obtenido el modelo con los datos de presiones y de concentraciones se procede a su validación en la planta de OI.

Para el inicio de esta prueba se debe tener presente los parámetros estadísticos de ambas variables. Que los resultados obtenidos se encuentran dentro del rango permisible tanto para la concentración como para la presión y así pasar a la aplicación y validación de la ecuación del modelo matemático ya reajustada en el análisis de regresión que anteriormente se realizó para el banco experimental.

El procedimiento a seguir consiste en la aplicación del modelo matemático obtenido en el banco experimental, pero con los nuevos valores de concentración obtenidos del patrón que se encuentra colocado en el tubo D.

Los valores de las presiones resultantes del cálculo serán comparados con los del tubo D, demostrando que la variación que sufren las mismas representan valores similares a los seleccionados en dicho tubo.

Para probar la consistencia de los datos experimentales con los reales fue realizada dicha prueba.

En esta prueba se determina la Fisher calculada y se compara con la tabulada obtenida de la literatura, siendo esta un argumento importante para comprobar si el modelo seleccionado es válido o no.

Determinación de la Fisher calculada ($F_{\text{calculada}}$)

La siguiente ecuación representará a los valores obtenidos del patrón colocado en el banco experimental. (Guerra, 1976; pág. 225-227)

$$F_{\text{calculada}} = \frac{CM_{\text{error}}}{CM_{\text{exp}}} \quad (3.16)$$

Donde:

CM_{error} : Cuadrado medio del error

CM_{exp} : Cuadrado medio experimental

$$CM_{\text{error}} = \frac{\sum e^2}{n - p} \quad (3.17)$$

Donde:

n: número total de datos

p: parámetros estimados en el modelo

e: error

$$CM_{exp} = \frac{S^2_{exp}}{n-1} \quad (3.18)$$

Donde:

S^2_{exp} : Varianza de los datos de la presión experimental.

Selección de Fisher tabulada ($F_{Tabulada}$)

Para la correcta selección de la $F_{Tabulada}$ según la bibliografía (Eilon, 1969), en la (tabla 13, pág. 102-104) se trabaja con un 95 % de confiabilidad y con los valores de los grados de libertad del error y los grados de libertad experimentales se interceptan y se toma el valor correspondiente.

Para la comprobación de esta prueba se comparan los valores tabulados y calculados, basado en la condición que se cumpla se analizan los resultados:

1. $F_{calculada} > F_{tabulada}$ el modelo no es válido
2. $F_{calculada} < F_{tabulada}$ es válido el modelo.

$$F_{calculada} < F_{tabulada}$$

$$F_{calculada} \quad 0.138$$

$$F_{tabulada} \quad 1.54$$

3.5 - Análisis de resultados de la aplicación del patrón en el banco experimental y en el tubo D.

Fueron obtenidos los resultados referentes a la aplicación del patrón en el banco experimental comprobando, que cuando las deposiciones en general sobre la superficie de una membrana superen el 14 % esta se encuentra totalmente sucia o incrustada observando un incremento en la presión a través de los manómetros colocados.

El grado de incrustación de las membranas aumenta en el sentido del flujo del agua, por tal motivo las incrustaciones de sales sobre el patrón se corresponderá con la cantidad de sales que existen a la salida de la membrana a analizar.

Mediante el intenso trabajo realizado con el patrón, se logró obtener la información necesaria sobre el incremento en por ciento de las incrustaciones de sales en un largo período de tiempo, para así favorecer a que la diferencia de concentraciones entre un por ciento y otro pueda ser calculada en el laboratorio por el método del cristal óptico.

En el banco experimental se observa de forma más específica como va disminuyendo el flujo del disolvente con el paso del tiempo, ocasionado por las incrustaciones de sales que reporta dicho patrón, siendo posible mediante este, que el proceso de recuperación de la membrana sea reversible, es decir que la misma pueda salvarse ante un exceso de sales incrustadas sobre su superficie.

Los resultados obtenidos mediante el criterio de similitud entre el banco experimental y el tubo D de la planta, demuestran que el régimen de flujo existente en el exterior de la membrana para ambos sistemas es turbulento y para los poros es laminar, esto fue comprobado con el cálculo del número de Reynolds basado en el criterio (Reza, 2005; pág. 5-6).

El Reynolds en la superficie de la membrana es mayor que 4000, siendo este de 5240 y en el interior de los poros es menor que 2000, siendo de 1120, esto se debe al pequeño diámetro que presentan los poros.

De no ser posible obtener un régimen turbulento esto traería como consecuencia un aumento de la polarización y consigo un incremento de las deposiciones sobre la superficie de la membrana.

Este régimen de flujo se hace importante para las condiciones de operación de la membrana, ya que al mantenerse turbulento favorece a que las sales se mantengan dispersas en el disolvente y así evitar que se depositen en la capa límite de la membrana.

De acuerdo a lo referente a la estabilidad del sistema se tiene en cuenta que cuando intervienen más de una membrana, el tiempo que demora en estabilizarse se incrementa debido a la contrapresión ejercida de una membrana hacia la siguiente, provocando variaciones en su flujo de permeado.

Al realizar los cálculos pertinentes a la prueba de calidad de ajuste para este caso de estudio se obtuvo como resultado que la condición dos es la que se cumple, afirmando que el modelo resultante de los datos experimentales es

válido. Como el modelo está validado se afirma que el uso del patrón de incrustación tiene una gran aplicación para la planta de OI, ya que a través del mismo se predice el comportamiento interno de las membranas que se desea estudiar y la utilización correcta del tipo de químico para su limpieza.

Además los resultados de las pruebas realizadas a una membrana permiten que se pueda seleccionar la posición adecuada en la que esta deberá ser ubicada posteriormente en el interior del tubo D para la planta de OI, demostrando su valor de eficiencia en el banco de experimentación y su correcta colocación.

3.6 - Análisis efectivo de una colocación del patrón de incrustaciones en la planta de OI.

Toda modificación que se efectúa a cualquier proceso también tiene que venir acompañada con la estimación económica que ella genera, que es en última instancia la que da vía libre sobre la ejecución de dicho cambio.

En el proceso de mantenimiento de cualquier industria o parte de ella también se vigila el aspecto económico porque en definitiva el puede incidir positiva o negativamente en los costos de producción.

Se pone en práctica un sistema de simulación de las sales que interactúan a través de las membranas y se logra avalar una vez más dicha proposición poniendo al descubierto los costos en que se incurren en la planta de OI.

Se efectúan los cálculos económicos solo a lo que respecta al consumo de agentes químicos, agua para el lavado y sustitución de membranas, además se compara estos mismos elementos con el sistema que estaba expuesto anteriormente en la planta de OI de ENERGAS-Varadero.

En la tabla N_o 3.9 se observa la tendencia hacia la disminución de los mismos, debido a que la secuencia establecida es sin la ubicación del patrón y posteriormente se coloca el mismo.

Luego de realizar el estudio bien detallado del patrón de incrustaciones y haber comprobado en el banco experimental que su aplicación tiene buenos resultados, se debe resaltar la efectividad que presenta su colocación en la planta de OI no solo en el tubo D sino también al sistema de tuberías en general. Su implementación favorece al conocimiento del contenido de sales

Capítulo: 3 Parte Investigativa

depositadas en la membrana y evita que estas puedan sufrir daños mayores. También a través de el se conoce el momento en que deben ser limpiadas las membranas y el tipo de químico a emplear. Puede traer una reducción de los costos de adquisición de los productos químicos, ya que al ser controladas las incrustaciones y deposiciones, estos se utilizarían con menor frecuencia y en menor proporción, lo cual es una de las ventajas para el sistema de operación y para los costos de mantenimiento en sentido general.

Conclusiones del Capítulo 3

- Los métodos estadísticos brindan la posibilidad de relacionar parámetros que incurren en el funcionamiento del proceso.
- En cuanto al beneficio que se le brinda a la membrana es de mucha importancia siendo esta el elemento crítico que asegura y determina el funcionamiento de la instalación. Además influye sobre los parámetros de diseño para conseguir el agua producto.
- El método del cristal óptico es de suma importancia gracias a la ventaja de su fácil aplicación, considerando que se deben de realizar pocos errores en su ejecución para obtener una medición efectiva.

Conclusiones

- El patrón de incrustaciones es una herramienta que permite determinar el por ciento de sales incrustadas en una membrana de OI por lo cual se valida la hipótesis de este trabajo.
- Fueron validados y aplicados en el tubo D de la planta los resultados obtenidos por el patrón de incrustaciones del banco experimental mediante la prueba de calidad del ajuste.
- Se comprobó que el funcionamiento del banco experimental está relacionado con el tubo D de la planta basado en el método de principio de semejanza.
- Con el uso del patrón de incrustaciones se conoce no solo el contenido de sales existentes en la membrana sino también la presencia de microorganismos y materia orgánica provenientes del pre-tratamiento.
- Mediante el patrón de incrustaciones se determina el momento en que se debe realizar la limpieza a la membrana según el tipo de deposiciones que en él se reporta.

Recomendaciones.

- ❖ Realizar el método del cristal óptico con un error en la manipulación lo más pequeño posible para llegar a resultados más exactos.
- ❖ Extender la implementación del patrón de incrustaciones en los restantes tubo de la planta de OI.
- ❖ Aplicar el funcionamiento del patrón de incrustaciones en otras plantas que dependen de este proceso de obtención de agua, tanto desmineralizada como de cualquier otro tipo.

Referencias Bibliográficas

1. ACAIWASH, W. 2007. Ingeniería y sistemas de filtración por membranas en operaciones de ósmosis inversa. Ctra. Sta Creu de Calafell, BARCELONA (ESPAÑA). Desde 1980 - 2007 aportando soluciones [citado nov. 10, 2007], [online]. Disponible en Internet: <<http://www.membranas.com/MMS-Ibérica.htm>>.
2. BAKER, Richard W. 2004. Membrane Technology and applications. Second Edition. West Sussex, England.
3. BÓDALO, Antonio S.; GÓMEZ, Carrasco J.L.; GÓMEZ, Gómez Elisa; BASTIDA, Rodríguez Josefa; MÁXIMO, Martín M.F.; HIDALGO, Montesinos Asunción M.; MONTIEL, Morte Claudia; RUIZ, Toral A.; GÓMEZ, Gómez Maria; MURCIA, Almagro M. Dolores; LARA, Guillén Andrés. 2007. Principales líneas de trabajo en procesos con membranas. Del grupo "análisis y simulación de procesos químicos, bioquímicos y de membrana". Departamento de Ingeniería química de la universidad de Murcia. Facultad de Química. Campus de Espinardo. 30071 Murcia.
4. BOWEN, W.R.; CASSEY, B.; JONES, P. y OATLEY, D.L. 2004. "Fouling control during the operation of membrane filtration units". En: IDF Special Issue 9504. "Fouling and cleaning in pressure driven membrane processes" pp.93-115. Brussels (Belgium): International Dairy Federation J. Membr. Sci.
5. CALDER, Nigel. 2003. Horizon Information Portal 2.1. Powered by Dynix. 2001-2003 Dynix All rights. [Citado Octubre 2007], [online]. Disponible en Internet: <<http://www.cshhorizon.cshgreenwich.org/ipac20/ipac.jsp?index>>. PS: 3573, R: 493, P.55.
6. CALVO, Carlos. 2007. GEA-Filtración. Filtración por Membranas Ósmosis Inversa, Nanofiltración, Ultrafiltración y Microfiltración. Tecnologías de punta. Soluciones Individuales. División Niro Inc. 1600

- O'Keefe Road, Hudson, Wisconsin 54016, USA. Disponible en Internet: <http://www.geafiltration.com>.
7. CARRIÓN, García Andrés. 2005. Análisis de series temporales y técnicas de previsión. Departamento de Estadística e I.O.; U.P.V. Cap 5: Modelos ARIMA, p. 41-53.
 8. CARTWRIGHT, Peter S. 2004. "Causas y Curas para el Ensuciamiento de Membranas".
 9. CHONGA, T.H.; WONG, F.S. y FANE, A.G. 2006. Enhanced concentration polarization by unstirred fouling layers in reverse osmosis: Detection by sodium chloride tracer response technique a School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, 50 Nanyang Avenue, Singapore 639798, Singapore Institute of Environmental Science and Engineering, Innovation Centre Block 2 Unit 237. [Available online 25 October 2006].
 10. CHONGA, T.H.; WONG, F.S.; FANE, A.G. 2006. Fouling in reverse osmosis: Detection by non-invasive techniques a School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, Singapore.
 11. COLINA, Ceballo Kenny. 2008. "Intensificación del Sistema de Lavado de las Membranas en la Operación de Ósmosis Inversa de la planta de Tratamiento de agua de ENERGAS-Varadero". Trabajo Diploma, Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos", en opción del Título de Ingeniero Químico. Matanzas 3 de julio 2008, Cuba.
 12. DELGADILLO, Hernández Adriana y RAMÍREZ, Oswaldo G. 2003 "Limpieza Química de las Membranas". Avista Technologies España, publicado 21 septiembre del 2003. [Citado Noviembre 2007], [online]. Disponible en Internet: <www.avista-technologies.net>.
 13. EILON, S. 1969. Industrial Engineering Tables. Edición Revolucionaria.
 14. ESCOBAR, I. y SHARP, M. 2003. Effects of Different Modes of Coagulation as Pre-treatment to Membrane Filtration for Drinking Water Production in Small Systems, Final report, The Midwest Technology

- Assistance Center for Small Public Water Systems. [Citado Enero 2004], [Online]. Disponible en Internet: <<http://mtac.sws.uiuc.edu/mtacdocs/finalreports/CoagulationMTACFinalReport.pdf>>.
15. FERNÁNDEZ, Bethencourt José D.; GARCÍA, Bermejo Lorenzo A. y HERNÁNDEZ, Bello Roberto. 2008. Particularidades de la ampliación de una I.D.A.M. urbana: el caso de la I.D.A.M. de Adeje-Arona en Tenerife. Consejo Insular de Aguas de Tenerife, España.
 16. GAETA, S.N. 2006. Application of reverse osmosis spiral wound membrane modules in the textile industry, in: C.J. King and J.N. Navratil, eds., Chemical Separation, Vol. 3, Litarvan Literature, Denver, p. 32-46.
 17. GARCÍA, E. y BALLESTEROS E. 2001. El impacto de las plantas desalinizadoras sobre el medio Marino: la salmuera en las comunidades bentónicas mediterráneas. En: Conferencia Internacional: El Plan Hidrológico Nacional y la Gestión Sostenible del Agua. Aspectos Medioambientales, Reutilización y Desalación (junio, 2001. Zaragoza, España): p. 10.
 18. GUERRA DEBÉN, Jorge. 1976. Introducción a la Estadística y el Diseño de Experimentos, Fac. Ing. Química y Alimentaria, ISPJAE.
 19. JABER, I.S.; AHMED, M.R. 2004. Technical and economic evaluation of brackish groundwater desalination by reverse osmosis (RO) process. Palestinian Water Authority, Shiffah Street, P.O. Box 5074, Gaza, Palestinian Authority.
 20. JELEN, P. 1991. "Pressure-driven membrane processes: principles and definitions". En: IDF Special Issue No. 9201. New applications of membrane processes. Brussels, Belgium: International Dairy Federation.
 21. JJ-NETWORK, C.B. 2001. Filtración por Membranas. Todos los derechos reservados. C/ SAN PASCUAL 43 B, 46101 Aldaya (Valencia), [online] – [Citado septiembre 2007]. Disponible en Internet:

- <http://www.systemdocat.com>>; <<http://www.osmosisdomestica.com>>.
CIF: B-97173991.
22. KAMALESH, Sirkar. 1998. Amazon: "Membrane Handbook". Good book for a person entering membrane separation, August 4, 1998. [Citado Nov. 2007], [Online]. Disponible en Internet: <<http://www.amazon.com/Membrane-Handbook-Winston-Ho/dp/>>.
23. KEDEM y KATCHALSKY. 1958. "Teoría de membranas en términos de la termodinámica de procesos de no equilibrio de Onsager".
24. LATTEMANN, S. y HÖPNER T. 2003. Seawater desalination. Impacts of brine and chemical discharge on the marine environment. Balaban Desalination Publications. L'Aquila: p. 142.
25. LEE, Sangyoun; ELIMELECH, Menachem; ANG, Wui Seng. 2005. "Chemical and physical aspects of cleaning of organic-fouled reverse osmosis membranes". Environmental Engineering Program, Department of Chemical Engineering, P.O. Box 208286, Yale University, New Haven. 20 July 2005, [Citado 6 septiembre 2007], [Online]. Disponible en Internet: <<http://www.sciencedirect.com>>. Format PDF. CT: 06520-8286.
26. MAIRAL, A.P.; GREENBERG, A.R.; KRANTZ, W.B. y BOND, L.J. 2005. Real-time measurement of inorganic fouling of RO desalination membranes using ultrasonic time-domain reflectometry. p. 185-196.
27. MARTÍN, M. 2001. "Microscopía de Fuerza Atómica aplicada a materiales porosos: Espectroscopia de Fuerzas", Trabajo Fin de Carrera. L. Físicas, Universidad de Valladolid.
28. MCGRAW-HILL; Freeman Harry M. 2000. "Pollution Prevention in electroplating Industries". En. Industrial Pollution Prevention Handbook. Ed. New York, EE.UU.
29. MEHDIZADEH, H. 2005. Membrane desalination plants from an energy-exergy viewpoint. Chemical Engineering Department, Tarbiat Modarres University, PO Box 14115-143, Tehran, Iran.
30. NICOLAISEN, B. 2005. "Filtration of membranes". p. 27-38.

31. OTERO, J.A.; LENA, G.; COLINA, J.M^a.; PRÁDANOS, P.; TEJERINA F. y HERNÁNDEZ, A. 2005. "Characterization of nanofiltration membranes. Structural análisis by the DSP Model and microscopical techniques".
32. PEI, Xua; DREWESA, J.E.; KIMB, Tae-Uk; BELLONA, Christopher y AMYC, Ga2y. 2006. Effect of membrane fouling on transport of organic contaminants in NF/RO membrane applications an Environmental Science and Engineering Division, Colorado School of Mines, Golden, CO 80401-1887, USA.
33. PERRY, R. 1964. Perry's Chemical Engineers Handbook. 6^{ta} Edición. McGraw Hill. New York.
34. PORTER, M.C. 2005. Funcionamiento natural de la ósmosis, [Citado octubre 2007], [Online]. Disponible en Internet: <<http://es.wikipedia.org/wiki/ósmosis>>.
35. QAIS, Bu-Ali M.A.; NADER, Al-Bastaki. 2006. An experimental study of performance parameters and ion concentration along a reverse osmosis membrane.
36. R.O.M. 2002. (Reverse Osmosis Membranes). Technical Manual. [Citado Febrero 2005], [Online]. Disponible en Internet: <<http://www.rom.com/filtration/membranes/ro/pdf>>.
37. RAHARDIANTO, Anditya; SHIH, Wen-Yi; LEE, Ron-Wai y COHEN, Yorham. 2005. Diagnostic characterization of gypsum scale formation and control in RO membrane desalination of brackish water. Chemical Engineering Department and Center for Water Technology Research, University of California, Los Angeles, CA 90095-1592, United States.
38. REDONDO, J.A. 2006. Improve RO system performance and reduce operating cost with FILMTEC fouling-resistant (FR) elements. Liquid Separations, Technical Service and Development, Dow Deutschland Inc., Werk Rheinmünster, POB 20-77836 Rheinmünster, Germany.
39. REZA, García Clemente. 2005. Flujo de fluidos en válvulas accesorios y tuberías. Escuela superior de Ingeniería Química e Industrial. Mc Graw-Hill.

40. RIDGWAY, H.F. 2005. Biological Fouling of Separation Membranes Used in Water Treatment Applications. AWWA research Foundation.
41. RIGOLA, Lapeña Miguel. 2005. Filtración de las membranas en los procesos de OI, MF, UF y NF.
42. ROMERO, Pavía Pedro. 2007. Agua, turismo y medio ambiente. Conversión en recurso hidráulico de las aguas subterráneas de baja calidad. Jefe del Departamento de Captaciones de la Empresa. Fomento Agrícola Castellonense S.A. (FACSA).
43. ROSABAL, Vega. 1988. "Hidrodinámica y separaciones mecánicas". Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana.
44. SALGOT, M.; ANGELAKIS, A. 2001. Guidelines and regulations on wastewater reuse. Cáp. 23 en: Lens, p. 184-196.
45. SHAMMIRI, M.; DAWAS, M. 2005. Maximum recovery from seawater reverse osmosis plants in Kuwait. Water Desalination Department, Water Resources Division, Kuwait Institute for Scientific Research.
46. SHELEF, G. 2002. Gestión de las aguas subterráneas. Explotación y sobreexplotación. Uso conjunto. Recarga artificial. Desalación. Problemática de la sobreexplotación de acuíferos.
47. SUDAK, Richard G. 2001. H.I.M.T. (Handbook of Industrial Membrane Technology).
48. UNEP-IETC. 2006. Sourcebook of Alternative Technologies for Freshwater Augmentation in Latin America and the Caribbean. (IETC Technical Publication Series-8d), [Citado Septiembre 2007], [Online]. Disponible en Internet: <<http://www.unep.or.jp/ietc/Publications/Urban/UrbanEnv.asp>>
49. UNITEK. 2004. Equipos de ósmosis inversa, Agua de Pre-tratamiento Integral, ósmosis inversa y membranas para ósmosis inversa. [Citado Noviembre 2007], [Online]. Disponible en Internet: <<http://www.quiminet.com.mx/pro/osmosisreversa.htm>>.
50. VAN, der Meer; W.G.J. 2003. Mathematical modelling of NF and RO membrane filtration plants and modules, Ph.D. Thesis, 2003.

51. VIGO, Fernando; GALLEGO, Silvia; SEPÚLVEDA, Jaime. 2003. Soluciones al Ensuciamiento de Membranas en Instalaciones de Ósmosis Inversa. Autopsia de Membranas: una herramienta para solucionar los problemas de ensuciamiento en las instalaciones de ósmosis inversa.
52. VRIJENHOEK, E.M.; HONG, S.; ELIMELECH, M. 2004. Influence of membrane surface properties on initial rate of colloidal fouling of reverse osmosis and nanofiltration membranes, J. Membr. Sci., p. 188.
53. VROUWENVELDER, J.S. 2002. Diagnosis of fouling problems of NF and RO membrane installations by a quick scan, Desalination, p. 121-124.
54. VROUWENVELDER, J.S.; WESSELS, L.P. 2006. The Membrane Fouling Simulator: a practical tool for fouling prediction and control. J. Membr. Sci.
55. VROUWENVELDERA, J.S.; BAKKERB, S.M.; WESSELSA, L.P. 2007. The Membrane Fouling Simulator as a new tool for biofouling control of spiral-wound membranes J.S. J.A.M. van Paassenb AKIWA Water Research. P.O. Box 1072, 3430 BB Nieuwegein, The Netherlands.
56. WUI, Seng Ang; SANGYOUNG, Lee; ELIMELECH, Menachem. 2005. Seng Chemical and physical aspects of cleaning of organic-fouled reverse osmosis membranes. Environmental Engineering Program, Department of Chemical Engineering, P.O. Box 208286, Yale University, New Haven, CT 06520-8286, USA.
57. ZENON. 2001. OPERATION & MAINTENANCE MANUAL. Demineralised Water Treatment System for Varadero Gas Plant Cogen Boiler Feedwater Treatment Project Varadero, Cuba.
58. ZHANG, Z.X.; GREENBERG, A.R.; KRANTZ W.B.; CHAI, G.Y. 2003. Study of membrane fouling and cleaning in spiral wound modules using ultrasonic time-domain reflectometry, In: New Insights into Membrane Science and Technology: Polymeric and Biofunctional Membranes, Bhattacharyya and Butterfield, eds., Elsevier.

Anexos

ANEXOS

Tablas de datos Capítulo 1

Tabla N₀ 1.1 Características y aplicación de los diferentes módulos de membranas.

Tipo de Modulo	Superficie de la Membrana (m²/m³)	Costos	Flujo (m³/m²día)	Aplicación
Tubular	25-100	Alto	0.3-1	UF, D
Plana	400500	Alto	0.3-1	UF, OI, PV
Arrollado en Espiral	500-2000	Bajo	0.3-1	OI, SG
Fibras Huecas	1500-3000	Bajo	0.004-0.1	UF, OI, SG, D, HD

Tablas de datos Capitulo 2

Tabla N_o 2.1 Datos del análisis del agua cruda de los pozos Varadero.

Iones	mg/L	CaCO₃ (mg/L)	meq/L	Concentración Total (mg/L)
Amonio (NH ₄)	0	0.000	0.000	0.00
Potasio (K)	0	0.000	0.000	0.00
Sodio (Na)	0	0.000	0.000	0.00
Magnesio (Mg)	39.385	161.998	3.240	39.38
Calcio (Ca)	75.751	189.000	3.780	75.75
Estroncio (Sr)	0	0.000	0.000	0.00
Bario (Ba)	0	0.000	0.000	0.00
Carbonato (CO ₃)	0.786	1.310	0.026	0.79
Bicarbonato (HCO ₃)	356.025	291.800	5.836	356.02
Nitrato (NO ₃)	0	0.000	0.000	0.00
Cloro (Cl)	24.28	34.243	0.685	24.28
Flúor (F)	0	0.000	0.000	0.00
Sulfato (SO ₄)	14	14.583	0.292	14.00
Silicato (SiO ₂)	14.004	n.a.	n.a.	14.00
Boro (B)	0	n.a.	n.a.	n.a.

Tabla N° 2.2 Análisis para el diseño del pre-tratamiento en una planta de ósmosis inversa.

Diseño del pre-tratamiento	Frecuencia de lavado	Tiempo (meses)
Existencia de un problema	4-6	1 a 3
Adecuado	2-4	3 a 6
Correctamente	1-2	6 a 12

Tabla N_o 2.3 relación de la solubilidad del bicarbonato con respecto al pH del agua.

Disociación de los aniones de Ácidos y Bases débiles														
pH	4.0	4.5	5,0	5.5	6,0	6.5	7,0	7.5	8,0	8.5	9.0	9.5	10.0	10.5
NH ₄ ⁺							99.4	98.4	94.7	85,0	64.2	36.3	15.2	5.4
NH ₄ OH							0.6	1.6	5.3	15,0	35.8	63.7	84.8	94.6
H ₂ CO ₃	99.6	98.7	95.9	88,0	69.9	42.3	18.9	6.8	2.3	0.7	0.2			
HCO ₃ ⁻	0.4	1.3	4.1	12,0	30.1	57.7	81.1	93,0	97.3	97.8	95.3	87.0	68,0	40.2
CO ₃ ²⁻								0.2	0.4	1.5	4.5	13,0	32,0	59.8
H ₃ PO ₄	1.3	0.4	0.1											
H ₂ PO ₄ ⁻	98.6	99.4	99.3	98,0	94.2	83.6	61.7	33.8	13.9	4.9	1.6	0.5	0.1	
HPO ₄ ²⁻	0.1	0.2	0.6	2,0	5.8	16.4	38.3	66.2	86.1	95.1	98.3	99.2	98.9	96.9
PO ₄ ³⁻											0.1	0.3	1,0	3.1
H ₂ SiO ₃			100,0		99.9		99.6		96.1		71.5		20,0	4,0
HSiO ₃ ⁻					0.1		0.4		3.9		28.5		79.9	95.4
SiO ₃ ²⁻													0.1	0.6

Tablas de datos Capítulo 2

Tabla N₀ 2.4 Parámetros del flujo de entrada al 1^{er} paso de OI.

Parámetros del flujo de entrada al 1^{er} paso de OI	
Flujo	38.60 m ³ /h (entre ambos)
Conductividad	650 μS/cm
Presión	1460 - 1500 Kpa
Temperatura	25°C

Tabla N₀ 2.5 Parámetros del flujo de salida del 1^{er} paso de OI que se dirige hacia el colector 1 y al segundo paso.

Parámetros del flujo de salida del 1^{er} paso de OI	
Flujo del permeado	23-24 m ³ /h
Conductividad del permeado	41.24 μS/cm
Presión	350-400 Kpa
Temperatura	25°C
Recobrado	52%
Eficiencia	95-97%

Tabla N₀ 2.6 Parámetros y características del concentrado 1.

Parámetros y características del concentrado 1	
Flujo del concentrado	16.84 m ³ /h
Conductividad del concentrado	1500 μS/cm
Temperatura	25 °C
pH	7.5-8.0

Tabla N₀ 2.7 Parámetros del flujo de salida del 2^{do} paso de OI hacia el colector 2.

Parámetros del flujo de salida del 2^{do} paso de OI	
Flujo del permeado	15 m ³ /h
Flujo del concentrado	8-9 m ³ /h
Conductividad en el colector 2	< 4 μS/cm
Conductividad del concentrado	100 μS/cm
Presión	120-150 Kpa
Temperatura	25°C
pH del permeado	5.5-6.0
pH del concentrado 2	7.5-8.0
Recobrado	75%
Eficiencia	88-90%

Tabla N₀ 2.8 Parámetros del flujo de salida de los filtros de lechos mezclados.

Parámetros del flujo de salida de los filtros de lecho mezclado	
Flujo del permeado	15 m ³ /h
Conductividad del permeado	< 1.0 μS/cm
Presión	120-150 Kpa
Temperatura	25°C

Tablas de datos Capítulo 3

Tabla N₀ 3.1 Características y propiedades de la membrana de estudio

Nombre del producto	BW30 - 400
Área de superficie activa nominal	400 (37) ft ² (m ²)
Caudal de permeado	1,5 m ³ /h
Rechazo de sal estabilizada	99,5 %
Tipo de membrana	Poliamida de película delgada
Temperatura máxima de operación	113 °F (45°C)
Velocidad máxima del fluido	14 (3.2) gpm (m ³ /hr)
Máxima caída de presión	13 psig (0.9 bar)
Rango de pH en operación continua	2-11
Tolerancia libre de cloro	< 0.1 ppm
Ancho del canal (B)	0,715 m
Porosidad (ε)	0,88
Espesor del espaciado	0,82 m
Longitud	1.016 m
Diámetro exterior	0,20 m
Diámetro hidráulico (d _h)	0,97 mm
Eficiencia	95 al 97 %.

Tabla N₀ 3.2 Parámetros del agua de alimentación al banco experimental.

Recobrado	Flujo de permeado (m ³ /h)	SDT (mg/l)	Flujo de entrada (m ³ /h)	Entrada de SDT (mg/l)	Presión de Entrada (bar)
		7,94	10,00	951,62	6,33
0,02	1.39	20,56	8,61	1082,81	4,73

Tablas de datos Capítulo 3

Tabla N_o 3.3 Datos de las muestras tomadas en el banco experimental.

% de Presión	% Concentración	Tiempo	
		(Semanas)	(días)
1.8	2.2	1	5
2.1	2.2	2	10
2.3	2.2	3	15
2.4	2.4	4	20
2.5	2.6	5	25
2.5	2.7	6	30
2.6	2.9	7	35
2.6	3.1	8	40
2.7	3.3	9	45
2.9	3.4	10	50
3.2	3.6	11	55
3.3	3.7	12	60
3.7	3.9	13	65
4.4	4.2	14	70
4.5	4.3	15	75
4.7	4.5	16	80
5.2	4.8	17	85
5.6	5	18	90
5.8	5.2	19	95
6.2	5.4	20	100
6.9	5.7	21	105
7.3	6	22	110
7.8	6.3	23	115
8	6.4	24	120
8.4	6.6	25	125
8.9	6.9	26	130
9.1	7	27	135
9.4	7.2	28	140

Tablas de datos Capítulo 3

9.9	7.5	29	145
10.5	7.8	30	150
10.9	8.1	31	155
11.5	8.5	32	160

Tablas de datos Capítulo 3

% de Presión	% Concentración	Tiempo	
		(Semanas)	(días)
12	8.8	33	165
12.7	9.2	34	170
12.8	9.3	35	175
13.2	9.5	36	180
13.4	9.6	37	185
13.6	9.7	38	190
13.8	9.9	39	195
14.2	10.1	40	200
14.5	10.3	41	205
14.8	10.5	42	210
14.9	10.6	43	215
15.4	10.8	44	220
15.5	10.9	45	225
15.8	11.1	46	230
16.6	11.5	47	235
17	11.8	48	240
18.1	12.3	49	245
18.4	12.7	50	250
19.2	13.2	51	255
20.2	13.8	52	260
20.5	14	53	265
21.3	14.5	54	270
22.1	15	55	275
23.2	15.7	56	280
23.6	16.2	57	285
24.8	16.9	58	290
25.3	17.5	59	295
25.9	18.3	60	300

Tabla N₀ 3.4 Valores de la normalidad de las variables

Parámetros	Presión (P)	Concentración (c)
Tamaño (n)	60	60
Media (\bar{x})	8.32	11.2
Varianza (S^2)	19.43	49.61
Desviación estándar (S)	4.4	7.04
Mínimo	2.2	1.8
Máximo	18.2	25.9
Coficiente de skewness	1.38	1.26
Coficiente de kurtosis	-1.12	-1.42
Coficiente de variación (%)	52.97	62.85

Tabla N₀ 3.5 Características de los modelos más ajustados para los datos experimentales de presión vs concentración.

Modelo	Correlación	Raíz Cuadrada
Linear	0.9988	99.76 %
Multiplicativo	0.9962	99.24 %
Doble Recíproco	0.9893	97.88 %
Raíz cuadrada - Y	0.9893	97.87 %
Raíz cuadrada - X	0.9861	97.24 %
Exponencial	0.9589	91.94 %
Logarítmico - X	0.9485	89.96 %
S - curva	-0.9434	88.99 %
Recíproco - X	-0.8242	67.93 %

Tabla N_o 3.6 Características de los modelos más ajustados para los datos experimentales de las presiones en función del tiempo.

Modelo	Correlación	R-Cuadrado
Raíz cuadrada -Y	0.9967	99.34 %
Exponencial	0.9867	97.35 %
Lineal	0.9861	97.24 %
Multiplicativo	0.9497	90.20 %
Raíz cuadrada -X	0.948	89.87 %
Logarítmico-X	0.8505	72.34 %
Doble recíproco	0.7358	54.14 %
S-curva	-0.6171	38.09 %
Recíproco-X	-0.4835	23.38 %

Tabla No 3.7 Características de los modelos más ajustados para los datos experimentales de las concentraciones en función del tiempo.

Modelo	Correlación	R-Cuadrado
Raíz cuadrada -Y	0.9964	99.28 %
Lineal	0.9869	97.40 %
Exponencial	0.9798	96.01 %
Multiplicativo	0.9468	89.65 %
Raíz cuadrada -X	0.9454	89.39 %
Logarítmico-X	0.8423	70.94 %
Doble recíproco	0.7544	56.92 %
S-curva	-0.6145	37.76 %
Recíproco-X	-0.4678	31.89 %

Tablas de datos Capítulo 3

Tabla N_o 3.8 Datos de las muestras tomadas en el tubo D de la planta.

% de presiones	% de concentraciones	tiempo	
		(semanas)	(días)
2.8	2.4	1	5
3.3	2.7	2	10
3.4	2.7	3	15
3.6	3.3	4	20
3.8	3.5	5	25
4	3.8	6	30
4.2	4.3	7	35
4.5	4.8	8	40
4.9	5.2	9	45
5.1	5.8	10	50
5.6	6.1	11	55
5.8	6.5	12	60
6	7.1	13	65
6.5	7.4	14	70
6.7	7.7	15	75
6.9	8	16	80
7.1	8.3	17	85
7.3	8.3	18	90
7.5	9	19	95
7.8	9.3	20	100
8	9.6	21	105
8.2	9.9	22	110
8.2	10	23	115
8.4	10.2	24	120
8.6	10.5	25	125
8.8	10.8	26	130
9	11.1	27	135
9.2	11.4	28	140
9.4	11.7	29	145
9.6	12.2	30	150
9.8	12.3	31	155

Tablas de datos Capítulo 3

% de presiones	% de concentraciones	Tiempo	
		(semanas)	(días)
10	12.8	32	160
10.3	13	33	165
10.5	13.5	34	170
10.8	14	35	175
11.1	14.2	36	180
11.3	14.5	37	185
11.5	14.9	38	190
11.7	15.1	39	195
11.9	15.6	40	200
12.2	16.1	41	205
12.5	16.5	42	210
12.8	17.4	43	215
13.1	17.6	44	220
13.3	17.8	45	225
13.5	18.4	46	230
13.8	18.6	47	235
14.1	18.9	48	240
14.3	19.4	49	245
14.6	19.7	50	250
15.2	21	51	255
15.1	21.5	52	260
15.3	21.9	53	265
15.6	21.8	54	270
16.2	22.6	55	275
16.5	22.9	56	280
16.9	23.8	57	285
17.1	24.2	58	290
17.8	24.9	59	295
18	25.1	60	300

Tabla N^o 3.9 comportamiento económico con y sin la ubicación del patrón de incrustaciones.

Costos de los lavados	2009	2010	2011
Valor de los lavados (\$/m ³)	0,03	0,001	0,001
Precio de lavados anual (\$/a)	6,1875	0,039375	0,002
Membranas (Unid/año)	7	5	2
Costo de Membranas (\$/U)	900	900	900
Gasto de Membranas (\$/A)	6300	4500	1800
Precio del MC-1 (\$/kg)	5,85	5,85	5,85
Gasto del MC-1 (\$/Año)	32,760	22,932	15,245
Precio del MC-4 (\$/kg)	4,025	4,025	4,025
Gasto del MC-4 (\$/Año)	40,572	9,4668	5,961
Precio del agua (\$/m ³)	0,45	0,45	0,45
Gasto del agua (\$/año)	92,8125	17,71875	0,9
Total	137.140	50.118	22.106

Figuras del Capítulo 1

Figura N₀ 1.1 Principio de la ósmosis inversa.

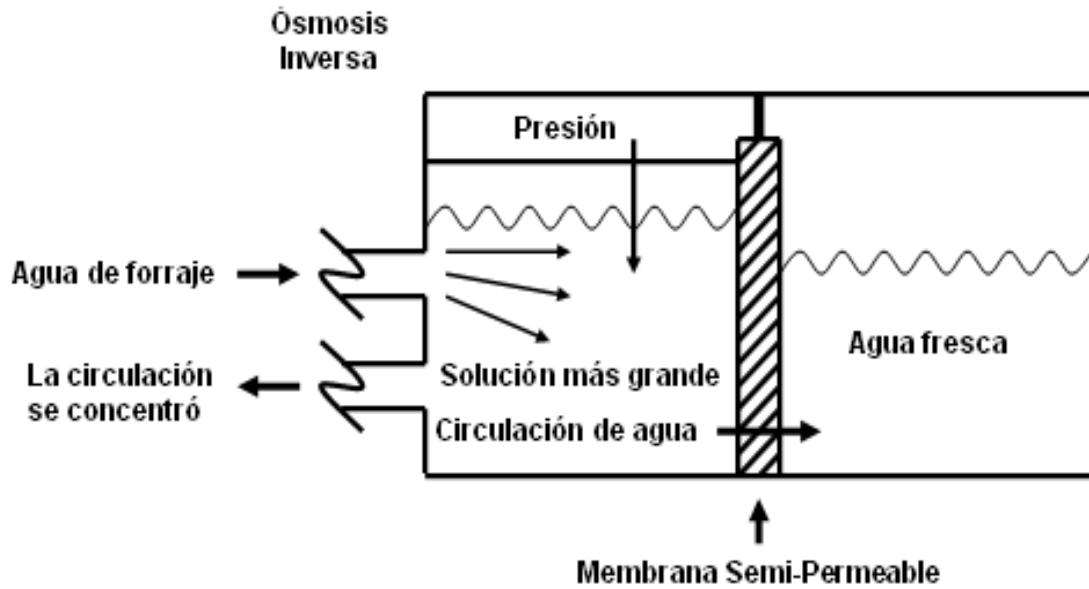


Figura N₀ 1.2 Esquema de una industria de tratamiento de agua por OI.

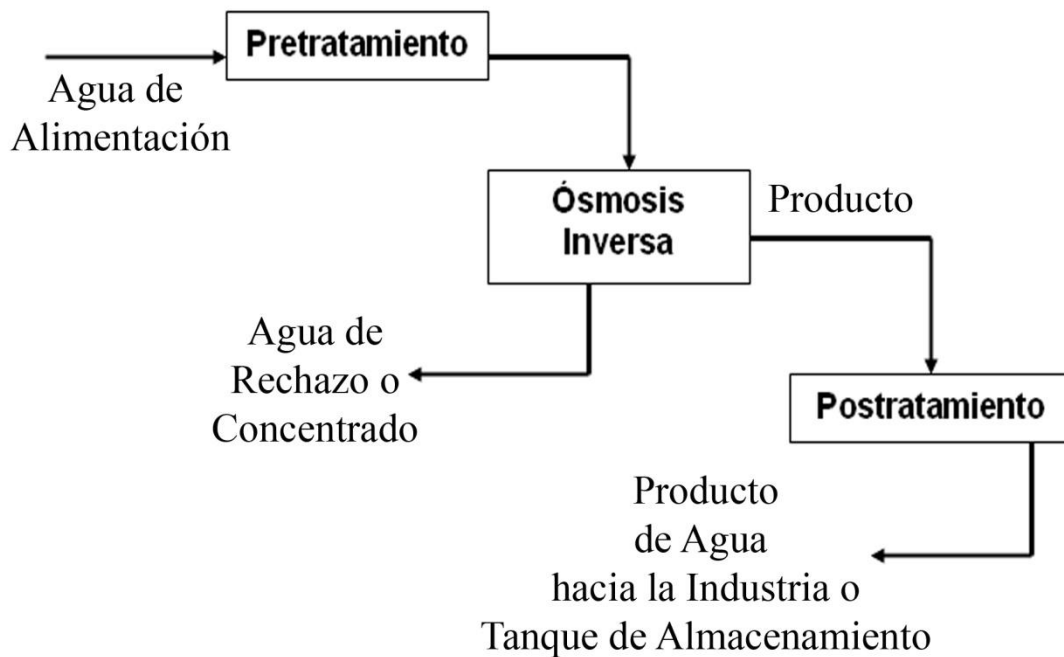


Figura N^o 1.3 Módulo tubular de membranas.

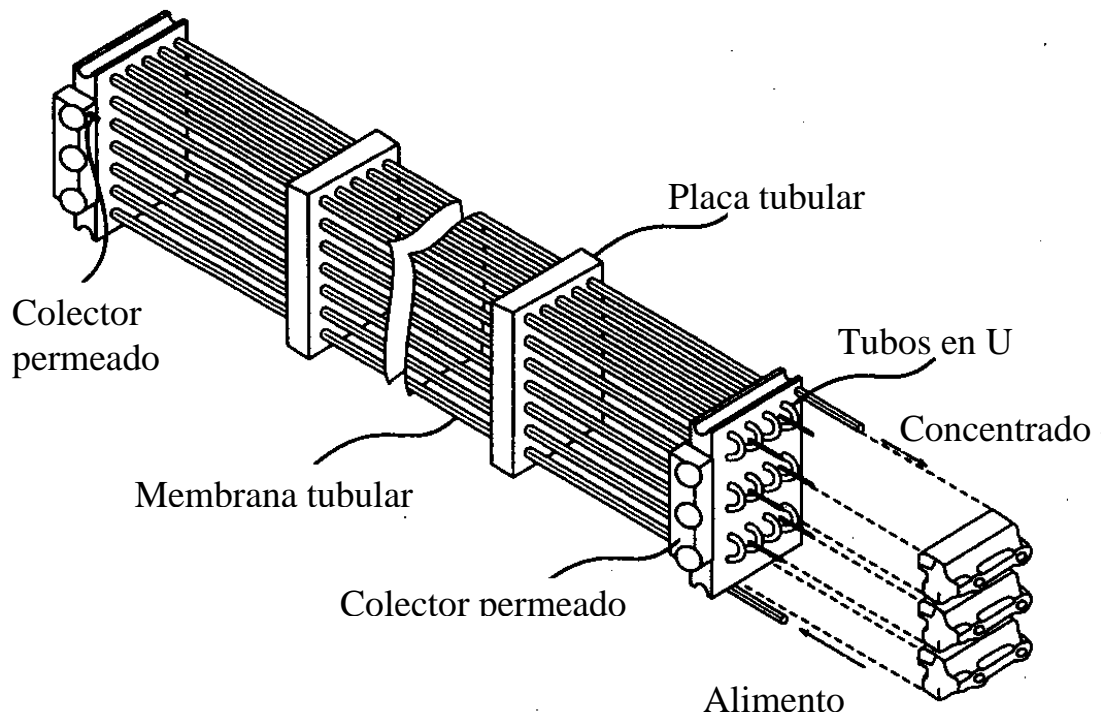
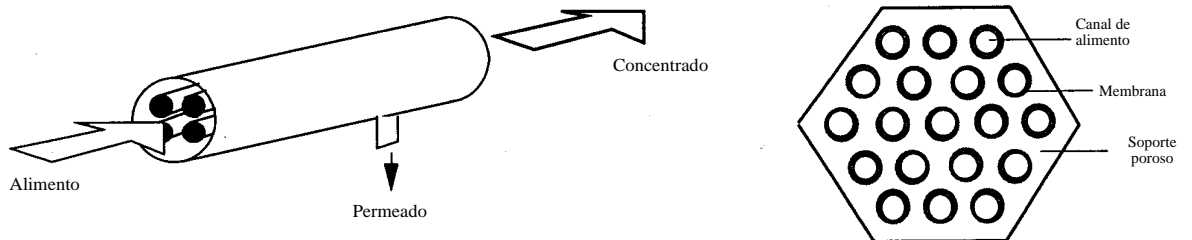
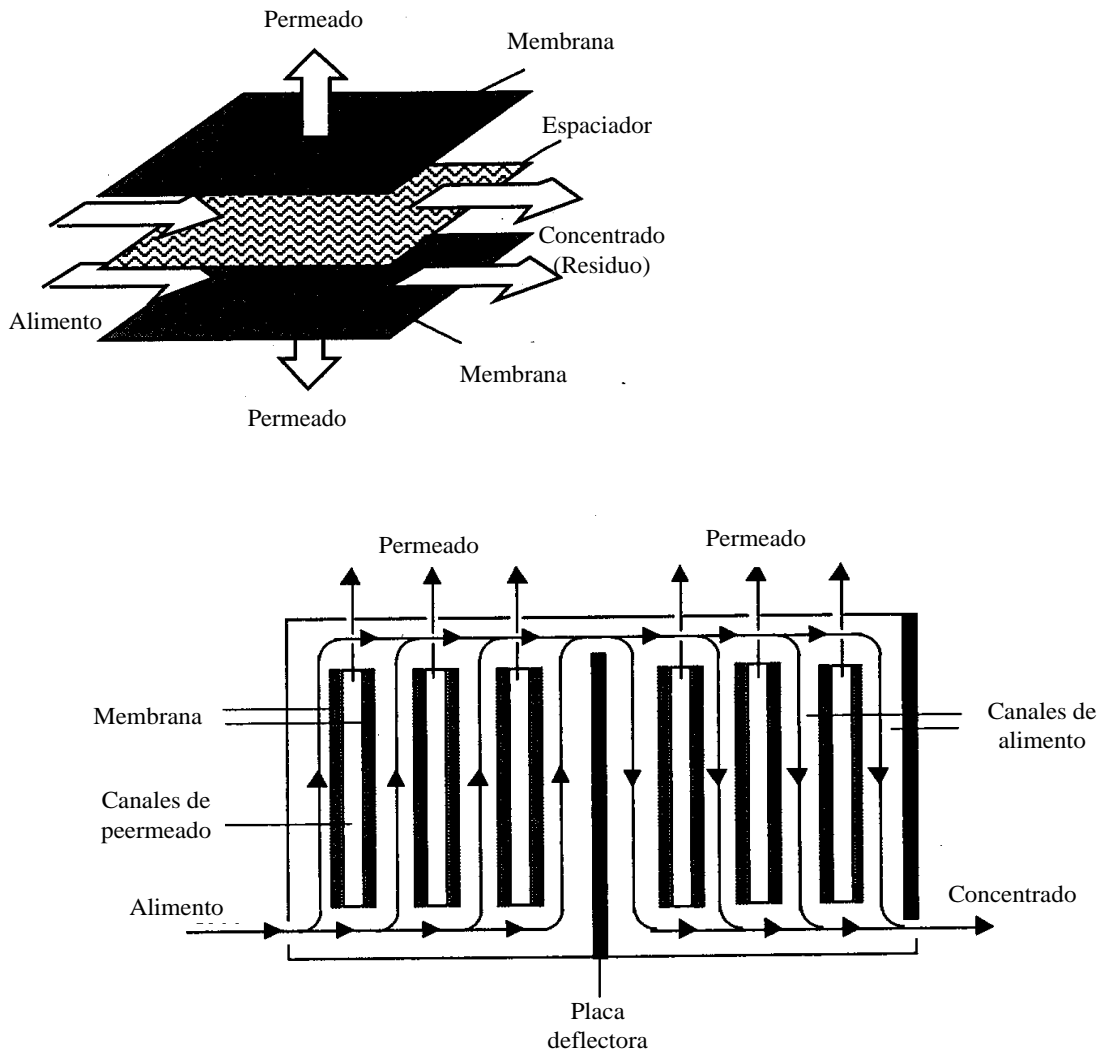


Figura N₀ 1.4 Módulos planos o de fibra de placa y marco de las membranas en Placas Paralelas.



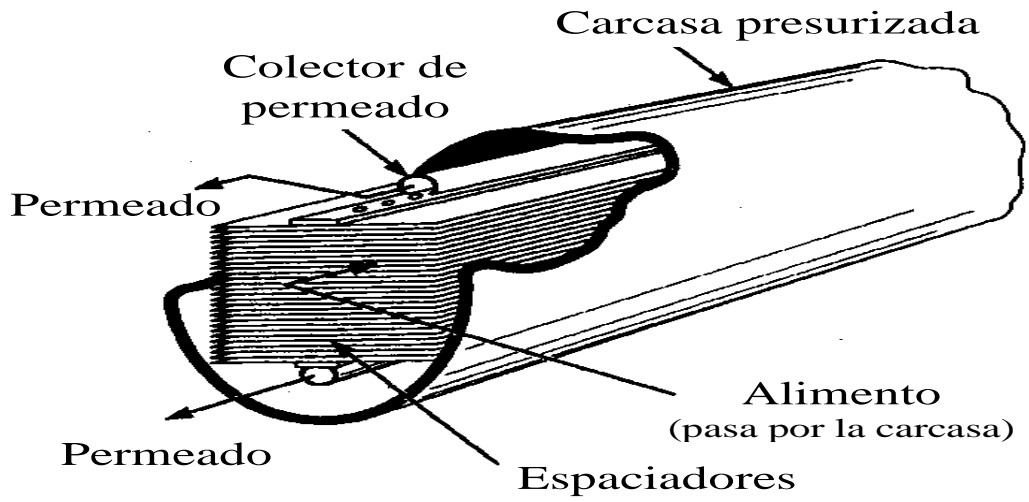
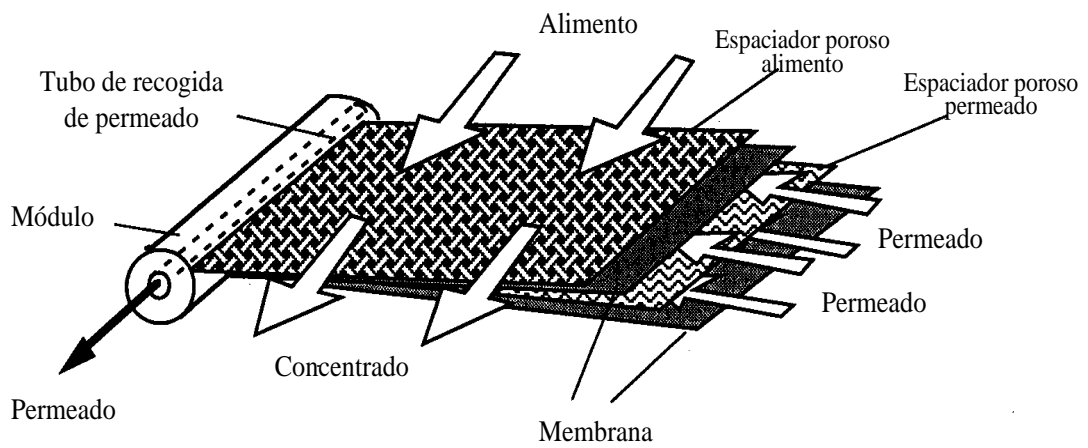


Figura N_o 1.5 Módulos de las membranas arrolladas en espiral.



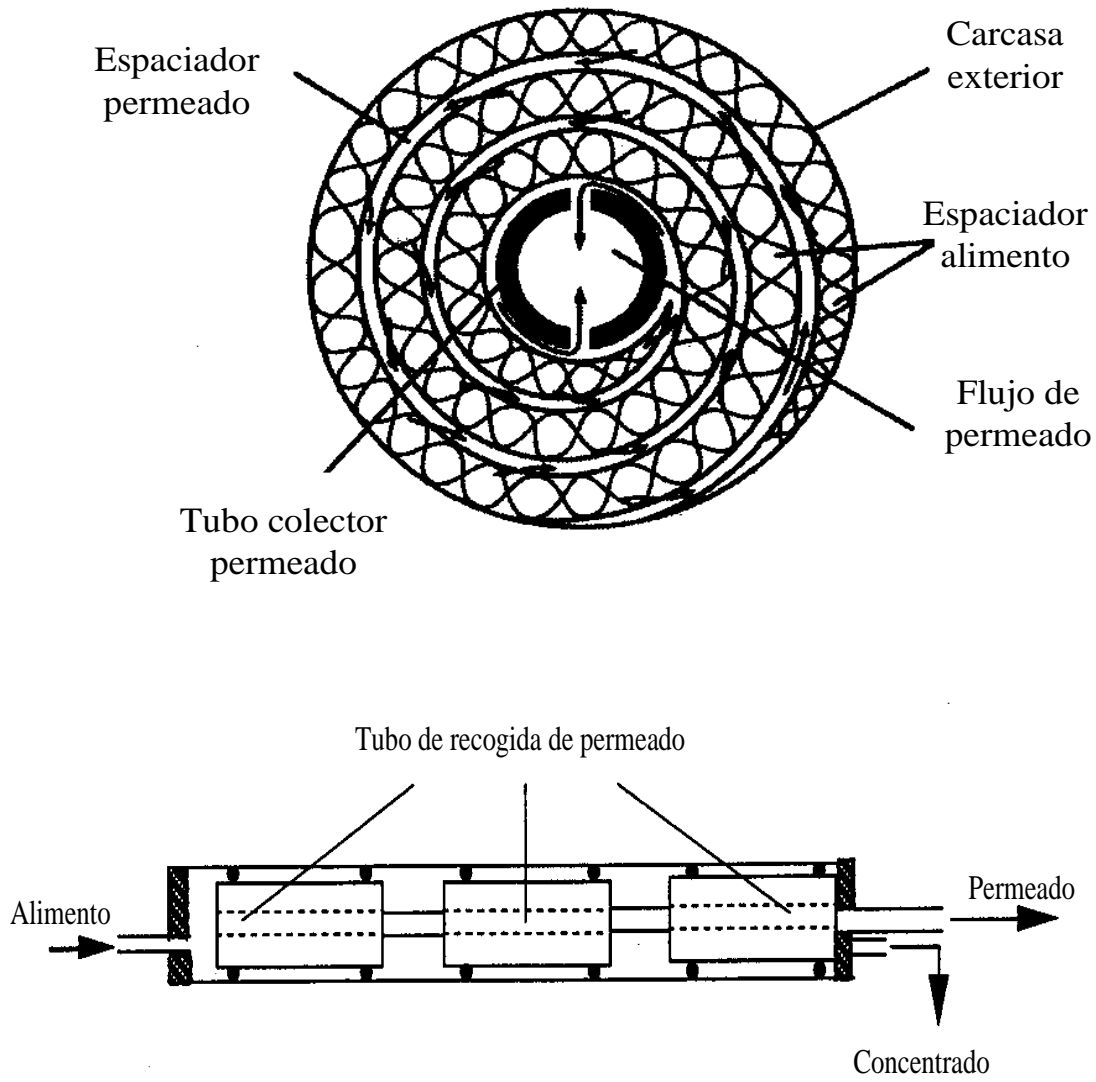
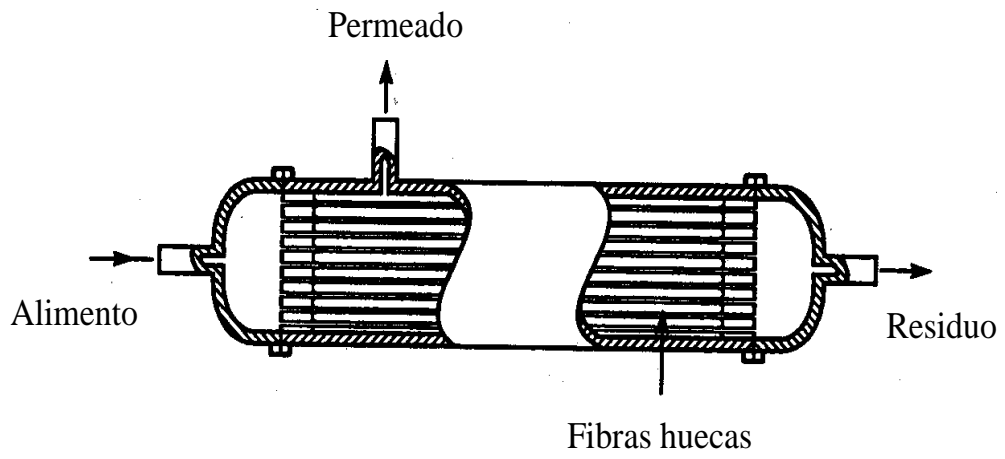
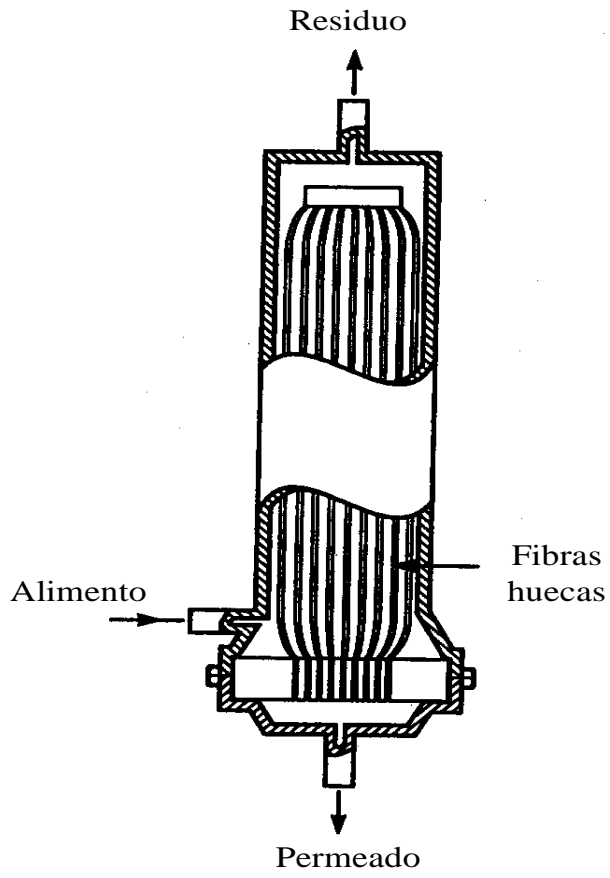
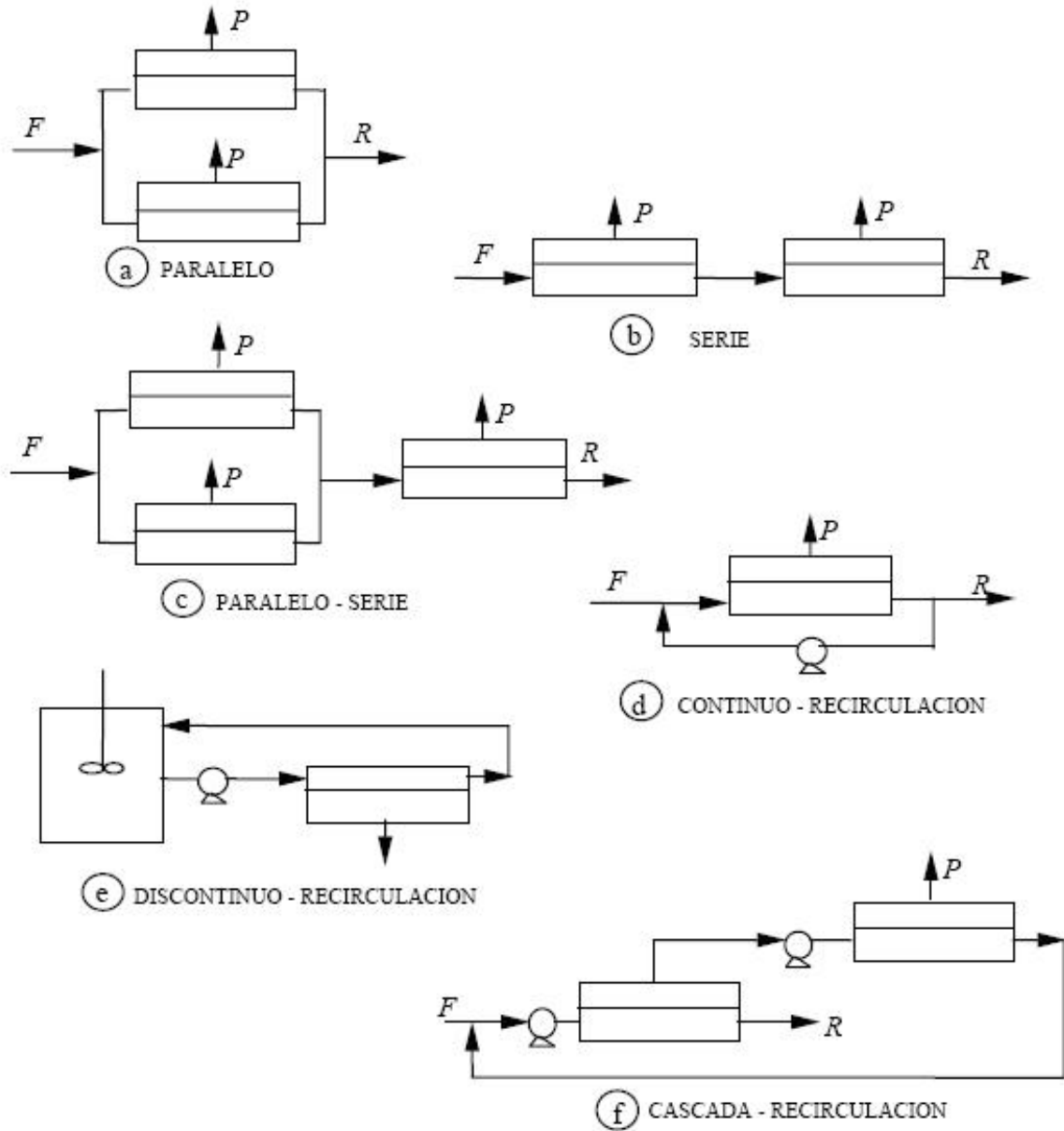


Figura N_o 1.6 Módulos de membranas de fibra hueca.



Figuras del Capítulo 1

Figura N₀ 1.7 Configuraciones posibles de los módulos de las membranas.



Figuras del Capítulo 2

Figura N° 2.1 filtros de 5 micras.

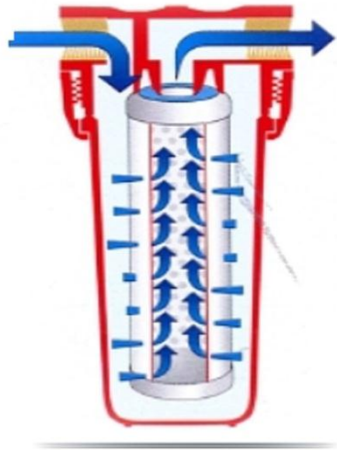


Figura N₀ 2.2 Etapa de pre-tratamiento de la planta de ENERGAS.

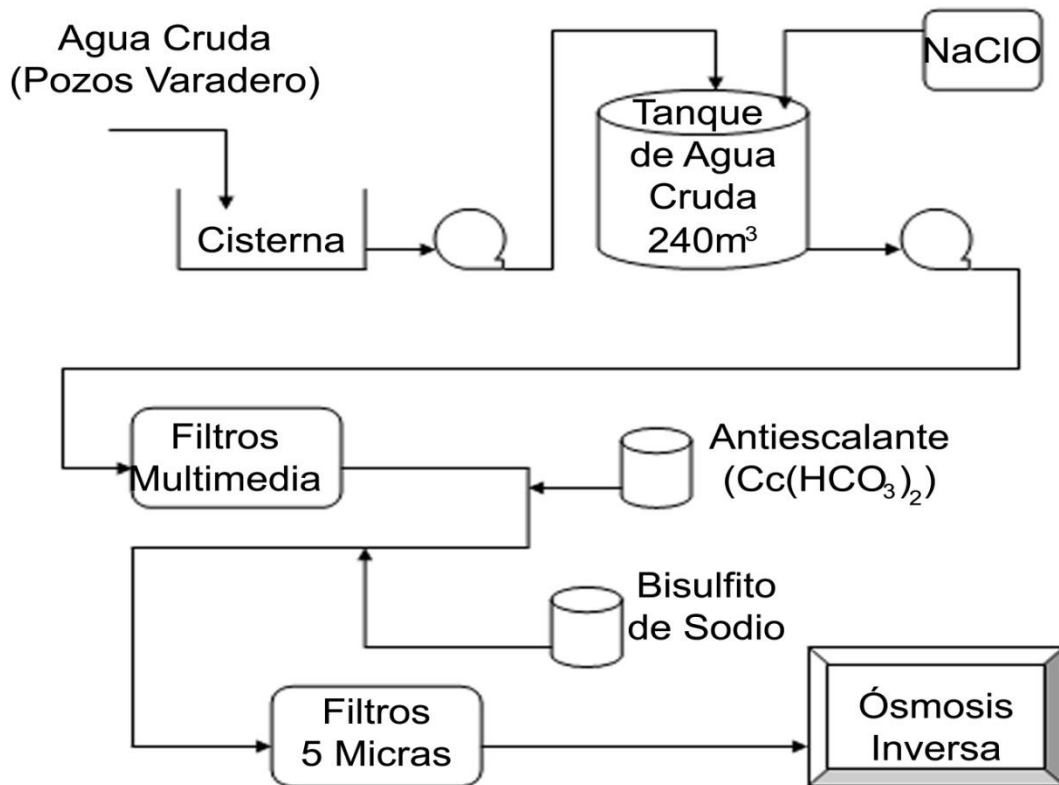


Figura N₀ 2.3 Diagrama del 1^{er} paso de permeado y 2^{do} paso de permeado.

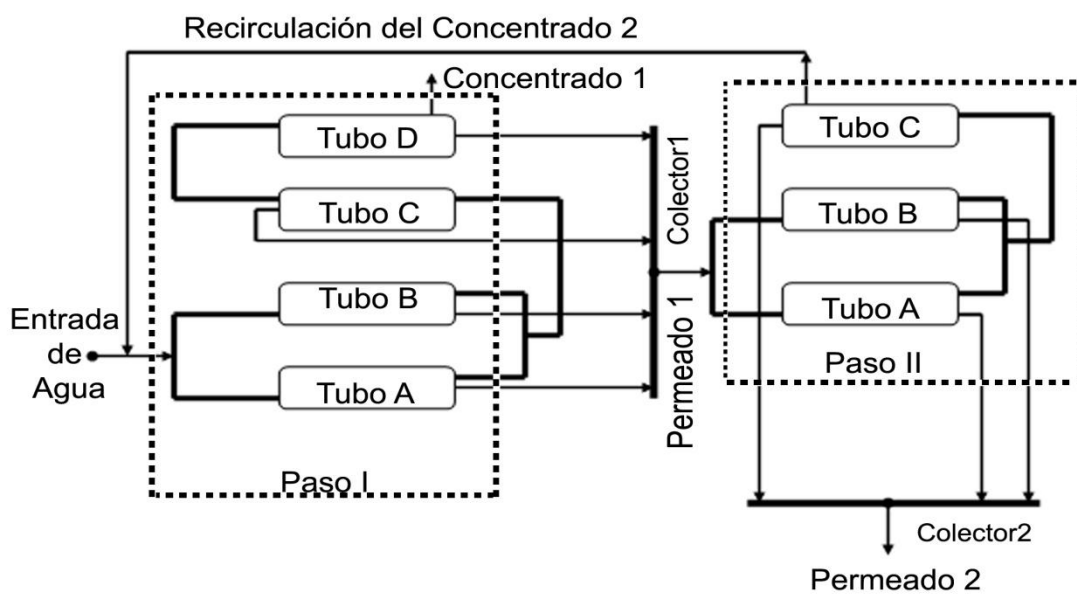
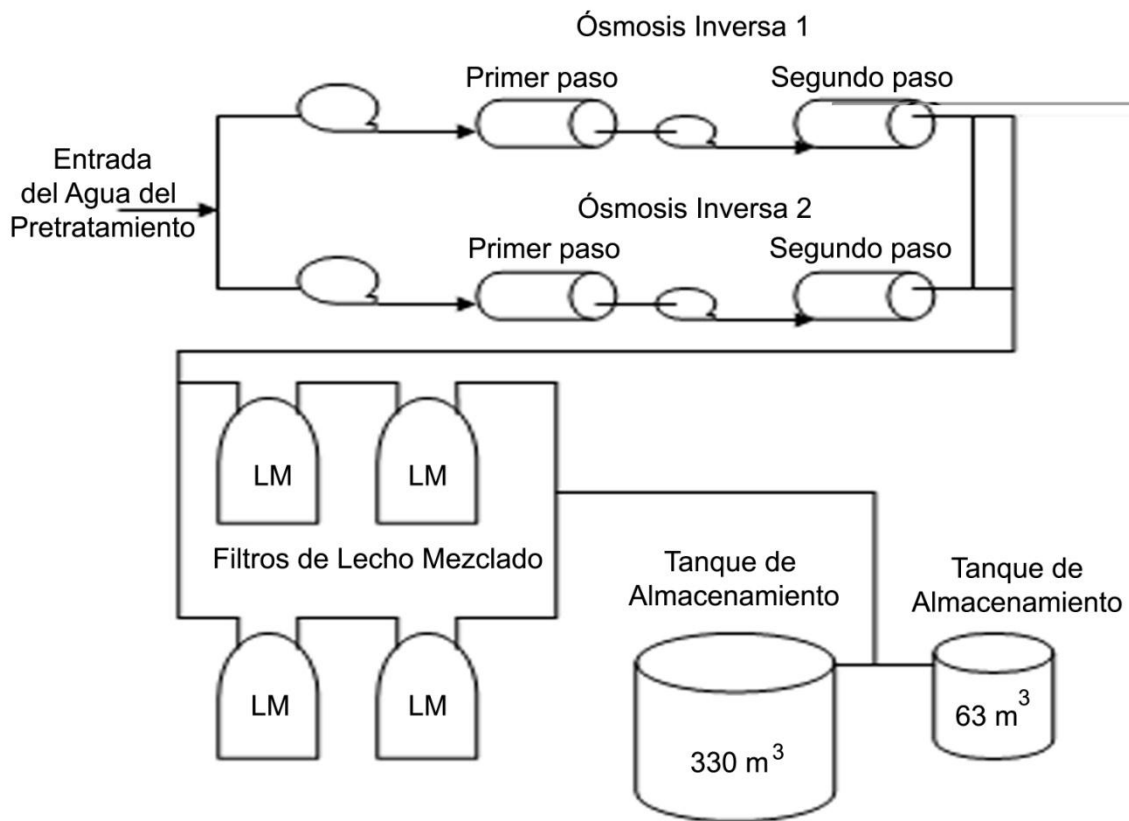


Figura N₀ 2.4 Etapa de tratamiento a partir de la OI.



Figuras del Capítulo 3

Figura N₀ 3.1 Metodología seguir para el trabajo realizado en el banco experimental.

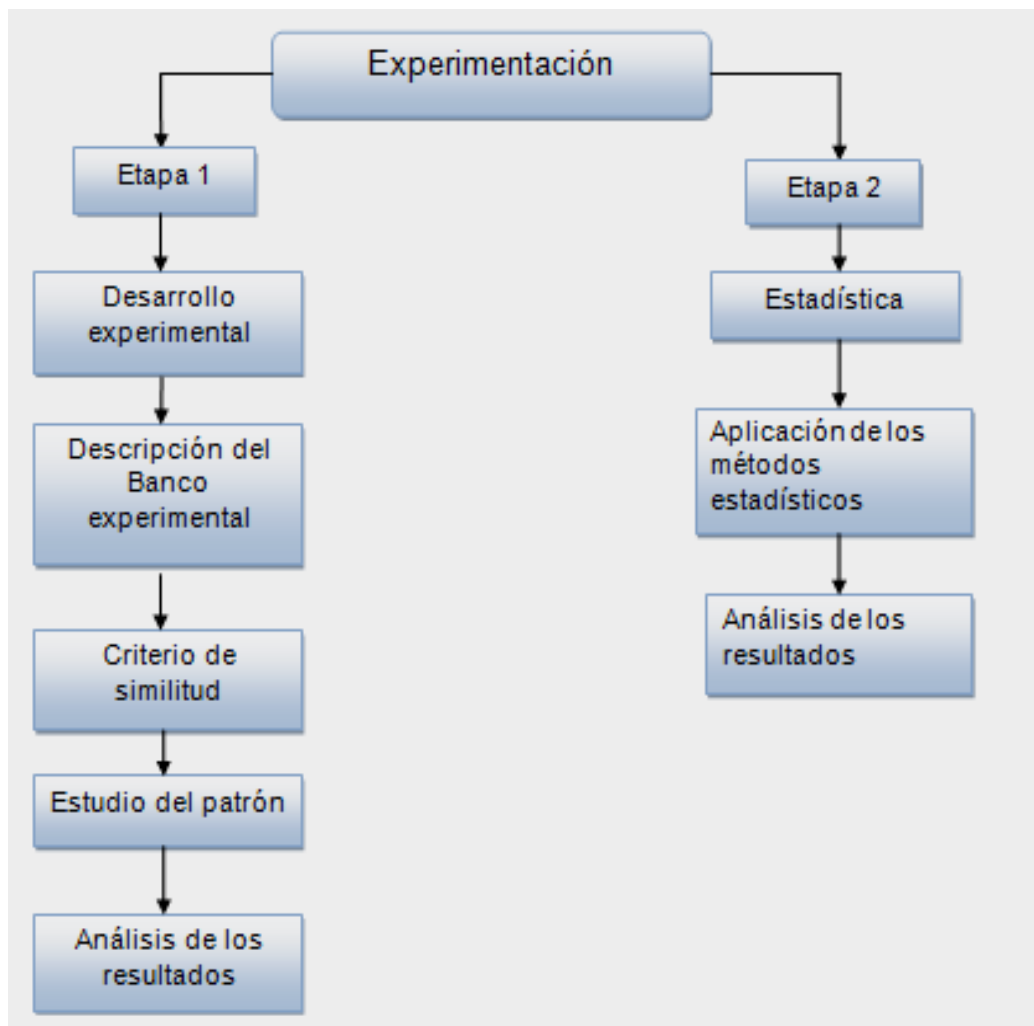


Figura N₀ 3.2 Imagen del banco experimental para las membranas.



Figura N₀ 3.3 Membrana virgen utilizada en la experimentación.



Figura N₀ 3.4 Imagen del patrón de incrustación.

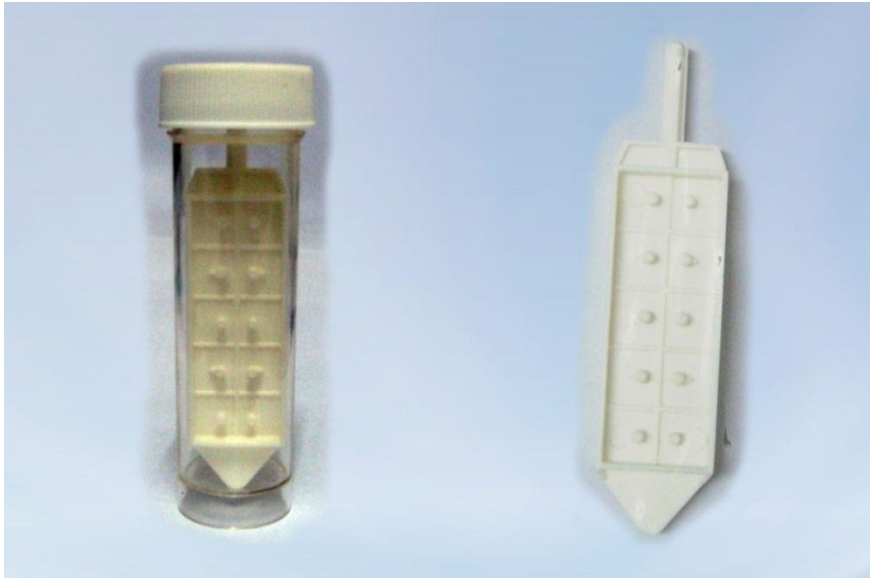


Figura N₀ 3.5 Tiempo de estabilidad del permeado para la membrana virgen del banco experimental.

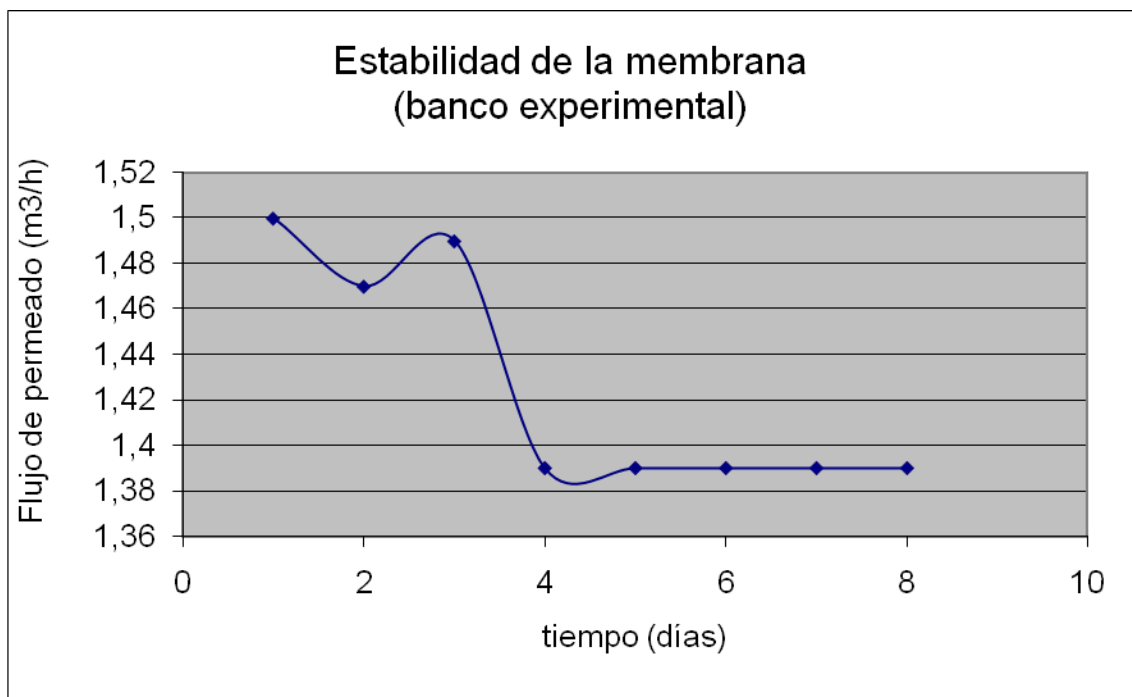


Figura N_o 3.6 Resultados de la regresión simple de (presión vs concentración)

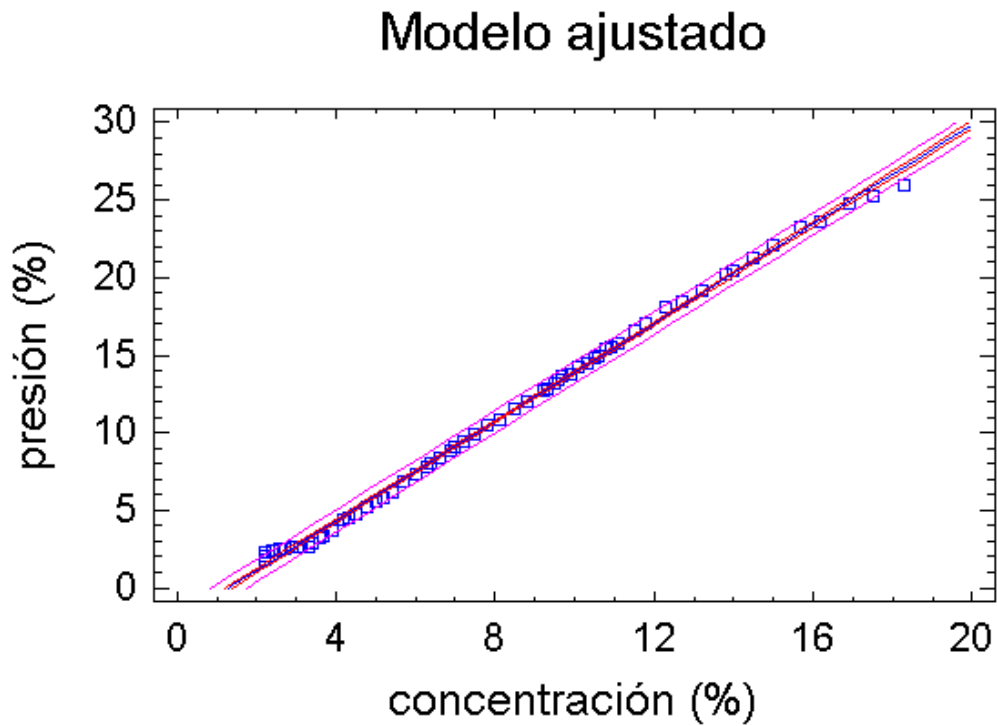


Figura N_o 3.7 Resultados de la regresión simple de (presión vs tiempo)

Modelo ajustado

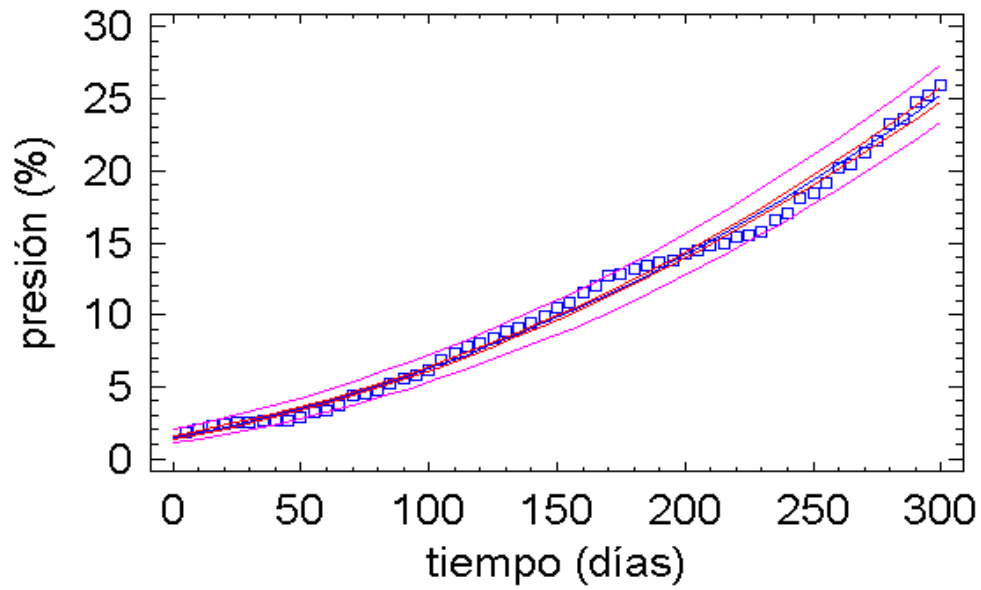


Figura N_o 3.8 Resultados de la regresión simple de (concentración vs tiempo)

Modelo ajustado

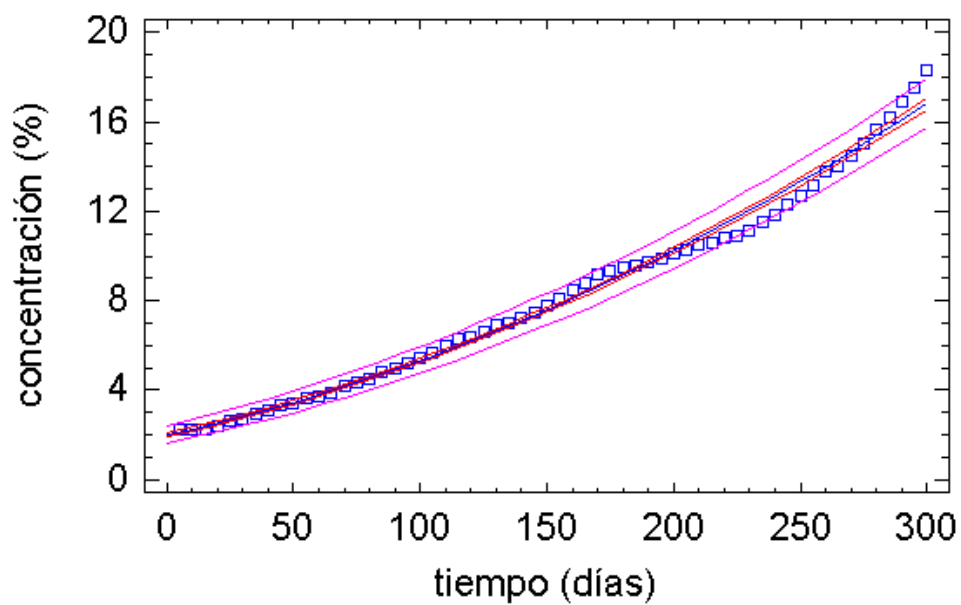


Figura N^o 3.9 Metodología a seguir para el trabajo en el tubo D

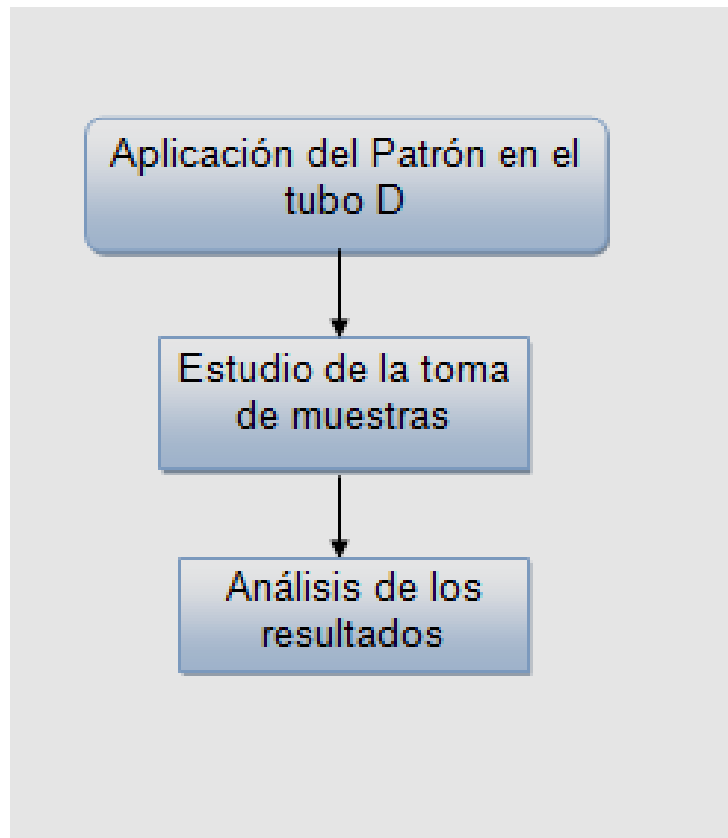


Figura N_o 3.10 Tiempo de estabilidad del permeado de las membranas pertenecientes al tubo D.

